

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерних систем та мереж

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА  
за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»

Тема наукової роботи: ВПЛИВ ОПТИЧНИХ ЗВОРОТНИХ ВТРАТ НА  
НАДІЙНІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ В GPON-МЕРЕЖІ

Виконав	_____	Д. А. Кондрашов
Керівник роботи	_____	В. А. Чубаров
Консультант	_____	В. В. Костенко
Нормоконтроль	_____	Д. І. Кузнєцов
Завідувач кафедри	_____	А. І. Купін

м. Кривий Ріг – 2024 рік

Криворізький національний університет  
 Факультет інформаційних технологій  
 Кафедра комп'ютерних систем та мереж

Ступінь вищої освіти  
 Спеціальність

бакалавр  
 123 «Комп'ютерна інженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, голова циклової комісії

\_\_\_\_\_ А. І. Купін

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

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

\_\_\_\_\_ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_

керівник роботи \_\_\_\_\_,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року № \_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

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

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



## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 102 сторінки, 60 рисунків, 11 таблиць, 67 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – явище оптичних зворотних втрат у волоконно-оптичних лініях GPON.

Робота складається з трьох розділів.

Перший розділ присвячений аналізу фізичного рівня технології PON на основі ВОЛЗ. Виконано опис основних принципів її роботи, а також проблем передавання даних через оптичне волокно. Висвітлено питання наявності оптичних зворотних втрат в оптоволоконних системах.

У другому розділі розкрито питання проблематики збільшення оптичного бюджету в мережах GPON, наведено варіанти розрахунку оптичного бюджету та виконано аналіз рефлектограм існуючих ліній GPON.

У третьому розділі проведено імітаційне моделювання, розроблено математичну модель впливу ORL на надійність передавання даних в GPON-мережі.

ORL, GPON, ОПТИЧНИЙ БЮДЖЕТ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, РЕФЛЕКТОГРАМА.

					КНУ.РМ.123.24.06.Р			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив		Кондрашов			РЕФЕРАТ	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Чубаров						
						КІ-23м		
Н.контроль		Кузнецов						
Затвердив		Купін						

Master's work: 102 pages, 60 figures, 11 tables, 67 used sources.

Object of research – the phenomenon of optical return losses in GPON fiber-optic lines.

The paper consists of three parts.

The first chapter is devoted to the analysis of the physical layer of the FOC-based PON technology. It describes the basic principles of its operation and the problems of data transmission via optical fiber. The issue of optical return losses in optical fiber systems is highlighted.

The second chapter discusses the issues of increasing the optical budget in GPON networks, provides options for calculating the optical budget, and analyses the reflectograms of existing GPON lines.

In the third section, the simulation modelling has been made and the mathematical model of the impact of ORL on the reliability of data transmission in a GPON network has been developed.

ORL, GPON, OPTICAL BUDGET, SIMULATION MODELLING, REFLECTOGRAM.

					КНУ.РМ.123.24.06.Р	Арк.
Арк.	№ документа	Підпис	Дата			

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....	7
ВСТУП .....	9
1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ОПТОВОЛОКОННИХ СИСТЕМ, ЇХНІ ПЕРЕВАГИ ТА ПРОБЛЕМАТИКА.....	11
1.1 Огляд технології ВОЛЗ на фізичному рівні.....	11
1.2 Огляд типів оптоволоконної мережевої архітектури.....	15
1.3 Огляд структури, пасивного і активного обладнання технології PON.....	19
1.4 Огляд фізичної і логічної GPON-технології .....	21
1.5 Огляд альтернативної технології GEPON (EPON).....	26
1.6 Важливість та істотність оптичного бюджету в PON-технологіях .....	28
1.7 Фактори, що впливають на оптичний бюджет .....	29
1.8 Вплив факторів монтажних та будівельних робіт на якісні показники фізичних параметрів ВОЛЗ .....	32
1.9 Огляд діючого технічного рішення мережі GPON .....	38
1.10 Огляд використаного активного мережевого обладнання .....	43
Висновки за розділом.....	50
2 ПРОБЛЕМАТИКА ЗБІЛЬШЕННЯ ОПТИЧНОГО БЮДЖЕТУ В МЕРЕЖАХ GPON	52
2.1 Способи тестування якості GPON-лінії зовнішніми вимірювальними приладами	52
2.2 Експлуатаційні та діагностичні виміри апаратними засобами GPON OLT та GPON ONU.....	59
2.3 Вирішення задачі збільшення кількості абонентів .....	75
2.4 Розрахунок оптичного бюджету в існуючих PON-лініях .....	77
2.5 Аналіз рефлектограм існуючих ліній PON .....	81
Висновки за розділом.....	88
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ОПТИЧНИХ ЗВОРОТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ НА НАДІЙНІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ В GPON-МЕРЕЖІ .....	90
Висновки за розділом.....	95
ВИСНОВКИ .....	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	98

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- APC – Angle Physical Contact.  
 ATM PVC – Asynchronous Transfer Mode Permanent Virtual Circuit.  
 BER – Bit Error Rate.  
 CE – Conformité Européenne.  
 CPE – Customer Premises Equipment.  
 CPU – Central Processing Unit.  
 CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing.  
 DBA – Dynamic Bandwidth Allocation.  
 DDM – Digital Diagnostic Monitoring.  
 DSLAM – Digital Subscriber Line Access Multiplexer.  
 ETH – Ethernet.  
 FEC – Forward Error Correction.  
 FBT – Fused Biconical Taper.  
 FiOS – Fiber Optic Service.  
 FTTB – Fiber to the Building.  
 FTTC – Fiber to the Curb.  
 FTTH – Fiber to the Home.  
 FTTN – Fiber to the Node.  
 FTTx – Fiber to the x.  
 GEM – GPON Encapsulation Method.  
 GEAPON – Gigabit Ethernet Passive Optical Network.  
 GPON – Gigabit Passive Optical Network.  
 GTC – GPON Transmission Convergence.  
 GWR – Gateway Router.  
 HEC – Header Error Check.  
 HFC – Hybrid Fiber-Coaxial.  
 ID – Identifier.  
 IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers.  
 ISO9001 – International Organization for Standardization 9001.  
 ISP – Internet Service Provider.  
 ITU-T – International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector.  
 LAN – Local Area Network.  
 LID – Loss of Input Detection.  
 LOID – Logical ONU Identifier.  
 LSB – Least Significant Bit.  
 MAC – Medium Access Control.  
 MIB – Management Information Base.  
 MIMO – Multiple Input Multiple Output.  
 MSA – Multi-Source Agreement.  
 MSB – Most Significant Bit.  
 NRZ – Non-Return to Zero.  
 OAM – Operations, Administration, and Maintenance.

					KHY.PM.123.24.06.ПC	Арк.
Арк.	№ документа	Підпис	Дата			

OCWR – Optical Cable Water Resistance.  
 ODN – Optical Distribution Network.  
 OID – Object Identifier.  
 OLT – Optical Line Terminal.  
 OMCC – ONU Management and Control Channel.  
 OMCI – ONT Management and Control Interface.  
 ONU – Optical Network Unit.  
 ONT – Optical Network Terminal.  
 ORF – Optical Return Function.  
 ORL – Optical Return Loss.  
 OTDR – Optical Time-Domain Reflectometer.  
 PAS – Profile Alignment System.  
 PC – Physical Contact.  
 PDU – Protocol Data Unit.  
 PLOAM – Physical Layer Operations, Administration, and Maintenance.  
 PLC – Planar Lightwave Circuit.  
 PLI – Payload Length Indicator.  
 PON – Passive Optical Network.  
 PTI – Payload Type Indicator.  
 QoS – Quality of Service.  
 ROHS – Restriction of Hazardous Substances.  
 RTC – Real-Time Clock.  
 SFP – Small Form-factor Pluggable.  
 SLA – Service Level Agreement.  
 SNMP – Simple Network Management Protocol.  
 SNR – Signal-to-Noise Ratio.  
 TCONT – Traffic Container.  
 TCP – Transmission Control Protocol.  
 TDM – Time Division Multiplexing.  
 TDMA – Time Division Multiple Access.  
 UNI – User-Network Interface.  
 UPC – Ultra Physical Contact.  
 USB – Universal Serial Bus.  
 VFL – Visual Fault Locator.  
 VGW – Voice Gateway.  
 VLAN – Virtual Local Area Network.  
 VoIP – Voice over Internet Protocol.  
 WDM – Wavelength Division Multiplexing.



## ВСТУП

Доступ до інтернету залишається критично важливим для мешканців України, і забезпечення його стабільності набуває особливого попиту в умовах періодичних відключень електроенергії. Саме в умовах відсутності світла технологія GPON демонструє свою перевагу над іншими завдяки своїй енергонезалежності. Ця технологія дозволяє надавати послугу «Інтернет без світла», коли активне обладнання з боку провайдера функціонує на генераторах, а клієнту залишається лише підключити свій маршрутизатор до мобільної акумуляторної батареї, щоб продовжувати користуватися інтернетом навіть за відсутності електропостачання.

Через те, що попит на стабільний доступ до Інтернету швидко зростає в сучасних реаліях, перед інтернет-провайдерами стоїть завдання активного розширення клієнтської бази шляхом прокладання нових оптоволоконних ліній або модернізації вже існуючих. У таких проектах особливу увагу приділяють забезпеченню надійного з'єднання, оскільки будь-які збої у мережі можуть призвести до незручностей для користувачів і фінансових втрат для провайдерів.

Важливим аспектом у забезпеченні стабільної роботи GPON-мереж є контроль параметрів оптичного сигналу та мінімізація оптичних зворотних відображень, які можуть негативно вплинути на достовірність інформації, що передається в оптоволоконних лініях. Ці відображення можуть бути сприйняті високочутливими приймачами як справжні сигнали, що призводить до зриву синхронізації часових інтервалів, на основі яких працюють технології PON. Саме в цьому і полягає *актуальність проблеми*, що досліджується в цій кваліфікаційній роботі магістра.

*Метою* даної роботи є дослідити проблему виникнення оптичних зворотних втрат у GPON-мережах та проаналізувати їх вплив на працездатність оптичних ліній та надійність передавання даних ними. Для досягнення поставленої мети визначено такі *завдання*:

- виконати аналіз основних фізичних факторів, що впливають на роботу GPON-мереж, включаючи фактори монтажних і будівельних робіт;
- провести дослідження реальних GPON-ліній різної протяжності;
- дослідити проблематику збільшення оптичного бюджету в мережах GPON;
- змоделювати вплив ORL на надійність передачі даних та запропонувати рекомендації щодо його мінімізації.

Таким чином, *об'єктом дослідження* є явище оптичних зворотних втрат (ORL), а *предметом дослідження* є вплив цього явища на надійність передачі даних волоконно-оптичними лініями в мережах типу GPON.

					КНУ.РМ.123.24.06.ВС			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив	Кондрашов				ВСТУП	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Чубаров							
Н.контроль	Кузнецов				КІ-23м			
Затвердив	Купін							

Для виконання поставлених завдань використано такі *методи*, як теоретичний аналіз наукової літератури і технічної документації з GPON-мереж, експериментальне дослідження реальних GPON-ліній та імітаційне моделювання впливу оптичних зворотних втрат на надійність передавання даних.

*Наукова новизна* роботи полягає у моделюванні впливу оптичних зворотних відображень на якість передачі даних в мережах GPON та розробці рекомендацій щодо оптимального вибору параметрів обладнання. У межах цього дослідження будуть запропоновані шляхи покращення надійності передавання даних в GPON-мережах, зокрема через зменшення впливу оптичних зворотних відображень. Результати дослідження стануть основою для рекомендацій і пропозицій інтернет-провайдерам щодо вибору оптимальних параметрів обладнання, залежно від характеристик оптичної лінії, що сприятиме підвищенню ефективності та надійності передачі даних в GPON-мережах.

*Апробація результатів* дослідження була проведена на XVII Всеукраїнській науково-практичній WEB-конференції аспірантів, студентів та молодих вчених «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» у березні 2024 року. Тези роботи було опубліковано у збірнику матеріалів конференції.

					КНУ.РМ.123.24.06.ВС	Арк.
Арк.	№ документа	Підпис	Дата			

# 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ОПТОВОЛОКОННИХ СИСТЕМ, ЇХНІ ПЕРЕВАГИ ТА ПРОБЛЕМАТИКА

## 1.1 Огляд технології ВОЛЗ на фізичному рівні

Волоконна оптика базується на передачі даних у вигляді світлових сигналів через тонкі нитки скла або пластику, відомі як оптичні волокна. Ці волокна працюють шляхом передачі світлових імпульсів. Основним принципом цієї технології є повне внутрішнє відображення – коли світлові сигнали утримуються всередині серцевини волокна, відбиваючись від стінок, що дозволяє їм переміщуватися з мінімальними втратами.

Ключовими компонентами цієї технології є передавач, приймач та саме оптичне волокно. Передавач є початковою точкою передачі даних у волоконно-оптичній системі. Він виконує функцію перетворення електричних сигналів на світлові за допомогою лазерів або світлодіодів. Вибір передавача впливає на швидкість передачі даних і відстань, яку може подолати сигнал.

Приймач, відповідно, перетворює світлові імпульси назад в електричні сигнали. Для приймання світла та реконструкції переданих даних використовуються фотодіоди.

Оптичне волокно складається з серцевини, де саме поширюється світло, і шару оболонки, який оточує серцевину, забезпечуючи відображення світлових сигналів. Оптичне волокно поділяють на одномодове та багатомодове (рисунок 1.1).

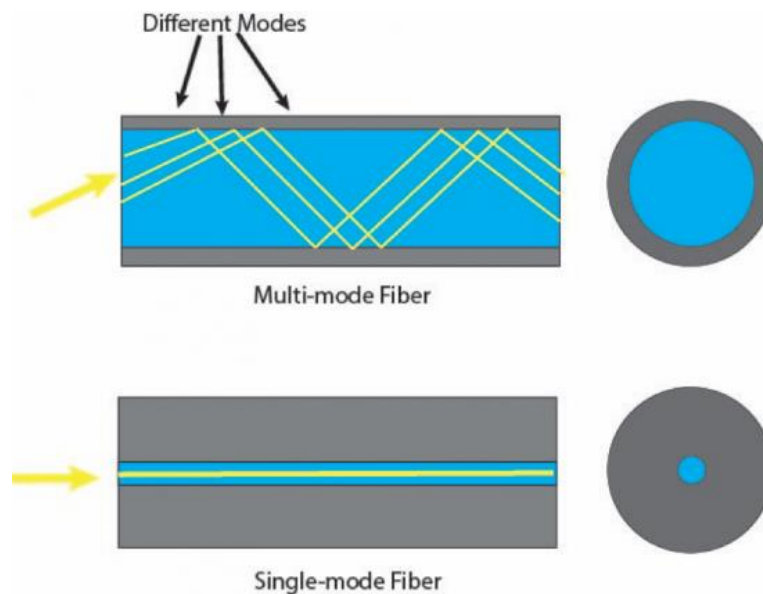


Рисунок 1.1 – Багатомодове та одномодове оптичне волокно [27]

Одномодове волокно має вузьку серцевину (приблизно 8,3 мікрон) і може пропускати лише одну моду світла, сприяючи передаванню сигналу на великі

					КНУ.РМ.123.24.06.01.ОСОСІП			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив		Кондрашов			ОГЛЯД СУЧАСНИХ ОПТОВОЛОКОННИХ СИСТЕМ, ЇХНІ ПЕРЕВАГИ ТА ПРОБЛЕМАТИКА	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Чубаров						
Н.контроль		Кузнецов			КІ-23м			
Затвердив		Купін						

відстані з мінімальною дисперсією. Багатомодове волокно має ширшу серцевину (50-62,5 мікрон) і може передавати кілька світлових мод одночасно. Але за рахунок цього відбувається значне спотворення сигналу з відстанню, а тому таке волокно краще використовувати на невеликих відстанях, наприклад в межах локальної мережі.

В оптоволоконних мережах фізичні явища, що забезпечують передачу даних, засновані на властивостях світлових хвиль, які поширюються через оптичне волокно. Оптичне волокно складається з центрального світлопровідного ядра та зовнішньої оболонки, які мають різні показники заломлення. Зазвичай, ядро має більший показник заломлення, ніж оболонка. Коли світло входить у волокно під певним кутом, виникає явище внутрішнього повного відбиття: світловий промінь відбивається від межі ядра й оболонки без втрати енергії, постійно рухаючись вздовж волокна.

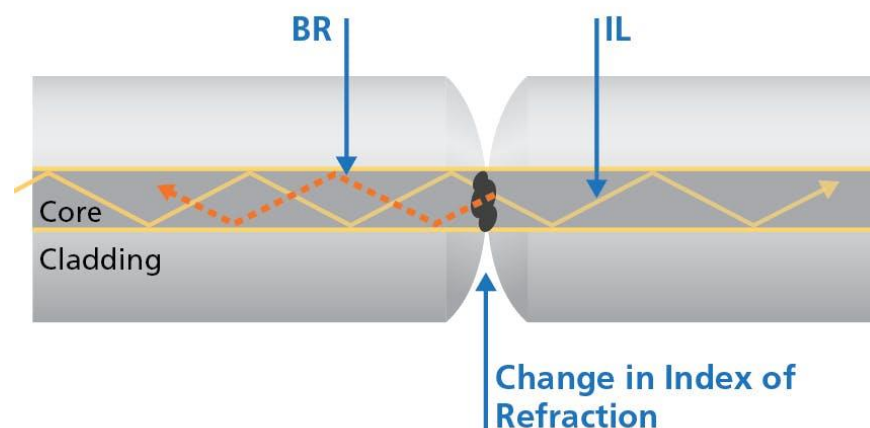


Рисунок 1.2 – Оптичний сигнал зазнає внесених втрат (Insertion Loss) і зворотного відбиття (Back Reflection) [46]

Зворотне відбиття – це кількість світлового потоку відбитого назад до джерела випромінювання від компонентів оптичної лінії зв'язку, таких як оптичні з'єднувачі та конектори, місця зварювання оптичних волокон або інші неоднорідності волокна. Для кількісного опису зворотного відбиття існує поняття коефіцієнта відбиття, який визначається як логарифм відношення потужності відбитого сигналу до вхідної потужності. Значення коефіцієнта відбиття лежать у від'ємній області значень, і, відповідно, чим менше цей коефіцієнт, тем краще (значення -60 дБ є кращим ніж -35 дБ) [40]. Хоча коефіцієнт відбиття прямо залежить від властивостей лінії передачі, він більше відноситься до параметрів поширення світла у відповідному середовищі. Для опису властивостей самого середовища передачі існує поняття оптичних зворотних втрат (Optic Return Loss, ORL) [12].

Термін «оптичні зворотні втрати» іноді використовується у тому ж сенсі, що і коефіцієнт відбиття, але, як величина, зворотна коефіцієнту відбиття, має протилежний знак. Наприклад, коефіцієнт відбиття -50 дБ дорівнює значенню +50 дБ зворотних втрат. Однак виробники рефлектометрів використовують цей термін для позначення суми всіх подій відбиття і загального зворотного розсіювання по всій довжині волокна, що тестується [15].

Рівень ORL обумовлений величиною сумарного світлового потоку, відбитого з оптичної лінії назад до джерела випромінювання. Це відбиття відбувається завдяки ряду фізичних явищ, що описують властивості поширення світла у ВОЛЗ. До таких явищ належать багаторазове перевідбиття від оптичних конекторів і інших неоднорідностей – ефекти, що генерують френелівське, а також релєївське зворотне розсіювання світла, дифузія світлового потоку та інші ефекти [13].

Однією з причин, які викликають повернення світлових хвиль назад у джерело, є наявність неоднорідностей малого розміру (неоднорідності вважаються малими, якщо їх діаметр  $dn \ll \lambda_n$ , де  $\lambda_n$  – довжина хвилі світла у волокні) [12], які виникли в силу термодинамічних флуктуацій щільності в розплавленому кварці й зафіксовані в ньому в процесі затвердіння при витягуванні волокна. Такі неоднорідності волокна називаються «вмороженими» неоднорідностями. Закономірності розсіювання на «вморожених» неоднорідностях дуже добре збігаються із закономірностями релєївського розсіювання, отриманими теоретично для розсіювання на сферичних неоднорідностях малого діаметру. Тому такий вид розсіювання світла у волокні (коли  $dn \ll \lambda_n$ ) має назву релєївське розсіювання світла [13]. Величина Релєївського розсіювання  $\sim 1/\lambda^4$ .

Релєївське розсіювання характеризується сферичною симетрією розсіяного випромінювання (рисунок 1.3 (а)), тому в однорідному середовищі інтенсивність випромінювання швидко зменшується через розбіжності випромінювання. В оптичному волокні частина розсіяного випромінювання каналізується серцевиною й поширюється уздовж волокна з малим загасанням без впливу дифракційної розбіжності (рисунок 1.3 (б)) у напрямку вхідного торця оптичного волокна [13]. Саме ця частина розсіяного випромінювання потрапляє назад до джерела.

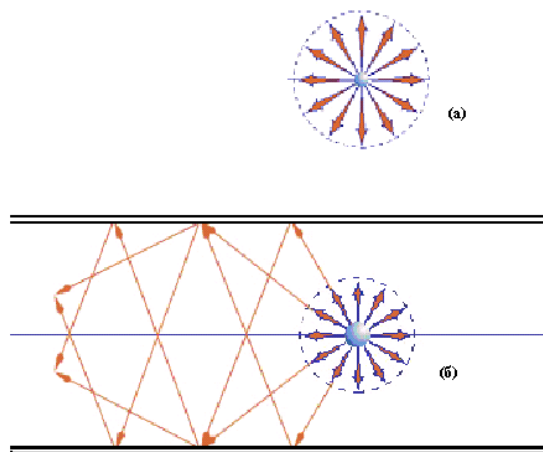


Рисунок 1.3 – Релєївське розсіювання світла в однорідному середовищі (а) і в оптичному волокні (б) [56]

При релєївському розсіюванні в однорідному середовищі потужність випромінювання швидко падає з відстанню через розбіжності, а при френелівському відбитті в оптичному волокні частина випромінювання, що попадає в числову апертуру, поширюється назад уздовж волокна без розбіжності.

Оскільки центри, що розсіюють, розподілені в середньому рівномірно уздовж волокна, то розсіяне різними центрами випромінювання вертається до вхідного торця волокна в різний час (з різною затримкою), що може викликати модуляцію по амплітуді джерела випромінювання.

Ще однією досить істотною причиною зворотного відбиття служить френелівське відбиття. Відбиттями Френеля називають значні по величині відбиття світла у зворотному напрямку (в напрямку джерела), викликані різкими змінами коефіцієнта заломлення волокна. Найчастіше такі відбиття бувають викликані дефектами з'єднань, розривами кабелю, його сильними вигинами, тріщинами та дефектами на торці волокна. Відношення потужності відбитого світла (за винятком релєвського зворотного розсіювання) до потужності вихідного імпульсу називається коефіцієнтом відбиття. Він визначається в дБ і виражається негативним значенням для пасивних оптичних систем. Чим ближче це значення до нуля, тим вище відбиття (і нижче якість з'єднання).

Сума потужності світлового відбиття виникаючих у результаті релєвського й френелівського відбиття, і називається ORL [51].

ORL вимірюється в децибелах (дБ) і виражається через логарифм відношення потужності випромінювання ( $P_e$ ) до потужності прийнятого світлового потоку в точці випромінювання ( $P_r$ ).

$$ORL = 10 \lg [P_e/P_r] \quad (1.1)$$

де  $ORL \geq 0$ .

Більш високі значення ORL однозначно говорять про менше значення втрат на відбиття, і про більш високу якість лінії.

Оптоволоконна технологія є фундаментальною для сучасних телекомунікацій завдяки кільком ключовим перевагам перед традиційними системами на основі міді.

1. Висока пропускна здатність: оптичні волокна забезпечують винятково високу пропускну здатність. Зокрема, одномодові волокна можуть передавати дані на швидкостях від кількох гігабітів на секунду (Гбіт/с) до кількох терабітів на секунду (Тбіт/с). Така висока ємність необхідна для підтримки програм із інтенсивним об'ємом даних, таких як потокове відео, хмарні обчислення та мережі 5G.

2. Передача на великі відстані: волоконна оптика може передавати сигнали на великі відстані з мінімальними втратами сигналу (загасанням). У той час як мідні кабелі відчувають значне погіршення сигналу на відстані більше кількох кілометрів, волоконно-оптичні кабелі можуть підтримувати цілісність сигналу на десятки кілометрів без потреби в ретрансляторах, що робить їх ідеальними для систем зв'язку на великі відстані, включаючи трансокеанські зв'язки.

3. Стійкість до електромагнітних перешкод: на відміну від мідних кабелів, які чутливі до електромагнітних перешкод від зовнішніх джерел, таких як радіосигнали та електричне обладнання, оптичні волокна стійкі до ЕМІ. Це робить волоконну оптику високонадійною в середовищах із значним електричним шумом, наприклад у промислових районах або густонаселених міських центрах.

4. Покращена безпека: передача даних через оптичні волокна за своєю суттю безпечніша, ніж системи на основі міді. Перехоплення світлових сигналів у волоконній оптиці без виявлення є складним завданням, оскільки для цього потрібно фізично підключитися до кабелю. Це робить волоконну оптику кращим вибором для військових, фінансових і урядових систем зв'язку, де безпека даних є критичною.

5. Масштабованість і перспективність: висока пропускну здатність і низькі втрати сигналу волоконно-оптичних мереж гарантують, що ці мережі зможуть адаптуватися до майбутніх технологічних досягнень, не вимагаючи значних змін інфраструктури. У міру зростання потреб у даних оптичні мережі можна оновити, просто налаштувавши електроніку на обох кінцях волокна, а не замінюючи сам фізичний носій.

Таким чином, волоконно-оптична технологія забезпечує чудову продуктивність щодо швидкості, відстані, надійності та безпеки, що робить її основою сучасних високошвидкісних мереж зв'язку. Ці функції сприяють його широкому застосуванню в таких секторах, як телекомунікації, охорона здоров'я, оборона та промислова автоматизація. Оптичні волоконно-оптичні лінії зв'язку стали основою для створення різноманітних типів мережевої архітектури.

## 1.2 Огляд типів оптоволоконної мережевої архітектури

Із розвитком ВОЛЗ-технологій з'явилося велике різноманіття мережевих інфраструктур. Архітектура оптичних мереж може бути описана концепцією FTTx. FTTx є загальним терміном для оптоволоконного доступу в оптоволоконному зв'язку. Літера «x» описує кінцевий пункт оптоволоконної лінії. Структура FTTx варіюється від терміналу оптичної лінії (OLT) в приміщенні постачальника мережевих послуг до кінцевого обладнання користувача, включаючи оптичний мережевий блок (ONU) або оптичний мережевий термінал (ONT).

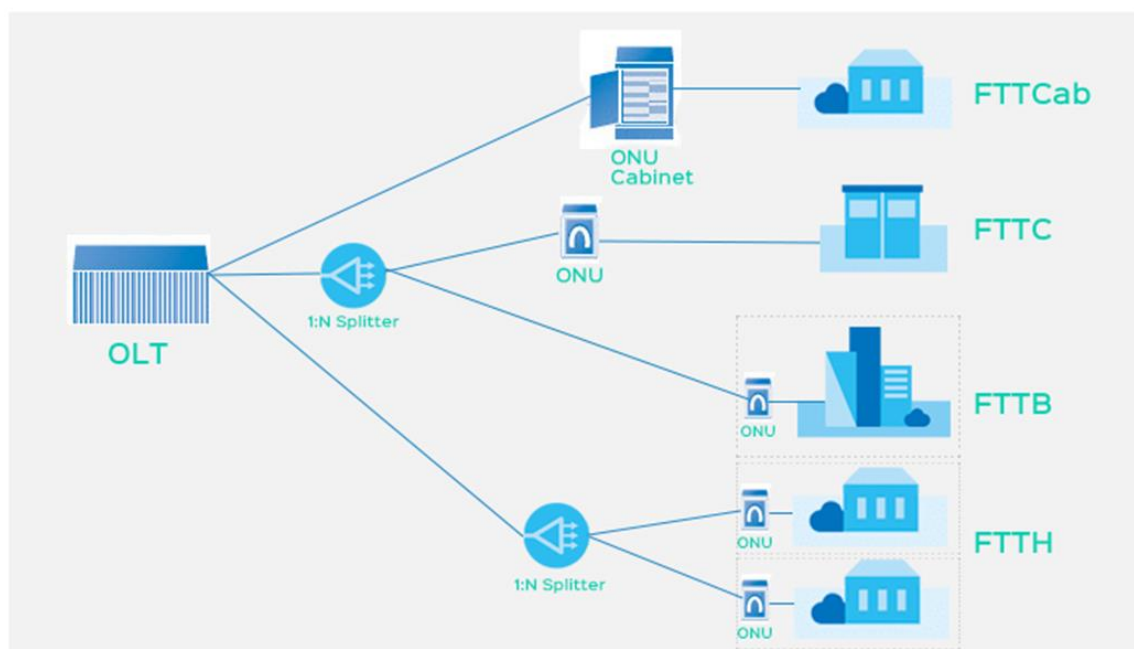


Рисунок 1.4 – Різновиди мережевої архітектури FTTx [24]



Термінал оптичної лінії (OLT) – це пристрій, що слугує кінцевою точкою постачальника послуг пасивної оптичної мережі. Він виконує дві основні функції:

1) перетворення між електричними сигналами, що використовуються обладнанням постачальника послуг, і волоконно-оптичними сигналами, що використовуються пасивною оптичною мережею.

2) координація мультиплексування між пристроями перетворення на іншому кінці мережі (ONU / ONT) [23].

Оптичний мережевий блок (ONU / ONT) перетворює оптичні сигнали, що передаються по волокну, в електричні. Перетворені електричні сигнали потім надсилаються конкретним пристроям абонентів. За своєю сутністю, ONT і ONU визначають один і той самий пристрій. Обидва вони відносяться до кінцевого обладнання споживача в лінії зв'язку FTTx. Технічною відмінністю є те, що ONT – це термін телекомунікаційного стандарту ITU-T, тоді як термін ONU відноситься до стандарту IEEE. На практиці існує невелика різниця між ONT і ONU в залежності від їх розташування [23].

У оптоволоконній мережі ONT/ONU знаходиться на території клієнта мережевих послуг. Призначення цього пристрою – використовувати оптичне волокно для підключення до пасивної оптичної мережі (PON) і з'єднуватися в обладнанням інтернет-провайдера для отримання доступу до Інтернету [23].

Існують різні варіанти класифікації мережевих концепцій FTTx. Відповідно до розташування ONU/ONT на стороні користувача оптичної мережі виділяють декілька основних типів:

- Fiber to The Home (FTTH) – оптоволокну до дому;
- Fiber to The Node (FTTN) – оптоволокну до вузла;
- Fiber to The Curb (FTTC) – оптоволокну до бордюру;
- Fiber to The Building (FTTB) – оптоволокну до будівлі;
- Fiber to The Antenna (FTTA) – оптоволокну до антени.

У архітектурі FTTH оптоволокну доходить безпосередньо до житлового простору клієнта. Здебільшого цей тип використовується для налаштування домашнього широкосмугового зв'язку. Оптоволоконна мережа прокладається від центральних офісів до житлових приміщень. Оптоволоконні кабелі закінчуються на межі житлового простору. Таким чином, як окремі будинки, так і офіси можуть ефективно використовувати мережу. Структури мережі FTTH можуть бути будинковими (Home Run), активними мережами типу «зірка» (Active Star) і пасивними оптичними мережами (PON) [8].

FTTH (Home Run) використовує волокно, що йде від центрального офісу безпосередньо до будинку/клієнта. В основному така архітектура використовується в невеликих житлових комплексах, куди проведено 2 волокна: одне для Інтернету і VoIP, інше – для аналогового кабельного телебачення. Така структура мережі також називається «точка-точка» або P2P [8]. Схему цієї архітектури наведено на рисунку 1.5.





Рисунок 1.5 – Архітектура FTTH (Home Run) [8]

FTTH (активна зірка) використовує оптоволокну від центрального офісу до локального активного вузла, який передає мультиплексовані сигнали. Ці сигнали потім розподіляються між усіма клієнтами. У цій структурі використовується багатоволоконний кабель, що прямує від центрального офісу до локального мережевого комутатора (рисунок 1.6).

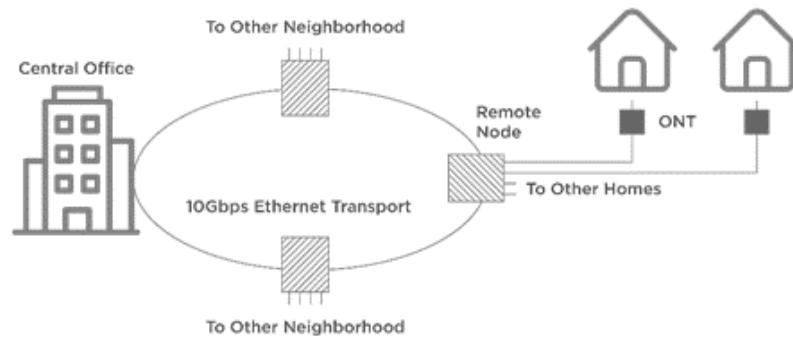


Рисунок 1.6 – Архітектура FTTH (Active Star) [8]

Архітектура FTTH (PON) включає в себе пасивну оптичну мережу. Кілька клієнтських ONU підключені до одного центрального пристрою OLT без необхідності залучення будь-яких активних компонентів між ними (рисунок 1.7). Для цього використовуються пасивні розгалужувачі. Сигнали від OLT надсилаються користувачам у вигляді широкомовної розсилки, у той час як абонентські ONU відбирають лише необхідні. Використання пасивних елементів значно знижує вартість каналів зв'язку за рахунок спільного використання [8].

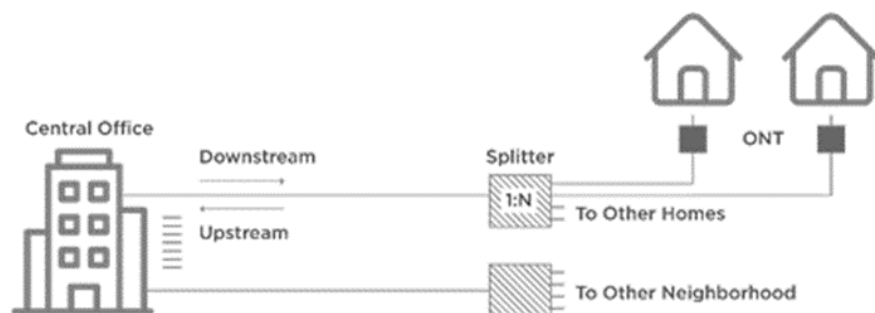


Рисунок 1.7 – Архітектура FTTH (PON) [8]

Оптоволокно до вузла (FTTN) включає волоконно-оптичні канали, які закінчуються в окремому приміщенні на території певних підприємств або біля будинків кінцевих користувачів. Від місця розташування вузла з'єднання здійснюється через існуючу інфраструктуру коаксіального або мідного кабелю. Типова конфігурація FTTN може обслуговувати кілька сотень клієнтів з одного вузла. Вузол зазвичай знаходиться на відстані декілька кілометрів від усіх місць розташування клієнтів, тому що довший коаксіальний сегмент може негативно впливати на швидкість [39].

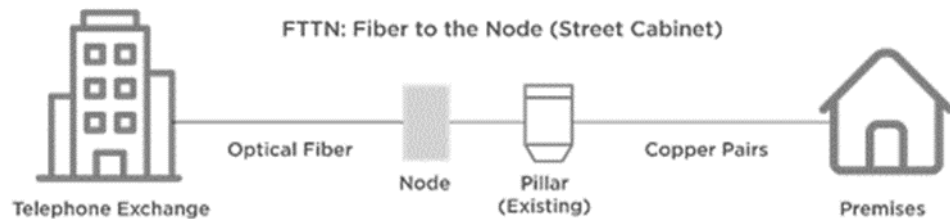


Рисунок 1.8 – Архітектура FTTN [8]

У аббревіатурі FTTC (оптоволокно до бордюру) термін «бордюр» використовується для опису корпусу або стовпа, де встановлено мережеве обладнання. Оптоволокно до бордюру схоже на FTTN, але з кожного місця обслуговується менше клієнтів, а коаксіальні відстані зазвичай набагато коротші. Ця конфігурація є корисною, оскільки вона майже забезпечує пряме оптоволоконне з'єднання, але не потребує оптоволоконного з'єднання в межах території [39].

Оптоволокно до будівлі (FTTB) схоже на FTTN, за винятком того, що завершення оптоволокна завершується за межами приватного будинку. Буква «В» також може означати також «бізнес» або «підвал». Підвальне завершення, як правило, знаходилося б у багатоквартирному будинку, де оптоволокно подавалося б у призначену технічну комутаційну кімнату [39].

Архітектура FTTA (оптоволокно до антени) використовує волоконну оптику для розподілу сигналів від модулю основної смуги (BBU) до віддаленої радіоголовки (RRH) поблизу верхньої частини стільникової вежі. Технологія FTTA є важливим елементом 5G, оскільки масивний MIMO означає більше антен і більше кабелів. Менша вага та знижений опір вітру роблять його логічною заміною коаксіального кабелю в цьому застосуванні. FTTA також дозволяє більш гнучко розміщувати модуль основної смуги, оскільки волоконно-оптичне з'єднання з RRH потенційно може охоплювати великі відстані [39].

З перелічених вище видів мережевих архітектур, FTTN (PON) користується найбільшою популярністю. Завдяки відсутності активного обладнання між провайдером і користувачем FTTN забезпечує стабільний доступ до мережі з низьким рівнем затримок і високу надійність підключення.

### 1.3 Огляд структури, пасивного і активного обладнання технології PON

Пасивна оптична мережа – це волоконно-оптична телекомунікаційна система, розроблена для передачі широкосмугового трафіку із центрального джерела до кількох кінцевих точок без необхідності в додатковому активному обладнанні уздовж шляху розподілу. PON визначається архітектурою «точка-багато точок», яка дозволяє одному оптоволокну одночасно обслуговувати декількох клієнтів, зменшуючи загальну вартість інфраструктури при максимальному збільшенні ефективності пропускної здатності. Термін «пасивний» означає відсутність будь-якого обладнання з живленням (наприклад, підсилювачів сигналу або комутаторів) між центральним терміналом і кінцевими користувачами, що забезпечую підвищену енергоефективність, спрощене обслуговування та більшу надійність.

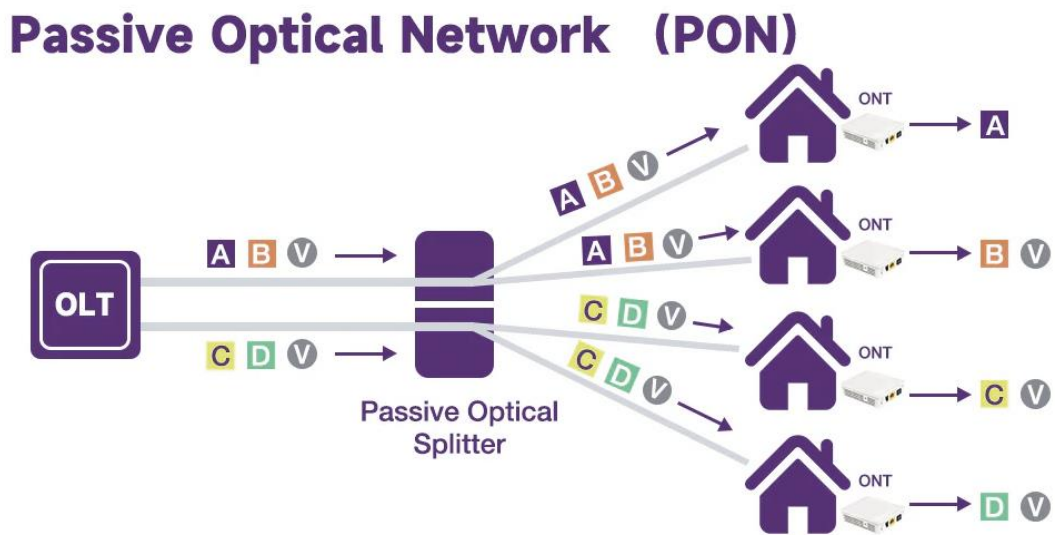


Рисунок 1.9 – Структура PON-мережі [2]

Термінал оптичної лінії (OLT) є центральним пунктом керування мережею PON, розташований у інтернет-провайдера. Його основною функцією є керування трафіком даних між базовою мережею та клієнтськими вузлами. OLT агрегує трафік від кількох клієнтів і координує потік інформації, щоб уникнути конфліктів синхронізації. OLT обробляє сигнали, виконує маршрутизацію трафіку та забезпечую функціонування протоколів.

Термінал оптичної мережі (ONT/ONU) розташований на території замовника та відповідає за перетворення оптичного сигналу в електричний. ONU підключається безпосередньо до кінцевих пристроїв клієнта. ONU також обробляють пріоритетизацію трафіку, демодуляцію сигналу та локальну буферизацію, щоб забезпечити плавний потік даних навіть у разі перевантаженості трафіку.

Оптичний розгалужувач – це пасивний пристрій, який розділяє оптичний сигнал від OLT відповідно до певного коефіцієнту розподілу, що дозволяє поширювати той самий сигнал на кілька абонентських пристроїв.

Типовий коефіцієнт розподілу становить 1:32, тобто одне волокно з OLT може бути розділене на 32 низхідних з'єднання для обслуговування 32 різних клієнтів. Також існують вищі коефіцієнти розподілу (наприклад, 1:64 або 1:128), але це може вплинути на потужність сигналу та відстань, яку сигнал може подолати без погіршення якості.

Функціонування PON зосереджено на ефективній передачі даних як у прямому, так і в зворотному напрямках з використанням пасивних компонентів для управління розподілом сигналу.

Через те, що PON використовує одне й те саме оптичне волокно для передачі та прийому даних, пасивний оптичний розгалужувач одночасно виконує функцію об'єднувача, що приймає дані від кінцевих пристроїв. Для цього в PON застосовані дві добре відомі технології мультиплексування, які використовуються в телефонії: ділення за довжиною хвилі та розподіл за часом [41].

Мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) забезпечує двонаправлений рух даних по одному волокну, використовуючи різні довжини хвиль для кожного напрямку: 1490 нм для передачі вниз та 1310 нм для висхідного трафіку. Довжина хвилі 1550 нм зазвичай використовується для додаткових накладених сервісів, таких як аналогове радіочастотне відео [41].

TDM (Time-division multiplexing), або мультиплексування з розділенням часу – це метод розміщення кількох потоків даних в одному сигналі шляхом поділу сигналу на багато сегментів, кожен з яких має дуже коротку тривалість. Кожен окремий потік даних повторно збирається на стороні приймача відповідно до його кванту часу [33].

Мультиплексор об'єднує сигнали на вихідному (передавальному) кінці лінії зв'язку. Складений сигнал містить дані від кількох відправників. На іншому кінці лінії окремі сигнали розділяються за допомогою демультиплексора, і направляються відповідним кінцевим користувачам. Двостороння схема зв'язку потребує мультиплексора/демультиплексора на кожному кінці лінії з високою пропускною здатністю.

Якщо багато сигналів потрібно надіслати вздовж однієї міжміської лінії, необхідна ретельна розробка, щоб забезпечити належну роботу системи. Перевагою TDM є його гнучкість. Схема дозволяє варіювати кількість сигналів, що надсилаються по лінії, і постійно регулює часові інтервали для оптимального використання доступної смуги пропускання [33].

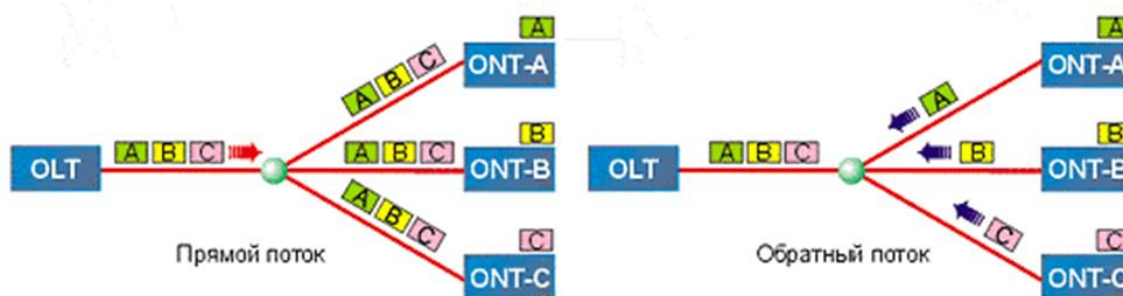


Рисунок 1.10 – Передача даних по технології TDM [22]

Спліттер, що є пасивним пристроєм, виконує функцію точки розподілу, де єдиний потік даних надсилається до всіх підключених кінцевих пристроїв ONU/ONT. ONU приймає лише ті пакети, які відповідають його часовому інтервалу у TDM. Пакети, призначені для інших ONT, фільтруються та відкидаються [41].

Серед різновидів пасивних оптичних мереж особливе місце займає технологія GPON, яка забезпечує вищу пропускну здатність і більш ефективний розподіл ресурсів мережі.

#### 1.4 Огляд фізичної і логічної GPON-технології

GPON (Gigabit Passive Optical Network) – це гігабітна пасивна оптична мережа; варіант реалізації високошвидкісної Інтернет-мережі, який використовується в оптоволоконних широкосмугових послугах [9].

GPON, як і інші PON-технології, базується на архітектурі «точка-багато точок». Це означає, що одне оптоволокно може обслуговувати кілька абонентів завдяки використанню пасивних оптичних розгалужувачів (спліттерів). Мережа GPON складається з OLT (термінал оптичної лінії), ONU (абонентський термінал) і спліттера. OLT приймає всі оптичні сигнали від ONU і перетворює їх на електричні сигнали. ONU підключається до кінцевих користувачів і в подальшому надсилає їхні сигнали назад до OLT [35].

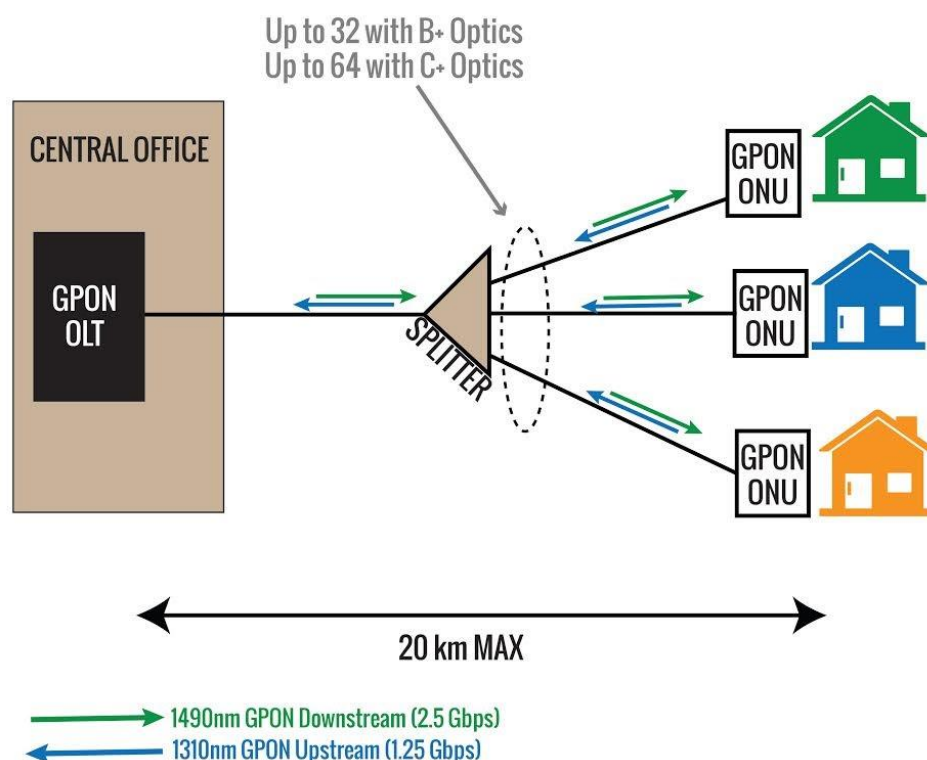


Рисунок 1.11 – GPON-технологія [9]

У гігабітній системі пасивної оптичної мережі (GPON) кадр режиму інкапсуляції GPON (GEM) є найменшою одиницею, що передає послуги, і основною структурою інкапсуляції. Усі потоки послуг інкапсулюються в кадр GEM і передаються по лініях GPON. Потоки послуг ідентифікуються портами GEM, а кожен порт GEM визначається унікальним ідентифікатором порту.

					КНУ.РМ.123.24.06.01.ОСОСІПП	Арк.
Арк.	№ документа	Підпис	Дата			

Ідентифікатор порту глобально призначається OLT. Таким чином, ONU, підключені до одного OLT, не можуть використовувати порти GEM, які мають однаковий ідентифікатор порту. Порт GEM використовується для ідентифікації віртуального каналу обслуговування, який передає потік обслуговування між OLT і ONU [45].



Рисунок 1.12 – Структура GEM-кадру [45]

Заголовок GEM складається з ідентифікатора довжини корисного навантаження, ідентифікатора порту, ідентифікатора типу корисного навантаження та перевірки помилок заголовка, і використовується для розрізнення даних різних портів GEM:

- PLI (Payload Length Indicator): вказує на довжину корисного навантаження даних.
- Port ID: унікально ідентифікує порт GEM.
- PTI (Payload Type Indicator): вказує тип корисного навантаження. Він використовується для ідентифікації стану та типу даних, які передаються, наприклад, чи передається повідомлення про експлуатацію, адміністрування та обслуговування (OAM) і чи завершена передача даних.
- HEC (Header Error Check): забезпечує функцію прямого виправлення помилок (FEC) і якість передачі [45].
- Корисне навантаження фрагмента: вказує на фрагмент кадру.

На рисунку 1.13 зображено спрощене порівняння структури Ethernet-пакету та GEM-кадру.

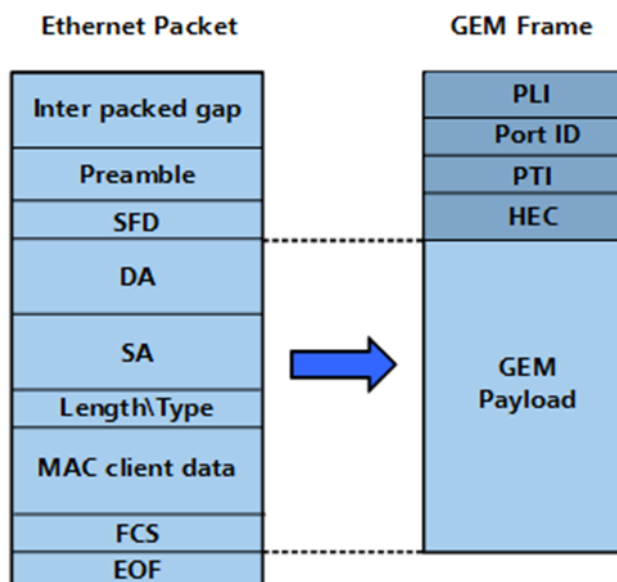


Рисунок 1.13 – Структура GEM-кадру [45]

GPON використовує мультиплексування за довжиною хвилі (WDM), що дозволяє надсилати кілька сигналів по одному волокну з використанням різних довжин хвиль світла – від 1290 до 1330 нм у висхідному напрямку та від 1480 до 1500 нм у низхідному напрямку.



У низхідному напрямку OLT транслює дані всім ONU (broadcast). Кожен ONU відфільтровує не призначені для нього дані на основі унікальної ідентифікації ONU ID. Процедуру пересилання пакетів у низхідному напрямку наведено на рисунку 1.14.

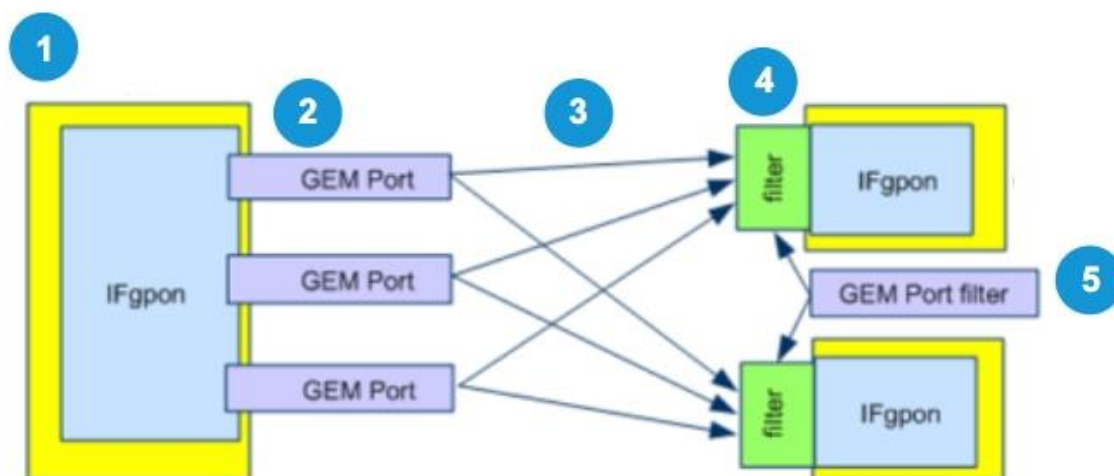


Рисунок 1.14 – Пересилання даних у низхідному напрямку [34]

Процес виконується таким чином:

1. OLT надсилає кадри Ethernet із портів Uplink до модуля обробки послуг GPON на основі налаштованих правил портів PON.
2. Потім модуль обробки послуг GPON інкапсулює кадри Ethernet у пакети даних порту GEM для передачі в низхідному напрямку.
3. Кадри конвергенції передачі GPON (GTC), які містять GEM PDU, транслюються на всі ONU, підключені до порту GPON.
4. ONU фільтрує отримані дані на основі ідентифікатора порту GEM, що міститься в заголовку PDU GEM, і зберігає дані, важливі лише для портів GEM на цьому ONU.
5. ONU декапсулює дані та надсилає кадри Ethernet кінцевим користувачам через сервісні порти [34].

У висхідному напрямку ONU надсилають дані до OLT за допомогою механізму множинного доступу з розділенням часу (TDMA). OLT контролює, який ONU передає в будь-який момент часу, щоб уникнути конфліктів. Вимірюється відстань між OLT і ONU. Часові інтервали розподіляються в залежності від відстані. ONU надсилає висхідний трафік на основі наданого часового інтервалу. Динамічний розподіл смуги пропускання (DBA) дозволяє OLT відстежувати в режимі реального часу перевантаження, використання смуги пропускання та конфігурацію. На рисунку 1.15 зображено процедуру пересилання пакетів у висхідному напрямку.

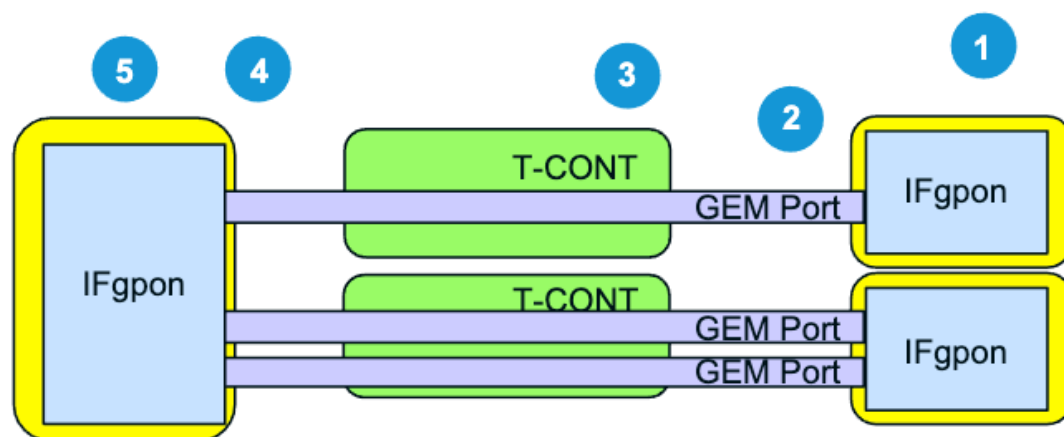


Рисунок 1.15 – Пересилання даних у висхідному напрямку [34]

Процес передачі виконується таким чином:

1. ONU надсилає кадри Ethernet до портів GEM на основі налаштованих правил, які відображають службові порти та порти GEM.
2. Порти GEM інкапсулюють кадри Ethernet у PDU GEM і додають ці PDU до черг TCONT на основі правил, які відображають порти GEM і черги TCONT.
3. Черги TCONT використовують часові інтервали на основі DBA, а потім передають вихідні GEM PDU до OLT.
4. OLT декапсулює GEM PDU, тепер видно оригінальний кадр Ethernet.
5. OLT надсилає кадри Ethernet із зазначеного порту висхідної лінії зв'язку на основі правил, які відображають порти служби та порти висхідної лінії зв'язку [34].

GPON підтримує 2,5 Гбіт/с у низхідному напрямку та 1,25 Гбіт/с у висхідному напрямку, що є асиметричним, але більш ніж достатнім для типових житлових і бізнес-випадків використання. Висока пропускна здатність низхідного потоку робить GPON ідеальним для важкого контенту, такого як потокове відео або хмарні обчислення.

Архітектура GPON базується на тих же основних компонентах, що й інші технології PON, але з більшою ефективністю передачі даних.

GPON широко використовується в волоконно-оптичних широкосмугових мережах, надаючи високошвидкісні послуги передачі даних, голосу та відео як для домашніх, так і для комерційних користувачів. Основними варіантами оптичної інфраструктури з використанням GPON є Fiber to the Home (FTTH), Fiber to the Building (FTTB) та Fiber to the Curb (FTTC) (рисунок 1.16).



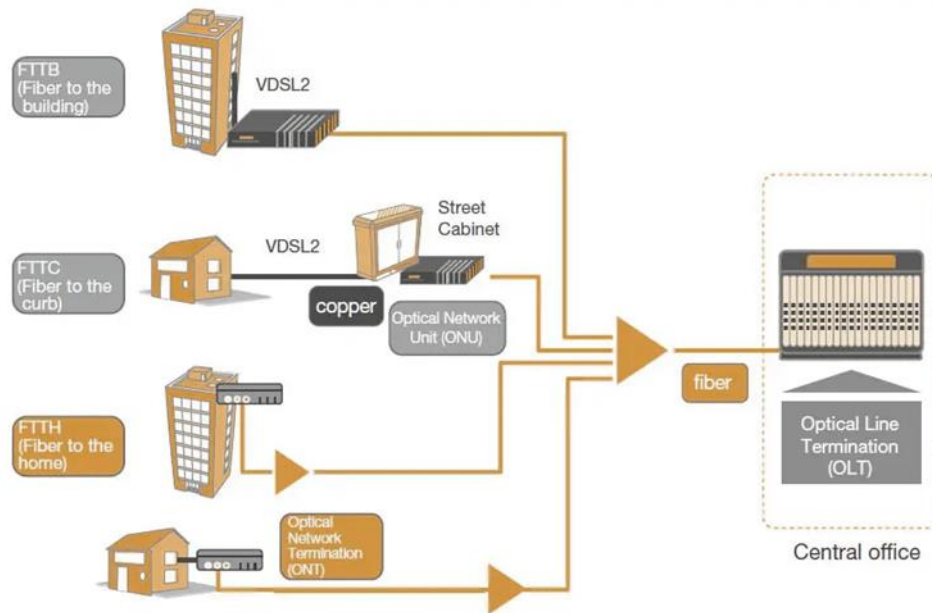


Рисунок 1.16 – Види оптичної інфраструктури [7]

Інфраструктура FTTH забезпечує оптоволоконне підключення безпосередньо до окремих будинків. Модель розгортання FTTB використовується в багатоквартирних будинках або комерційних будівлях, де оптоволоконно підводиться до центральної точки будівлі, а потім мідні кабелі з'єднують окремі квартири або блоки. У FTTC оптоволоконно простягається до вузла або шафи поблизу приміщень клієнта (зазвичай у межах 300 метрів), а потім для завершення підключення до клієнта використовуються мідні лінії.

До основних переваг технології GPON можна віднести:

- високу швидкість передачі даних;
- стійкість до електромагнітних завад;
- передавання даних на відстані до 20 км без необхідності у використанні активних підсилювачів;
- більша енергоефективність у порівнянні з мідними кабелями.

Недоліками технології GPON є:

- висока вартість початкового впровадження технології;
- чутливість кабелів до механічних пошкоджень;
- підвищена складність будівництва та експлуатації;
- проблеми з відбиттям світлового сигналу (наявність оптичних зворотних втрат – ORL).

Система GPON визначається серією стандартів, відомих як ITU-T G.984.x [11], які описують різні аспекти мережі, включаючи швидкості передачі, довжини хвиль та інші характеристики. Ці стандарти забезпечують взаємодію між обладнанням різних виробників і надають мережевим операторам основу для розробки та розгортання мереж GPON:

- ITU-T G.984.1: описує загальні характеристики GPON, включаючи архітектуру системи та компоненти.

- ITU-T G.984.2: визначає залежний від фізичного середовища рівень (PMD), вказуючи оптичні довжини хвиль, які використовуються для передачі в низхідному (1490 нм) і висхідному (1310 нм). Він також окреслює вимоги до

бюджету електроенергії.

- ITU-T G.984.3: охоплює рівень конвергенції передачі (ТС), докладно описуючи, як дані інкапсулюються та передаються через мережу за допомогою протоколу GEM.

- ITU-T G.984.4: визначає інтерфейс управління та контролю ONT (OMCI), який визначає, як OLT керує та налаштовує ONU/ONT.

- ITU-T G.984.5: представлено розширену підтримку довжини хвилі, що дозволяє співіснувати GPON та інші служби (наприклад, мультиплексування за довжиною хвилі) на тій же волоконно-оптичній інфраструктурі [11].

### 1.5 Огляд альтернативної технології GEPON (EPON)

Технології GEPON і EPON є ідентичними, за винятком швидкості передачі даних, і обидві створені на основі стандарту IEEE 802.3ah. GEPON є спрощеною технологією передачі даних, яка дозволяє обслуговувати кількох абонентів через одне оптичне волокно. У GEPON пакетна передача Ethernet здійснюється PON-мережами в первісному вигляді. Основна суть її роботи полягає в тому, що Ethernet-кадри з даними для різних користувачів мають спеціальні мітки, що дає можливість ідентифікувати одержувача. Ці пакети передаються від OLT (пристрою з'єднання з глобальною мережею) за допомогою SFP модуля.

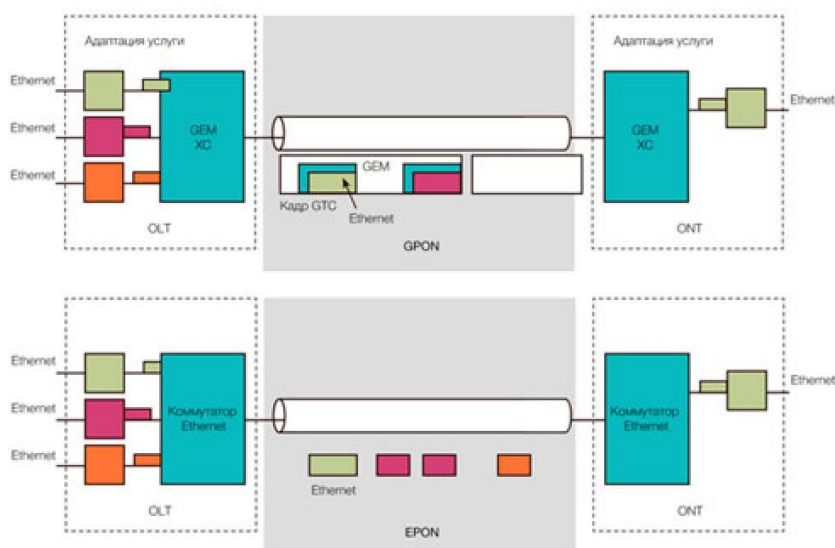


Рисунок 1.17 – Порівняння GPON та EPON [66]

У процесі передачі кадри Ethernet різної довжини виходять з OLT через певні інтервали часу. Технологія дозволяє підключати до 64 абонентів через один канал. Передача здійснюється на довжині хвилі 1490 нм із пропускнуою здатністю до 1,25 Гбіт/с.

Після виходу даних з OLT вони потрапляють в спліттер – пасивний пристрій для поділу оптичного сигналу між абонентами. Потім сигнал направляється в ONU, і дані передаються назад у OLT на хвилі 1310 нм зі швидкістю 1,244 Гбіт/с. Спліттер об'єднує пакети від різних абонентів в упорядкований потік Ethernet-кадрів, що йдуть до OLT, забезпечуючи передачу даних, голосових сигналів та кабельного телебачення.

## Недоліки технології GPON:

- Втрата сигналу на кожному вузлі. У мережі з 64 ONU загасання сигналу може перевищувати 20 дБ.
- Необхідність підтримувати максимальну пропускну здатність. Хоча окремі абоненти отримують швидкість від 16 Мбіт/с, кожна точка (ONU) повинна підтримувати до 1 Гбіт/с.
- Відсутність достатнього рівня безпеки даних, що не підходить для чутливих організацій.
- Складність оновлення: для збільшення пропускну здатності можливо знадобиться заміна усього кабелю.
- Проблеми у разі несправності одного ONU, що може впливати на всю мережу.
- Труднощі з виявленням несправностей, оскільки спліттери не можуть визначити, де саме стався збій.

## Переваги технології GPON:

- Економія кабелю, адже вона дозволяє скоротити його довжину майже втричі.
- Відсутність активних пристроїв у мережевих вузлах, що знижує витрати.
- Висока швидкість передачі даних – до 1 Гбіт/с.
- Ефективний розподіл трафіку: швидкість кожного абонента залежить від завантаження мережі.

Технологія GPON поєднує переваги високої пропускну здатності з низькими витратами на розгортання. Це зручне рішення для бюджетних мереж, але воно має свої недоліки, як-от низький рівень захисту даних і складність модернізації та діагностики. GPON є вигідним варіантом для забезпечення широкопasmового доступу до інтернету для багатьох користувачів за відносно низьку вартість.

Радіус з'єднань в EPON-мережі може сягати 30 км, а структура пасивної PON-мережі має розгалуження у форматі дерева 1x64. Для GPON топологія лісу з деревами представлена у вигляді 1x128, але максимальний радіус не перевищує 20 км [66].

У EPON використовується надмірне кодування 8/10B, де кожен 8 символів замінюються на 10, що знижує ефективно передану смугу частот на 20%. Натомість у GPON застосовується лінійне дворівневе кодування (NRZ) – примітивний метод біполярного кодування, що забезпечує мінімальне зниження пропускну здатності з мінімальними втратами швидкості. Для EPON ефективність смуги частот становить близько 70%, тоді як для GPON зазвичай вона перевищує 95% [66].

GPON зазвичай має нижчу початкову вартість через широку доступність і сумісність обладнання на основі Ethernet. Використання стандартних фреймів Ethernet спрощує архітектуру та зменшує потребу в спеціалізованому обладнанні.

GPON, з іншого боку, може вимагати дорожчого обладнання та програмного забезпечення через його власний протокол GEM і потребу в більш складному управлінні трафіком.

## 1.6 Важливість та істотність оптичного бюджету в PON-технологіях

Під час моніторингу волоконно-оптичної мережі розуміння бюджету оптичної потужності і коефіцієнтів розподілу для волоконно-оптичних точок доступу має вирішальне значення для забезпечення ефективного управління сигналом і оптимальної продуктивності мережі [18].

Оптичний бюджет – це загальна кількість оптичної потужності, яку має волоконно-оптична система для підтримки прийняттого рівня продуктивності. Він розраховується з урахуванням потужності оптичного сигналу на передавачі, мінімально допустимої чутливості на приймачі та втрат, що виникають на шляху проходження сигналу. Достатній оптичний бюджет гарантує, що сигнал, який досягає приймача, є достатньо потужним, щоб бути виявленим і правильно інтерпретованим [18].

Оптичний бюджет є різницею між оптичною потужністю, яку випромінює передавач, та чутливістю приймача. Оптичний бюджет визначає максимально допустиму втрату потужності, яка може виникнути під час проходження світлових сигналів через волоконно-оптичну мережу, зберігаючи при цьому цілісність сигналу на приймальному кінці. Оптичний бюджет дозволяє розрахувати кількість пасивних компонентів (наприклад, з'єднань, з'єднувачів і розгалужувачів), які можна ввести в систему до того, як сигнал знизиться за допустимі межі. Таким чином, оптичний бюджет є ключовим фактором у визначенні доцільності розгортання оптоволоконної мережі в конкретних умовах при вибраному обладнанні.

Технічно, сучасні OLT можуть підтримувати підключення до 128 абонентів одночасно. Однак, дуже часто такої кількості абонентів не можливо досягти через відсутність необхідного оптичного бюджету. Побудова PON-мережі з граничними значеннями оптичного бюджету не рекомендується, оскільки це може призвести до нестабільної роботи системи, особливо в умовах підвищеного навантаження.

Оптичні трансивери з часом втрачають свою ефективність через старіння та інтенсивне використання. Це призводить до зниження потужності переданого сигналу та зменшення чутливості приймачів, що безпосередньо впливає на якість зв'язку між активними компонентами мережі. Деградація лазерів у трансиверах відбувається через високі температури, електричні перепади та постійної роботи на межі своєї потужності. Зниження чутливості приймачів обумовлене деградацією фотодіодів та інших компонентів, які відповідають за конвертацію оптичного сигналу в електричний. Цей процес, як і зниження потужності лазерів, є неминучим у довгостроковій перспективі. Якщо оптичний бюджет мережі не має достатнього запасу, комбінація слабого сигналу від передавача та зниженої чутливості приймача може призвести до значного погіршення якості передачі даних.

Саме тому, важливим аспектом при проектуванні PON-мережі є наявність запасу оптичного бюджету. В літературних джерелах немає чітко визначених рекомендацій щодо конкретного числового значення цього запасу. Але згідно з практичним досвідом, для забезпечення надійності мережі рекомендується мати запас оптичного бюджету в межах 3-6 дБ [19].

## 1.7 Фактори, що впливають на оптичний бюджет

У системі PON оптичний бюджет повинен враховувати все загасання сигналу, яке виникає під час проходження сигналу через волоконно-оптичні кабелі, розгалужувачі та інші пасивні компоненти. Якщо загальна втрата перевищує оптичний бюджет, сигнал не досягне приймача з достатньою силою для правильної інтерпретації, що призведе до втрати даних або збою передачі.

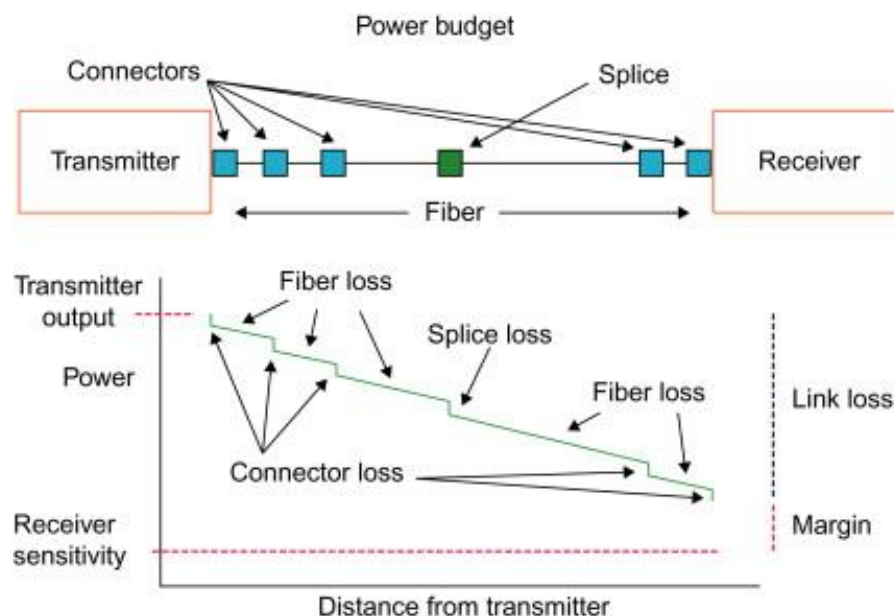


Рисунок 1.10 – Візуалізація явищ, що впливають на оптичний бюджет [14]

Існують кілька факторів, що в сукупності впливають на загальний оптичний бюджет. Ці фактори необхідно ретельно враховувати при проектуванні та впровадженні ВОЛЗ:

Втрата волокна означає ослаблення оптичного сигналу під час його проходження волокном. Це загасання зазвичай вимірюється в дБ на кілометр (дБ/км) і залежить від таких факторів, як якість волокна, довжина хвилі світлового сигналу та умови навколишнього середовища. Загальні значення втрат для одномодових волокон коливаються від 0,2 дБ/км до 0,35 дБ/км для довжин хвиль 1310 нм і 1550 нм відповідно [4].

Втрата на з'єднанні сегментів волокна. Втрати при зрощенні зазвичай становлять приблизно від 0,1 до 0,2 дБ на одне зрощування, залежно від використовуваної техніки зрощування (зварювання наплавленням проти механічного) і точності вирівнювання серцевин волокна [4].

Втрати на конекторах, що використовуються для з'єднання оптичних волокон з іншими мережевими компонентами, такими як передавачі, приймачі та розгалужувачі. Втрати з'єднувача зазвичай коливаються від 0,1 до 0,5 дБ на з'єднувач [4].

Спліттери також вносять значні втрати в систему, які збільшуються разом із коефіцієнтом розподілу. Наприклад, розгалужувач 1:2 має типові втрати близько 4 дБ, тоді як розгалужувач 1:32 може вносити втрати до 19 дБ або більше [31]. Таким чином, вибір коефіцієнтів розподілу безпосередньо впливає на оптичний бюджет і максимальну відстань, на якій може працювати PON.

Фактори навколишнього середовища, такі як коливання температури, вигини волокна та мікровигини, також можуть сприяти додатковим втратам сигналу в мережі. Ці фактори необхідно враховувати під час розрахунку загального оптичного бюджету, щоб забезпечити надійну роботу за будь-яких умов.

Щоб розрахувати оптичний бюджет волоконно-оптичної системи, необхідно підсумувати втрати потужності від усіх джерел і переконатися, що загальні втрати не перевищують оптичний бюджет, який забезпечують передавач і приймач системи.

Як правило, потужність SFP модуля, що приводиться виробником, є потужністю яка попадає у волокно. Якщо вона виявляється менше, можна визначити перехідні втрати.

Потужність генеруєма у волокно  $P_F$  (дБм) дорівнює різниці потужності передавача  $P_T$  (дБм) та перехідних втрати на механічному з'єднанні SFP модуля та патч панелі  $L_C$  (дБ).

$$P_F = P_T - L_C \quad (1.2)$$

Посилення системи  $P_A$  (дБ) дорівнює різниці потужності передавача  $P_T$  (дБм) з чутливістю приймача  $S_R$  (дБм).

$$P_A = P_T - S_R \quad (1.3)$$

Запас надійності  $M_S$  (дБ) дорівнює сумі фактора середовища  $F_M$  (дБ), фактора старіння  $F_O$  (дБ), фактора флуктуації  $F_F$  (дБ), фактора ремонту  $F_R$  (дБ) та запасу на помилки в результаті проектування  $F_E$  (дБ).

$$M_S = F_M + F_O + F_F + F_R + F_E \quad (1.4)$$

Максимально припустимі втрати наскрізної ділянки лінії зв'язку з волоконно-оптичним кабелем визначаються вирахуванням запасу надійності від посилення системи.

Енергетичний потенціал  $P_E$  (дБ) дорівнює різниці посилення системи  $P_A$  (дБ) та запасу надійності  $M_S$  (дБ).

$$P_E = P_A - M_S \quad (1.5)$$

Загальні втрати в механічних з'єднаннях на ділянці волоконно-оптичної лінії зв'язку обчислюється множенням числа конекторів на даній ділянці на втрати в одному конекторі (у дБ).

Загальні втрати конекторів  $L_T$  (дБ) дорівнює добутку втрат конектора  $L_C$  (дБ) та числа конекторів  $N_C$ :

$$L_T = L_C * N_C \quad (1.6)$$

Загальні втрати з'єднань на ділянці волоконно-оптичної лінії зв'язку  $L_S$  (дБ) обчислюються множенням числа з'єднань  $N_C$  на втрати в одному з'єднанні  $L_C$  (дБ).

$$L_S = L_C * N_C \quad (1.7)$$

Необхідно проаналізувати кожну ділянку волоконно-оптичної лінії зв'язку для визначення максимально припустимого загасання волоконно-оптичного кабелю. Це здійснюється вирахуванням зі значення бюджету втрат на механічних з'єднаннях, втрат зварених з'єднань і інших втрат.

Припустиме загасання кабелю  $L_P$  (дБ) дорівнює різниці енергетичного потенціалу  $P_E$  (дБ), втрат на механічних з'єднаннях  $L_T$  (дБ), втрат на зварених з'єднаннях  $L_C$  (дБ) та інших втрат  $L_O$  (дБ):

$$L_P = P_E - L_T - L_C - L_O \quad (1.8)$$

Для кожної ділянки оптичного волокна визначається максимально припустима оцінка загасання в децибелах на кілометр (дБ/км). Обчислена величина в подальшому порівнюється зі значеннями загасання від виробника для визначення того, які кабелі можна використовувати на конкретній ділянці. Значення обчислюється діленням максимально припустимого загасання кабелю на загальну довжину кабелю.

Максимальне нормоване загасання кабелю  $M_N$  (дБ/км) дорівнює відношенню максимально припустимого загасання кабелю  $M_O$  (дБ) до загальної довжини кабелю  $L_{(км)}$ :

$$M_N = \frac{M_O}{L_{(км)}} \quad (1.9)$$

Для кожної ділянки оптичного волокна обчислюється очікуване загасання сигналу. Довжина кабелю на ділянці множиться на зазначене для обраного виду кабелю нормалізоване загасання.

Втрати волокна  $F_L$  (дБ) дорівнює добутку довжини волокна  $L_{(км)}$  на нормальне загасання кабелю  $M_C$  (дБ/км).

$$F_L = L_{(км)} * M_C \quad (1.10)$$

Визначається рівень потужності сигналу, що надходить у приймач на кінці волокна. Ця величина обчислюється шляхом вирахування з переданої у волокно потужності втрат на всій довжині кабелю.

Рівень прийнятого сигналу  $P_R$  (дБм) дорівнює різниці потужності передачі  $P_T$  (дБм), втрат волокна  $F_L$  (дБ), втрат конекторів  $L_T$  (дБ), втрат з'єднань  $L_S$  (дБ) та інших втрат  $L_O$  (дБ):

$$P_R = P_T - F_L - L_T - L_S - L_O \quad (1.11)$$

Важливою є перевірка того, що рівень сигналу, отриманого наприкінці ділянки волокна, не перевищує максимально припустимий для приймача рівень сигналу. Перевищення рівня може привести до роботи фотоприймача в режимі насичення, що приведе до можливого зниження його швидкодії. Ця величина обчислюється додаванням динамічного діапазону до чутливості приймача й порівнянням результату з рівнем прийнятого сигналу, який повинен бути менше отриманого результату.

Рівень прийнятого сигналу  $P_R$  (дБм) повинен бути меншим суми чутливості приймача  $S_R$  (дБм) та динамічного діапазону  $D_R$  (дБ):

$$P_R < S_R + D_R \quad (1.12)$$

Оптичний бюджет є основоположним фактором при проектуванні зв'язку для будь-якої волоконно-оптичної системи зв'язку, включаючи мережі PON. Постачальники послуг повинні ретельно керувати втратою потужності, спричиненою різними мережевими компонентами, щоб переконатися, що сигнал досягає приймача з достатньою потужністю для безпомилкового зв'язку.

Довжина оптичної лінії зв'язку відіграє вирішальну роль у процесі проектування. Втрата волокна, яка накопичується на великих відстанях, може значно знизити силу оптичного сигналу. Постачальники інтернет-послуг повинні переконатися, що оптичний бюджет достатній для покриття необхідної відстані без перевищення порогу чутливості приймача. Мережі PON зазвичай мають максимальний радіус дії приблизно від 20 км до 40 км, залежно від типу волокна та конфігурації мережі.

Проектування волоконно-оптичної лінії зв'язку також передбачає включення запасу надійності для врахування непередбачених факторів, таких як коливання температури, старіння компонентів або незначні зміщення в роз'ємах. Типовий запас безпеки може коливатися від 3 до 6 дБ залежно від вимог до надійності системи [19].

Постачальники послуг повинні забезпечити підтримку співвідношення сигнал/шум (SNR) у всій мережі. Надмірна втрата потужності може призвести до збільшення частоти бітових помилок (BER), погіршуючи якість передачі даних. Оптичний бюджет допомагає визначити, чи потрібні підсилювачі сигналу чи повторювачі, особливо в міжміських з'єднаннях.

Оптимізація оптичного бюджету має важливе значення для забезпечення ефективної роботи мереж GPON, одночасно підтримуючи бажану кількість користувачів на необхідній відстані. Мінімізація втрат у роз'ємах і з'єднаннях є важливою для оптимізації оптичного бюджету. Правильно вирівняні та очищені з'єднувачі можуть значно зменшити втрати, тоді як високоякісні методи зварювання можуть звести втрати під час з'єднання до мінімуму. Регулярне технічне обслуговування та моніторинг мережі також допомагають утримувати ці втрати під контролем, запобігаючи погіршенню загального оптичного бюджету.

## 1.8 Вплив факторів монтажних та будівельних робіт на якісні показники фізичних параметрів ВОЛЗ

З метою запобігання проблеми погіршення загального оптичного бюджету, важливе значення має й відношення до монтажних робіт при будівництві ліній. Далі буде наведено порядок дій і особливості монтажу оптоволоконного кабелю.

До початку монтажу необхідно оглянути барабани з кабелем на предмет ушкоджень, вм'ятин, подряпин та інших дефектів. При будь-якій підозрі кабель рекомендується відразу відкласти убік для подальшого детального вивчення або відбракування. Короткі шматки (менше 2 км) на безперервність волокна можна перевірити шляхом просвічення спеціальним оптичним приладом – візуальним детектором несправностей, що дозволяє візуально визначати дефекти й обриви волокон кабелю. На рисунку 1.11 приводиться зображення такого приладу.





Рисунок 1.11 – Візуальний детектор несправностей [52]

Наступним кроком виконується дослідження оптичної лінії на предмет потенційних проблем (гострі кути, забиті кабельні канали тощо). При наявності певних проблем, вони вносяться в маршрут зміни для мінімізації ризиків.

Розподіл кабелю по маршруту виконується таким чином, щоб точки з'єднання й установки оптичних муфт перебували в доступних, але захищених від несприятливих факторів місцях. Важливо, щоб у місцях майбутніх з'єднань залишався достатній запас кабелю. Відкриті кінці кабелю повинні бути захищені водонепроникними ковпаками. Для мінімізації напруги на вигин і ушкоджень від проїжджаючого транспорту використовуються труби. На обох кінцях кабельної лінії залишається частина кабелю, довжина якого залежить від запланованої конфігурації.

Під час прокладання кабелю під землею його додатково необхідно захистити від ушкоджень у локальних точках навантаження, таких як контакт із неоднорідним матеріалом засипання та нерівностями траншеї. Для цього кабель у траншеї укладається на шар піску 50-150 см і зверху засипається таким же шаром піску 50-150 см. Дно траншеї повинне бути рівним, без виступів, а при закопуванні видаляється каміння та інші сторонні предмети, які можуть ушкодити кабель. Слід зазначити, що ушкодження кабелю можуть виникнути як відразу, так і в процесі експлуатації (уже після засипання кабелю), наприклад від постійного тиску – не прибраний камінь може поступово продавити кабель. Роботи з діагностики, пошуку й усуненню несправностей уже закопаного кабелю будуть коштувати набагато дорожче, а тому критично важливим є обережність та дотримання запобіжних заходів під час монтажу. Глибина траншеї залежить від типу ґрунту й очікуваного навантаження на поверхні. У твердій породі глибина складе 30 см, у м'якій або під дорогою – 1 м. Рекомендована глибина становить 40-60 см, при товщині піщаної підстилки від 10 до 30 см.

Найчастіше застосовується укладання кабелю в траншею або в лоток прямо з барабана. Під час монтажу протяжних оптичних ліній, барабан розміщуються на транспортний засіб, і у міру просування машини кабель укладається на своє місце. Цей процес виконується помірно, але без поспіху – темп і порядок розмотування барабана регулюється вручну.

При укладанні кабелю в лоток критично важливим є не перевищувати максимальний радіус вигину й механічного навантаження. Кабель слід укласти в одній площині, не створювати точок зосереджених навантажень, уникати на трасі різких кутів, тиску й перетинання з іншими кабелями й трасами, не згинати кабель.

Протягання оптоволоконного кабелю через кабельні канали аналогічне протягання будь-якого іншого кабелю, але не рекомендується додавати зайвих фізичних зусиль і порушувати специфікації виробника. При використанні скоб і хомутів варто пам'ятати, що навантаження повинно прикладатися не на зовнішню оболонку кабелю, а на силову конструкцію. Для зменшення тертя можна використовувати тальк або гранули з полістиролу. Із приводу застосування інших змащень необхідно консультиватися з виробником.

У випадках, якщо кабель уже має кінцеве закладення, під час його монтажу важливо не ушкодити роз'єми, не забруднити їх і не піддавати надмірному навантаженню в зоні з'єднання.

Після укладання кабель у лотку закріплюється нейлоновими стяжками, при чому він не повинен сповзати або провисати. Якщо особливості поверхні не дозволяють використовувати спеціальні кабельні кріплення, є можливим застосування хомутів, але з особливою обережністю, щоб не ушкодити кабель. Рекомендується застосування хомутів із пластиковим захисним шаром, при чому для кожного кабелю слід використовувати окремий хомут. Не рекомендується стягати разом кілька кабелів. Між кінцевими точками кріплення кабелю залишається невелике послаблення, без надлишкового натягу, інакше можливі його ушкодження через коливання температури й вібрації.

Якщо під час монтажу оптоволоконний кабель був ушкоджений, ця частина позначається відповідним чином і залишається достатній запас кабелю для наступного зрощування.

Найважливішим технологічним етапом під час прокладання оптоволоконного кабелю є зрощування оптичного волокна, яке повинно відповідати вимогам надійної експлуатації ВОЛЗ. Експлуатаційна надійність місць стику оптичного волокна має бути не нижчою, ніж у самого волокна. Тому з'єднання повинне забезпечувати достатню механічну міцність. Важливо мінімізувати ймовірність дефектів, що можуть виникнути при підготовці та зрощуванні кінців волокна. Навіть незначні дефекти, які на початковому етапі не погіршують оптичні характеристики, з часом можуть призвести до втомного руйнування волокна в місцях з'єднання під час експлуатації ВОЛЗ.

Якість стикування оптичного волокна визначається рівнем внесеного загасання (втрат потужності оптичного сигналу). Величина цих втрат залежить від параметрів з'єднаних волокон та обраної технології зрощування. Основними факторами, що впливають на втрати, є:

- геометричні параметри волокон (діаметр серцевини);
- числова апертура та її відхилення;
- профіль показника заломлення.

Додаткові втрати можуть виникати через наявність зазору між торцями волокон, осьовий або кутовий зсув, деформацію серцевини при зварюванні, забруднення торців, утворення газових пухирців, а також низьку якість обробки

					КНУ.РМ.123.24.06.01.ОСОСІПП	Арк.
Арк.	№ документа	Підпис	Дата			

кінців оптичного волокна.

Варіанти дефектів, що можуть впливати на величину втрат у місцях стику оптичного волокна, наведено на рисунку 1.12.



Рисунок 1.12 – Результат зведення різних типів волокна

Для вирішення проблеми, пов'язаної зі зміщенням сердцевини оптоволокон, важливим є ретельний вибір автоматичного апарата для зрощування цього волокна.

Під час зварювання одномодового оптоволокон слід забезпечити мінімальні значення осьового та кутового зсувів. Наприклад, осьовий зсув для одномодових волокон не повинен перевищувати 0,1 мкм. Це обумовлено тим, що сили поверхневого натягу не здатні забезпечити точну юстування для волокон із діаметром сердцевини 6–10 мкм. Ручне юстування з такими точними допусками є неможливим. Тому для зварювання одномодового волокна використовуються автоматичні системи юстування, оснащені мікродвигунами, системою контролю якості юстування та електронним блоком керування.

Основна складність процесу зварювання оптоволокон полягає у точному зведенні волокон у трьох площинах (рисунок 1.13). Важливо досягти не лише збігу оболонок волокон, а й точного співпадання їхніх сердцевин. Саме по сердцевині передається світловий інформаційний сигнал, а будь-яке розходження сердцевин у місці з'єднання призводить до втрат оптичного сигналу. Частина сигналу потрапляє в оболонку волокна, де або загасає, або виходить у навколишній простір. Саме через це у місцях з'єднання оптичних волокон виникають втрати потужності оптичного сигналу.

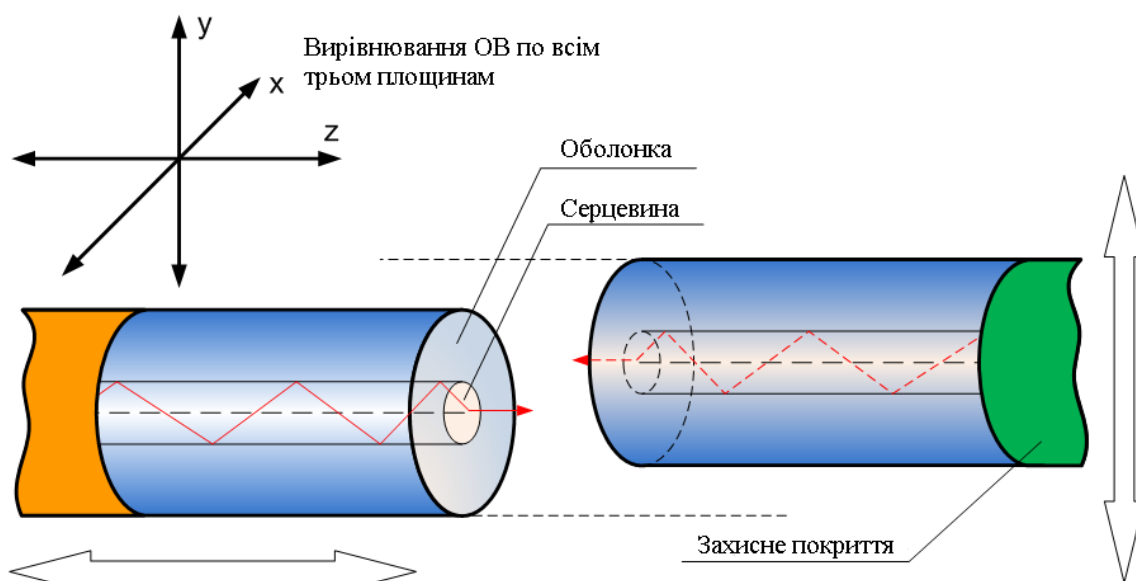


Рисунок 1.13 – Зведення оптичного волокна у всіх трьох площинах [53]

На сьогоднішній день розроблено 4 основних принципи вирівнювання оптичного волокна з різними модифікаціями. У різних джерелах ці методи називаються по-різному, але їх принцип дії той самий. Варто відзначити, що на українському ринку зустрічаються лише апарати, що працюють тільки по двом технологіям: по методу вирівнювання по V-образній канавці та по методу вирівнювання по профілю показника заломлення (метод PAS).

Окрім зазначених методів, існує метод LID, який ґрунтується на введенні випромінювання в одне оптоволокно та подальшому його детектуванні в іншому волокні. Також застосовується метод юстування на основі тепловізійних зображень (метод RTC). Метод LID був спочатку винайдений компанією Siemens, але згодом права на нього придбала компанія Corning. Тому даний метод активно використовується в американських зварювальних апаратах цієї фірми. Крім того, існує спрощений варіант методу PAS – L-PAS (Lens Profile Alignment System), який застосовується в тих самих апаратах для попереднього грубого вирівнювання оптичного волокна.

Більш досконалим з конструктивної точки зору є метод вирівнювання по оболонці в V-подібній канавці. Він не потребує великої кількості крокових двигунів для переміщення оптичного волокна у всіх чотирьох площинах і не вимагає комплексної системи управління ними. Через це метод вважається пасивним. Зварювальні апарати, в яких застосований цей спосіб юстування, широко використовуються сьогодні. Вони є оптимальним рішенням у ситуаціях, де немає жорстких вимог до рівня внесених втрат у місцях з'єднання волокон.

В основі методу лежить мета розташування двох волокон у точно вирівняних V-подібних канавках, де вони надійно фіксуються (рисунок 1.14).

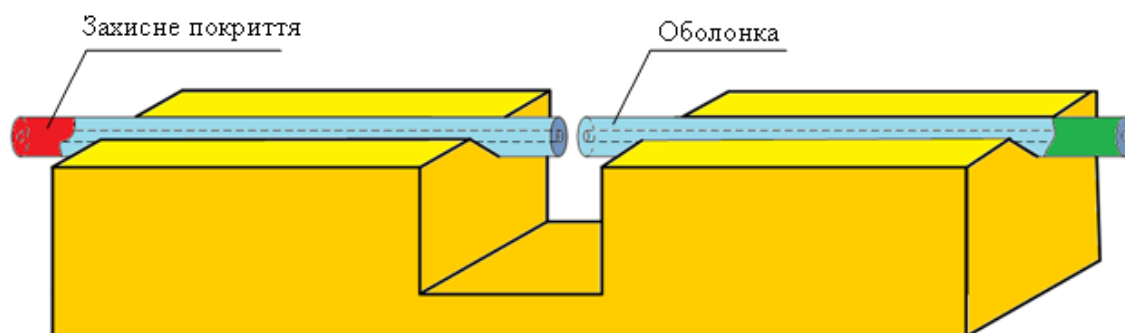


Рисунок 1.14 – Метод вирівнювання по оболонці у V-образній канавці [64]

Оскільки канавки по висоті перебувають на одному рівні, два встановлені в них волокна стають також на одному рівні. Оптичні волокна переміщуються ближче одне до одного та сплавлюються. Однак при такому методі зрощування зменшується якість з'єднання. По-перше, не гарантується, що волокна розмістяться рівно, якщо в V-образну канавку потраплять забруднення від процесу підготовки волокон до зрощування (залишки захисного покриття волокна, гідрофоб, пил, ворсинки тощо). По-друге, канавки вирівнюють волокна, однак збіг волокон по оболонці не гарантує точного збігу їх серцевин. Це пояснюється тим, що при виробництві оптичного волокна, як і будь-якому іншому виробництві, існують допуски на нормативні значення (таблиця 1.1). Крім того, розбіжність серцевин відбувається внаслідок ексцентриситету й некруглості оболонки.

Таблиця 1.1 – Параметри одномодового волокна згідно з рекомендацією G.652 [11]

Параметр	Величина	
Діаметр серцевини	Діапазон номінальних значень	8,6-9,5 мкм
	Допуск	$\pm 0,6$ мкм
Діаметр оболонки	Номінальне значення	125 мкм
	Допуск	$\pm 1$ мкм
Ексцентриситет	Максимальне значення	0.6 мкм
Некруглість оболонки	Максимальне значення	1.0 %

З огляду на вищезазначені фактори, середні втрати на звареному з'єднанні для одномодових волокон (при використанні цього методу вирівнювання) складають близько 0,05 дБ. Зварювальні апарати цього класу зазвичай використовуються тоді, коли немає підвищених вимог до рівня внесених втрат у місці з'єднання, а придбання більш функціонального та дорогого обладнання є економічно недоцільним.

Метод вирівнювання по профілю показника заломлення (PAS) можна віднести до третього покоління методів вирівнювання, оскільки він з'явився після методу V-образних канавок і методу LID. Даний метод ставиться до класу методів вирівнювання по серцевині. На сьогоднішній день цей метод є найпоширенішим завдяки своїй надійності і, у той же час, простоті роботи.

Проблема юстування оптоволоконна по серцевині, головним чином, полягає в тому, щоб розпізнати цю серцевину. У наслідок практично однакових показників переломлення оболонка й серцевина будуть нерозрізнені під мікроскопом. Якщо безпосередньо серцевина волокна візуально не відрізняється від оболонки, то розділити їх можна тільки по показнику заломлення. За рахунок законів заломлення та сферичної поверхні лінзи усі падаючі на неї промені світла зводяться в одну точку – фокус лінзи. За своєю сутністю, оптичне волокно являє собою скляний циліндр, тому якщо розташувати джерело світла збоку від волокна, то його можна представити як двоопуклу лінзу. В результаті цього впливає, що серцевина – це одна лінза з показником заломлення  $N_1$ , а оболонка – інша лінза з показником заломлення  $N_2$ . Тобто світло, проходячи через оболонку й серцевину, буде заломлюватися по-різному. Далі за допомогою фотоприймача можна отримати деяке зображення розподілу інтенсивності світла (заломлених променів, що пройшли через оптичне волокно) у просторі. На такому зображенні в області серцевини інтенсивність світла буде більшою, а в області оболонки – меншою (рисунок 1.15). Саме це зображення виводиться на екрані зварювального апарата.

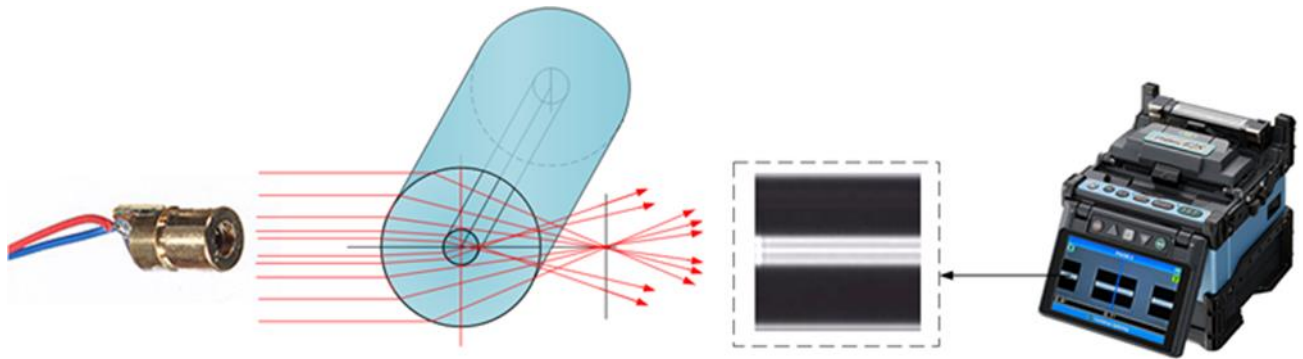


Рисунок 1.15 – Метод вирівнювання по профілю показника заломлення [65]

Отже, для запобігання погіршенню загального оптичного бюджету необхідно приділяти особливу увагу якісному виконанню монтажних робіт під час будівництва оптоволоконних ліній. Дотримання правил монтажу, зварювання, врахування характеристик кабелю та умов його прокладання дозволяють мінімізувати втрати сигналу, забезпечуючи стабільну і якісну роботу мережі. Точне виконання кожного етапу установки, починаючи від планування маршруту до завершення підключення обладнання, забезпечує більш тривалий термін служби лінії та збереження оптичного бюджету.

### 1.9 Огляд діючого технічного рішення мережі GPON

В рамках дослідження було розглянуто дві існуючі GPON-гілки різної протяжності, проведені від ISP «Претчер».

«Коротка» мережева гілка має довжину близько 500 метрів від передавача OLT в ПП «Претчер» (Ватутіна, 31) до першого дільника на вулиці Кропивницького. На рисунку 1.16 наведено схему розподілу оптичної потужності на цій гілці.

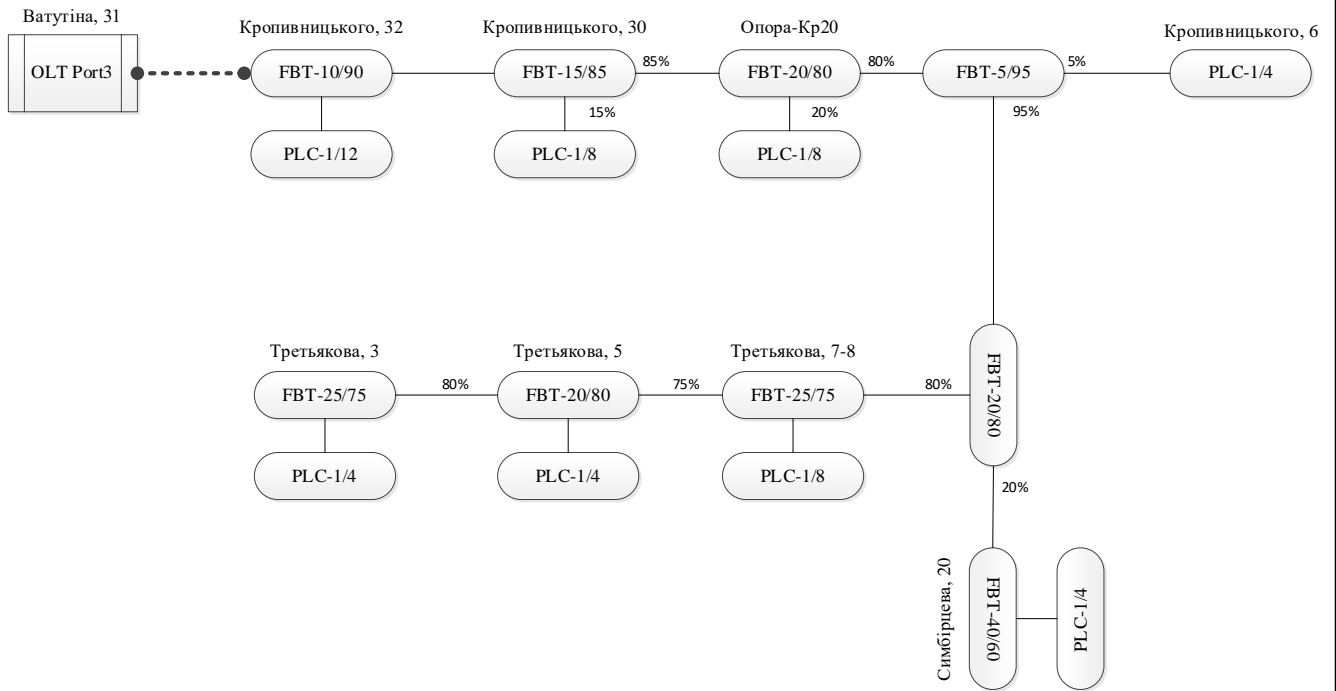


Рисунок 1.16 – Схема розподілу оптичної потужності «короткої» гілки «Довга» оптоволоконна гілка має довжину близько 4500 метрів від передавача OLT в ПП «Претчер» (Ватутіна, 31) до першого діляника на вулиці Тимірязєва. Схему цієї гілки наведено на рисунку 1.17.

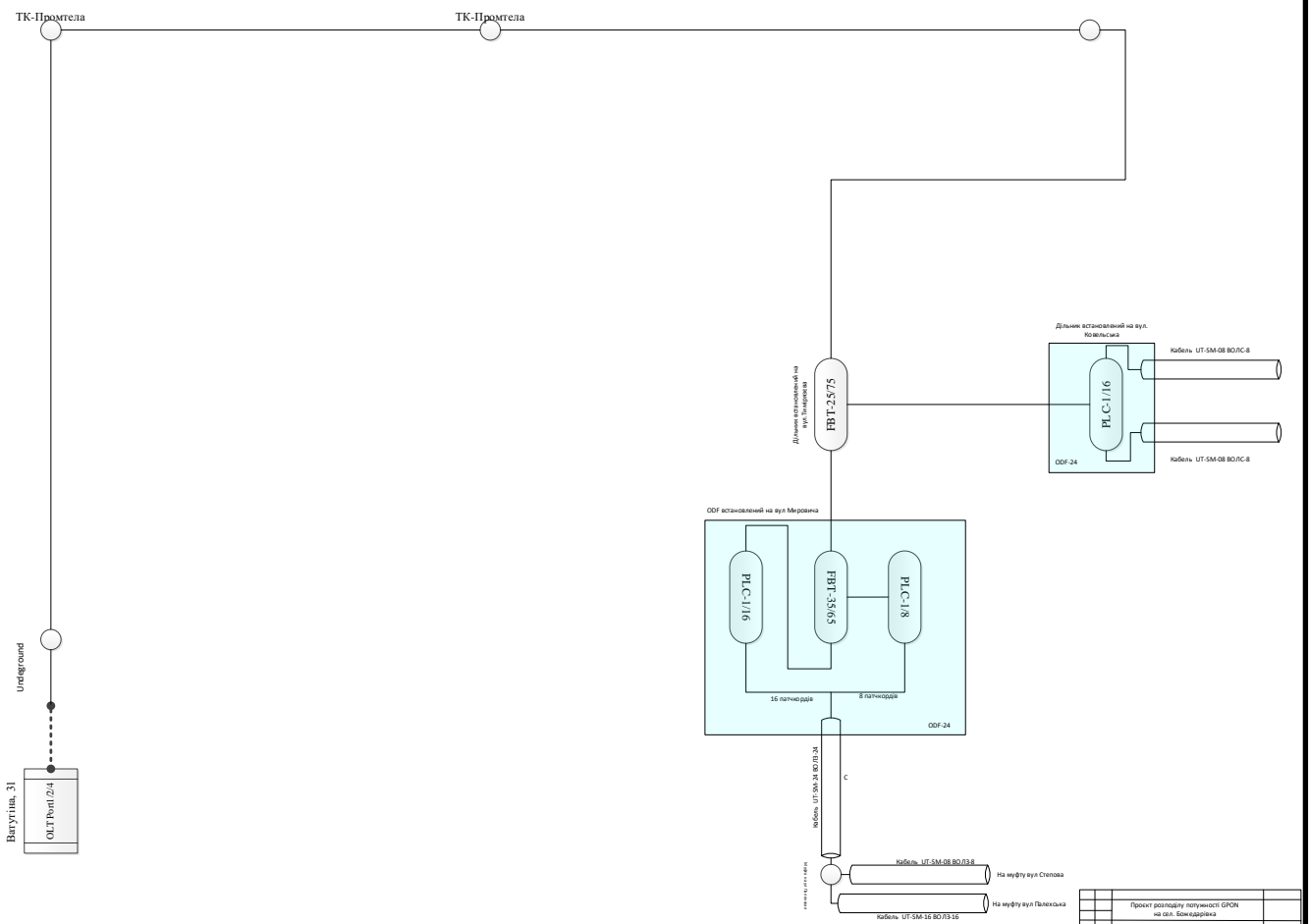


Рисунок 1.17 – Схема розподілу оптичної потужності «довгої» гілки



Для рівномірного розподілу оптичної потужності в обох гілках використані FBT-дільники від 5/95 до 40/60 та PLC-розгалужувачі 1/4, 1/8 та 1/16.

Зварні дільники виготовляються за технологією FBT (Fused Biconical Taper) – це коли два оптоволокна з видаленою зовнішньою оболонкою сплавляються у елемент з двома входами і двома виходами. Потім один з входів відсікається і закривається матеріалами, що запобігають відбиттю сигналу, в результаті створюючи розгалужувачі типу 1/2. У результаті потужність сигналу на виходах дільника розподіляється у певних пропорціях відносно вхідного сигналу, найчастіше 50% на 50%. Можливий також інший розподіл, наприклад, 20/80, де 20% потужності надходить на одне плече, а 80% – на інше.

Зварні дільники можуть підтримувати одне, два або три вікна прозорості (1310 нм, 1490 нм або 1550 нм). При чому, вікно прозорості – це певний діапазон довжин хвиль, у якому загасання сигналу у волокні є мінімальним порівняно з іншими діапазонами. Такі розгалужувачі широко застосовуються для побудови GPON-мереж, що лінії яких підтримують кабельне телебачення [62].

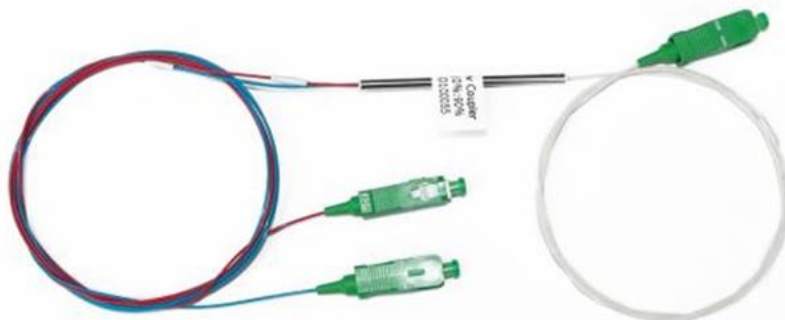


Рисунок 1.18 – Дільник оптичний IPCOM COUPLER FBT 1x2 1310/1550-25/75-0-SC/APC [54]

В FBT використовується ефект тунелювання: перетікання частини оптичної потужності з одного світловода в іншу через бокову поверхню при їх щільному з'єднанні на певній ділянці взаємозв'язку [61].

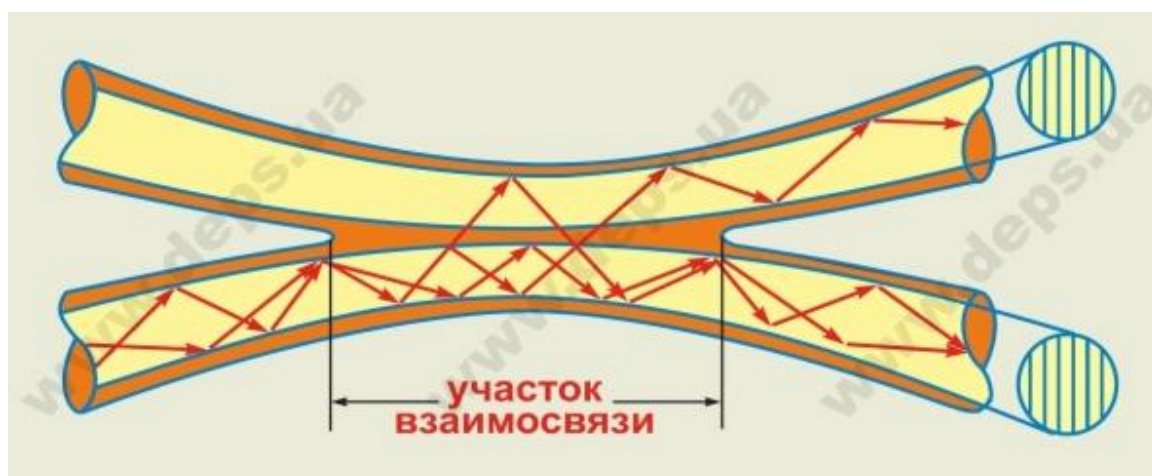


Рисунок 1.19 – Технологія сплавлення оптичного волокна FBT [61]



Планарні розгалужувачі PLC (Planar Lightwave Circuit) створюються поетапно. Спочатку на підкладку накладається відбивний шар-оболонка. Далі на нього додається матеріал хвилеводу – скло, після чого виконується формування маски для витравлення. У результаті витравлення створюється система хвилеводів, яка виконує функцію оптичного дільника. Потім система хвилеводів покривається другим відбивним шаром-оболонкою. До створених планарних хвилеводів методом зварювання приєднуються пігтейли, а результуючий пристрій розміщується в пластиковий або металевий корпус. Створення визначеної кількості виходів у PLC-сплітерах досягається шляхом комбінації дільників 1/2. Завдяки планарній технології вдається створювати компактні та довговічні розгалужувачі з кількістю виходів до 64. Такі розгалужувачі забезпечують стабільний та точний розподіл сигналу на виходах, можуть працювати у широкому діапазоні хвиль від 1260 нм до 1650 нм та видають менше загасання на кожен порт, якщо порівнювати з FBT-дільниками при коефіцієнті поділу більше двох [61].

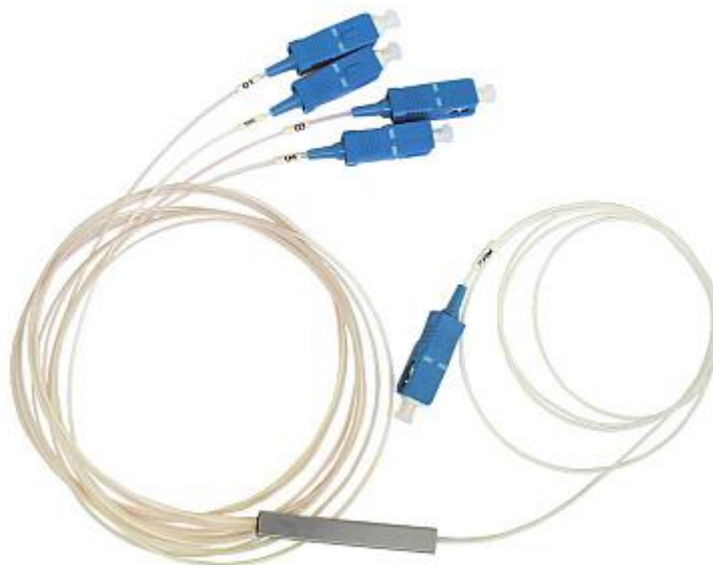


Рисунок 1.20– PLC спліттер 1x4, SC/UPC [21]

Таким чином, планарні дільники зазвичай рівноплечі за показниками згасань після поділу і ділять вхідний сигнал на  $2N$  вихідних «хвостів» (наприклад, 1x2, 1x4, 1x64). Зварні ж бувають 1x2 і мають нерівноплечі згасання на вихідних «хвостах», (зварні дільники с кількістю виводів, відмінною від 2 – це результат комбінації дільників 1x2 із співвідношенням вихідної потужності від 1/99 до 50/50). Зварні дільники з кількістю хвостів більше ніж 1x4 використовуються рідко, тому що мають нерівномірні загасання на виходах, що не піддаються статистиці [62].

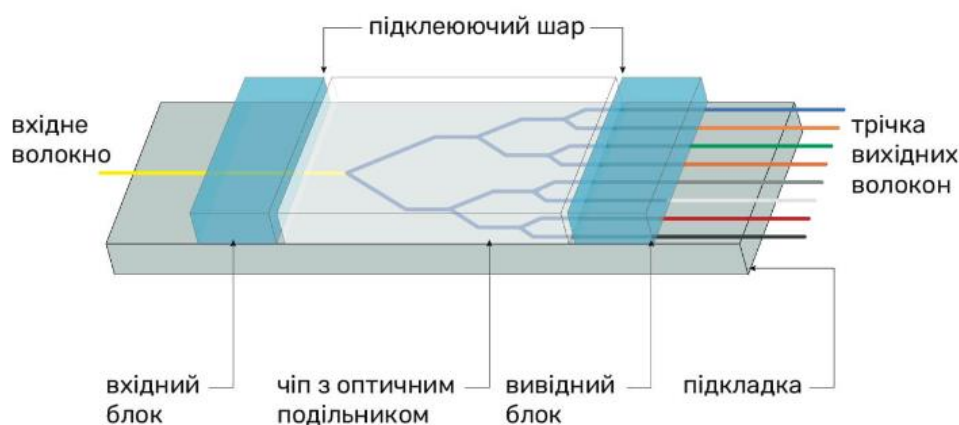


Рисунок 1.21 – Загальна конструкція оптичних дільників PLC [59]

Нижче наведено таблиці усереднених загасань для планарних та зварних дільників.

Таблиця 1.2 – Усереднені загасання на виходах FBT дільників (без урахування конекторів) [62]

Дільник X/Y	Загасання X, dB	Загасання Y, dB
FBT 5/95	13,7	0,32
FBT 10/90	10,08	0,49
FBT 15/85	8,16	0,76
FBT 20/80	7,11	1,06
FBT 25/75	6,29	1,42
FBT 30/70	5,39	1,56
FBT 35/65	4,56	1,93
FBT 40/60	4,01	2,34
FBT 45/55	3,73	2,71
FBT 50/50	3,17	3,19

Таблиця 1.3 – Усереднені загасання на виходах PLC дільників (без урахування конекторів) [62]

Дільник 1xN	Загасання на кожному виході, dB
PLC 1x8	10,7
PLC 1x4	7,4
PLC 1x2	4,3
PLC 1x16	13,9
PLC 1x32	17,2
PLC 1x64	21,5

Окрім загасання на дільниках, є також втрати на конекторах, що визначаються типом полірування. Основними типами полірування наконечників з'єднувача є UPC і APC. UPC означає Ultra Physical Contact. Сучасна тенденція

полягає в тому, що цей тип конектора використовується тоді, коли операторам необхідно виконувати тестування мереж, наприклад, за допомогою OTDR. APC розшифровується як Angled Physical Contact. APC є найбільш використовуваним типом полірування в даний час. Торці роз'ємів APC скошені, тому зворотні втрати роз'ємів APC зазвичай менші, ніж роз'ємів UPC. Конектори UPC сині, а APC – зелені. Зворотні втрати UPC зазвичай становлять -55 дБ (або вище), втрати APC становлять -65 дБ [36].

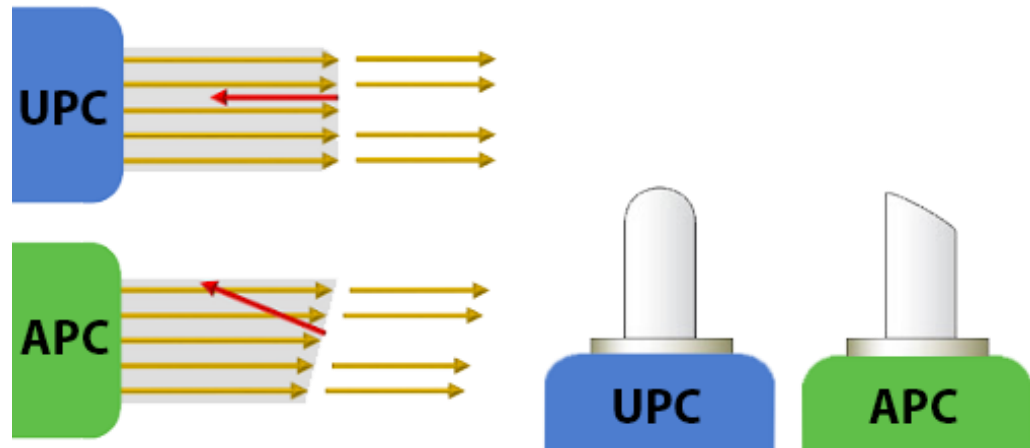


Рисунок 1.22 – Різниця між UPC та APC конекторами [36]

Різні стилі полірування визначають якість оптичного волокна, що призводить до різних характеристик щодо внесених і зворотних втрат роз'єму. Внесені втрати стосуються втрати сигналу, спричиненої роз'ємом або кабелем. Загалом, типові внесені втрати роз'ємів PC, UPC і APC мають бути менше 0,3 дБ [36].

Хоча конектори APC мають менші зворотні втрати, вони також мають більше затухання сигналу. Саме тому UPC конектори є більш ефективними на довгих лініях ВОЛЗ. Зазвичай APC використовуються для GPON та кабельного телебачення, а UPC – без кабельного, через більшу кількість зворотних відображень.

### 1.10 Огляд використаного активного мережевого обладнання

Як було описано у розділі 1.4, до активного мережевого обладнання в технології GPON відносяться OLT, ONU, а також SFP-трансивери.

Термінал оптичної лінії (OLT) виступає в якості кінцевого апаратного пристрою в пасивній оптичній мережі. OLT містить центральний процесор (CPU), PON-карти, маршрутизатор-шлюз (GWR) і висхідні карти голосового шлюзу (VGW). Цей мережевий пристрій використовує SFP-трансивери для роботи з оптичними сигналами. Один сигнал може обслуговувати до 128 ONU на відстані до 20 кілометрів за допомогою відповідних оптичних розгалужувачів [3].

OLT регулює та оброблює оптичні сигнали з ONU, ініціює та контролює процес визначення дальності і зберігає цю інформацію. OLT забезпечує:

- Засоби обробки наступних кадрів для прийому та перетворення комірки асинхронного режиму передачі для створення наступного кадру, а також перетворення паралельних даних наступного кадру в послідовні дані.

- Засоби мультиплексування з поділом по довжині хвилі для виконання електро/оптичного перетворення послідовних даних наступного кадру та їх мультиплексування з поділом по довжині хвилі.

- Засоби обробки висхідного кадру для вилучення даних із засобу мультиплексування з поділом по довжині хвилі, пошуку верхнього поля, окреслення межі слоту та обробки комірки адміністрування, а також обслуговування операцій фізичного рівня (PLOAM) та розділеного слоту окремо.

- Засоби генерації керуючих сигналів для виконання протоколу керування доступом до середовища (MAC) та генерування змінних і сигналів синхронізації, що використовуються для засобів обробки кадрів.

- Засоби керування обробкою низхідних та висхідних кадрів і попередніми засобами обробки кадрів за допомогою змінних і сигналів синхронізації від засобу генерації керуючого сигналу [3].

OLT виконує дві основні функції:

- Перетворення стандартних сигналів, що використовуються постачальником послуг FiOS, на частоту і кадрову розкладку, що використовуються системою PON.

- Координація мультиплексування між конвертерами на оптичних мережевих терміналах (ONT), розташованих в приміщеннях клієнтів.

Як було зазначено вище, OLT виконує дві функції, і головною функцією є управління потоком інформації по оптичній розподільчій мережі (ODN) в обох напрямках. Максимальна відстань, що підтримується для передачі по ODN, становить 20 км. OLT має два напрямки руху: висхідний (отримання від користувачів різних типів даних і голосового трафіку) і низхідний (отримання даних, голосового і відео трафіку з мережі і відправка його на всі модулі ONT в ODN) [3].

У якості центрального вузла для обслуговування описаних мережевих гілок, в ISP «Претчер» використовується OLT ZTE ZXA10 C320.

ZTE ZXA10 C320 – це оптичний лінійний термінал агрегації з модульною конструкцією, що забезпечує компактність і функціональність для підключення до 4096 абонентів за технологією GPON. Висока щільність підключень досягається завдяки підтримці двох сервісних плат, які можуть мати від 8 до 16 портів кожна. Модульний дизайн пристрою дозволяє легко інтегрувати його в існуючі мережі провайдерів незалежно від їхньої архітектури [58].



Рисунок 1.23 – OLT ZTE ZXA10 C320 [58]

					КНУ.РМ.123.24.06.01.ОСОСІПІ	Арк.
Арк.	№ документа	Підпис	Дата			

### Основні характеристики ZTE ZXА10 С320:

- Висота 2U, горизонтальне розміщення карт, фронтальний доступ.
- Шасі для монтажу в стандартну 19’’ стійку.
- Підключення по GPON: до 4096 абонентів, коефіцієнт ділення 1:128.
- Підключення по EPON: до 2048 абонентів, коефіцієнт ділення 1:64.
- Максимальна відстань передачі: 20 км.
- Швидкість передачі даних: 2.488 Gbps (Downstream), 1.244 Gbps (Upstream).
- 2 слоти під сервісні плати (GPON/EPON/P2P).
- Підтримка модулів Class B+ і Class C+.
- Автентифікація ONU за SN (Serial number).
- Вхідна напруга: -48 VDC, діапазон від -38.4 V до -72 V.
- Підтримка АС-DC живлення.
- Контроль пропускної спроможності ONU, підтримка DBA та SLA.
- Мережева безпека: AES128 шифрування, ізоляція портів, потоковий ACL.
- Гаряча заміна SFP модулів.
- Стандарти: ITU-T G.984/G.988, IEEE 802.1D, 802.1Q, 802.1w, 802.3ad (LACP) [58].

Модулі SFP (Small Form-factor Pluggable) – це взаємозамінні оптичні модулі, що використовуються у мережевих пристроях і підтримують різні стандарти волоконно-оптичного зв'язку. Модулі SFP – це універсальні оптичні модулі, сумісні як з одномодовими, так і з багатомодовими волокнами. Вони зазвичай використовуються для підключення комутаторів, маршрутизаторів та інших мережевих пристроїв, забезпечуючи високошвидкісний оптоволоконний зв'язок. Ключовою особливістю SFP-модулів є можливість їх гарячої заміни, що дозволяє користувачам замінювати різні типи SFP-модулів за необхідності для задоволення різних мережевих вимог. Як правило, при виборі SFP-модуля враховуються такі фактори, як швидкість, одноволоконний двонаправлений або двоволоконний тип і відстань передачі [44].

GPON SFP – це двонаправлений одноволоконний оптичний трансивер з роз'ємом SC або APC, який може забезпечити пропускну здатність 2,5 Гбіт/с. Він може надавати послуги кінцевим користувачам у режимі «точка-багато точок». У порівнянні з ранніми версіями GPON, які потребували декількох зовнішніх пристроїв, форм-фактор SFP робить перехід на мережу GPON більш економічно вигідним та ефективним завдяки своїй конструкції «підключи і працюй». Існують модулі GPON OLT SFP, встановлені в центральному офісі, і модулі GPON ONU SFP, встановлені на стороні абонентів [44].

GPON OLT SFP-модулі використовуються в пристроях оптичних лінійних терміналів (OLT). OLT служать передавальним обладнанням у волоконно-оптичному зв'язку, відповідаючи за передачу даних користувача в волоконно-оптичну мережу. OLT SFP-модулі зазвичай використовуються для з'єднання OLT-пристроїв з користувацьким оптоволоконним зв'язком. Класифікація цих модулів включає різні швидкості та відстані передачі для задоволення різноманітних потреб мережевої архітектури. Для різних видів OLT доступні різні типи OLT SFP

модулів, наприклад, GPON OLT з опціями OLT SFP C+/C++/C+++ та EPON OLT з опціями OLT SFP PX20+/PX20++ [44]

SFP-модуль GPON ONU – це двонаправлений одномодовий SFP-модуль з симплексним роз'ємом SC. У мережах GPON SFP-трансивери ONU забезпечують фізичне з'єднання між абонентським приміщенням і центральним офісом магістралі OLT. При підключенні до обладнання з SFP-портами, такого як комутатори Ethernet, маршрутизатори, DSLAM або домашні шлюзи, трансивери SFP ONU можуть легко влаштовуватися в існуюче обладнання [1].

У якості SFP-трансиверів в розглянутій GPON-мережі використовуються оптичні трансивери класу C++ та C+++.

Модуль ZTE LTE3680P-BC-2DM OLT SFP GPON працює за принципом спектрального ущільнення каналів, що дозволяє здійснювати одночасну передачу та прийом даних через одне оптичне волокно. Передача сигналу виконується на довжині хвилі 1490 нм, а прийом — на 1310 нм. Завдяки підтримці функції гарячої заміни, модуль забезпечує високу гнучкість у використанні. Пристрій оснащений функцією цифрового моніторингу (DDM), яка дозволяє контролювати ключові параметри його роботи. LTE3680P-BC-2DM підтримує коефіцієнт розгалуження 1:128, що забезпечує можливість підключення до 128 абонентських пристроїв через оптичний спліттер. Пропускна здатність модуля досягає 1244 Мбіт/с (приймання) та 2488 Мбіт/с (передавання) [25].



Рисунок 1.24 – SFP OLT LTE3680P-BC-2DM CLASS C++ (-32dBm) GPON ZTE [25]

Характеристики зображеного SFT OLT GPON трансивера:

- Клас лазера: C++.
- Коефіцієнт розгалуження: 1:128.
- Чутливість оптичного приймача: -32 дБм.
- Довжина хвилі на передачу: 1490 нм.
- Довжина хвилі на прийом: 1310 нм.
- Технологія роботи: GPON.
- Швидкість прийому/передачі даних: 1.25/2.5 Gbps.
- Тип конектора: SC.
- Потужність оптичного передавача (мін/макс): +3 дБм / +7 дБм.
- Робоча відстань: до 20 км.
- Тип оптичного волокна: SM [25].



Модуль GPON OLT SFP класу C+++, що також використовується в мережі, сертифікований за стандартами ROHS, CE та ISO9001, відповідає найвищим міжнародним стандартам управління навколишнім середовищем та якістю. Завдяки швидкості передачі даних 2,5 Гбіт/с/1,25 Гбіт/с цей SFP-трансивер підтримує швидку і надійну передачу даних на відстань до 20 км. Він є сумісним з системами Huawei і ZTE [10].



Рисунок 1.25 – GPON OLT SFP модуль C+++ [10]

Характеристики зображеного SFT OLT трансивера:

- Модель: HL-GPON OLT C+++-20D.
- Виробник: Китай.
- Назва продукту: GPON OLT SFP module C+++.
- Сертифікація: RoHS/CE/ISO9001.
- Довжина хвилі: Tx1490nm/Rx1310nm.
- Робоча відстань: до 20 км.
- Тип оптичного волокна: SM.
- Потужність оптичного передавача: +7 дБм.
- Тип конектора: SC.
- Клас: C+++.
- Швидкість прийому/передачі даних: 1.25/2.5 Gbps [10].

Основною функцією ONU є перетворення оптичних сигналів, що передаються через оптоволокно, в електричні сигнали. Ці електричні сигнали потім передаються на окремі пристрої абонентів. Зазвичай між ONU та приміщенням кінцевого користувача присутня певна відстань, або частина мережі з іншим типом доступу. Крім того, ONU може передавати, об'єднувати та оптимізувати різні типи пакетів, отриманих від клієнтів, надсилаючи їх до OLT. Оптимізація передбачає реорганізацію потоку даних для підвищення ефективності доставки. ONU підтримує розподіл смуги пропускання, забезпечуючи безперебійну доставку пакетів даних до OLT, які зазвичай надходять від клієнта групами. В залежності від моделі ONU, користувацькі мережеві пристрої можна підключити до нього різними способами: через мідну виту пару, коаксіальний кабель, оптичне волокно або Wi-Fi [43].

У існуючій мережі наявні різновендорні абонентські термінали ONU. Одним з таких ONU є Picotel PU X910. ONU X910 сумісний із обладнанням OLT від таких виробників, як C-DATA, BDC, Huawei та ZTE. Для підключення абонентських пристроїв пристрій оснащений одним портом Gigabit Ethernet (10/100/1000 Mbps base-T) та одним оптичним портом SC/UPC. Пристрій автоматично адаптується до правильного режиму роботи залежно від типу мережі PON, до якої він підключений [49].



Рисунок 1.26 – Абонентський термінал ONU Picotel PU-X910 [49]

Основні характеристики абонентського терміналу PU-X910:

- Інтерфейс: 1 PON порт GPON.
- Стандарти відповідності: 802.3ah, ITU-T G.984.2, ITU-T G.984.5 Filter, FSAN Class B+, SFF-8472.
- Тип конектора: SC/UPC.
- Середовище передачі: оптоволоконний кабель SMF-9/125, G.652.
- Максимальна відстань: до 20 км.
- Характеристики передавача: довжина хвилі 1310 нм, DFB, швидкість передачі в Upstream Burst Mode 1244 Мбіт/с, середня потужність від +0,5 до +5 дБм, ширина спектральної лінії -20 дБ до 1 нм.
- Характеристики приймача: довжина хвилі 1490 нм, APD/TIA, режим CW, швидкість передачі 1244 Мбіт/с (EPON) або 2488 Мбіт/с (GPON).
- Чутливість приймача: -28 дБм із BER  $\leq 10^{(-10)}$ .
- Оптичне перевантаження приймача: -4 дБм.
- LAN-порт: 1 Ethernet порт 10/100/1000 Base-T (RJ-45).
- Функції безпеки: підтримка AES-шифрування, FEC-кодування, 802.3ah (EPON), ITU-T G.984.x (GPON), ITU-T G.988 (OMCI), IEEE 802.1D, IEEE 802.1Q, IEEE 802.1P.
- Параметри живлення: 12 В, 0,5 А [49].

Ще одним прикладом абонентського терміналу, що використовується в описаних GPON-мережах, є Tenda HG1.



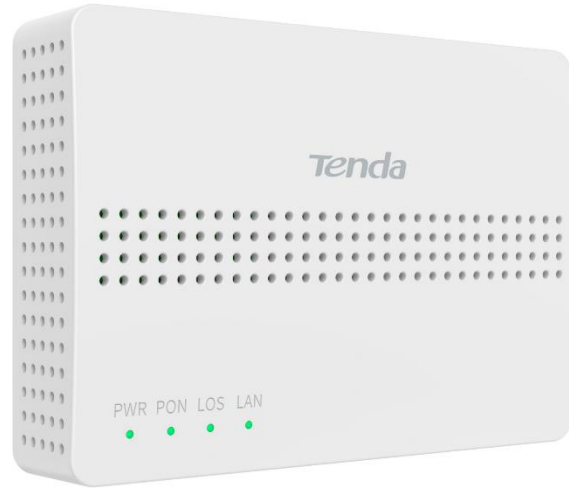


Рисунок 1.27 – Абонентський термінал TENDA HG1 [50]

Характеристики наведеного абонентського терміналу:

- Відповідає стандарту ITU-T G.984.
- Швидкість висхідного потоку до 1,25 Гбіт/с, швидкість низхідного потоку до 2,5 Гбіт/с.
- Тип конектора: SC/UPC.
- Максимальна дальність: 20 км.
- Широка сумісність з багатьма брендами OLT.
- Підтримка віддаленого керування OMCI та OAM.
- Підтримка режиму маршрутизації та мостового режиму доступу.
- Підтримка як IPV6, так і подвійних стеків IPV4/IPV6.
- Гігабітний порт LAN для забезпечення надвисокої швидкості передачі даних.
- Локальне вебуправління та оптичні монітори живлення [50].

Ще одним прикладом абонентського терміналу, що використовується в описаних мережах, є Huawei EchoLife HG8310M (рисунок 1.28).



Рисунок 1.28 – Абонентський термінал ONU Huawei EchoLife HG8310M [48]

Характеристики зображеного абонентського терміналу:

- 1 порт 10/100/1000 Мбіт/с (роз'єм RJ45).
- 1 порт GPON (роз'єм SC/UPC).
- Максимальна дальність: 20 км.
- Стандарти IEEE: 802.3, 802.3u, 802.1Q, 802.1p.
- Стандарти GPON: ITU-T G.984.1, G.984.2, G.984.3, G.984.4.
- Зовнішній блок живлення: 12 В постійна напруга / 0,5 А.
- Довжина хвилі: вхідна: 1490 нм, вихідна: 1310 нм.
- Оптичний модуль: Клас В+ (BOSA) для моделі ONU HG8310M, С+ (BOSA) для моделі ONU HG8310M+ [48].

### Висновки за розділом

У першому розділі було проведено всебічний огляд сучасних волоконно-оптичних систем, що використовуються для побудови телекомунікаційних мереж, розглянуто їхні переваги, проблематику, а також фактори, що впливають на якість і ефективність роботи таких мереж.

Аналіз фізичного рівня технології ВОЛЗ дозволив визначити основні принципи роботи оптичного волокна, а також поняття оптичного зворотного відбиття, включно з такими явищами, як релєївське розсіювання та френелівське відбиття. Було підкреслено ключові переваги ВОЛЗ у порівнянні з традиційними мідними системами, зокрема значно більшу пропускну здатність, низькі втрати сигналу, електромагнітну стійкість та довговічність волоконно-оптичного кабелю.

Було розглянуто різні типи мережевих інфраструктур відповідно до концепції FTTx. Було детально описано та порівняно їхню структуру, основні компоненти та їх функціональне призначення. З усіх описаних видів мережевих архітектур, FTTH (PON) є найбільш використовуваною сьогодні.

Саме тому детально описано компоненти пасивних оптичних мереж. Наведено структуру мережі, роль активного обладнання, таких як термінал оптичної лінії та абонентський мережевий пристрій, а також пасивних спліттерів. Було описано процес передачі даних, зокрема принципи технології мультиплексування з розділенням часу та мультиплексування за довжиною хвилі. У роботі було приділено увагу порівнянню фізичних та логічних рівнів технології GPON із її альтернативою – GEPON (EPON). Переваги GPON, такі як вища пропускну здатність, ефективність передачі даних завдяки використанню GEM-кадрів замість Ethernet-пакетів, а також оптимальні алгоритми пересилання даних у низхідному і висхідному напрямках, роблять її більш перспективною для побудови сучасних мереж.

У роботі було описано важливість оптичного бюджету в мережах PON і необхідність його перерахунку при побудові або модернізації оптоволоконних ліній. Було зазначено, що запас оптичної потужності є критично важливим для забезпечення стабільності мережі. Наведені фактори, що впливають на загальний оптичний бюджет: втрати у волокні, на конекторах, спліттерах та інші, а також алгоритм розрахунку рівня прийнятного сигналу. Було підкреслено важливість врахування факторів монтажних робіт, оскільки помилки під час прокладання

кабелю та з'єднання можуть значно зменшити якість сигналу.

У ході роботи було розглянуто існуючі технічні рішення GPON-мереж, реалізовані на базі двох ліній різної протяжності від інтернет-провайдера «Претчер». Було описано структуру реальних ліній, а також виконано огляд активного мережевого обладнання, що використано в цих лініях.

У якості центрального вузла для обслуговування описаних мережевих гілок, в ISP «Претчер» використовується OLT ZTE C320, SFP-трансивери класу C++ і C+++, абонентські термінали ONU таких виробників, як Picotel, Tenda та Huawei.

Таким чином, розділ окреслив основи функціонування сучасних оптоволоконних систем, їхні переваги, складнощі в експлуатації та ключові фактори, що впливають на якість зв'язку. Отримані висновки створюють базу для подальших досліджень, зокрема для вирішення задачі забезпечення надійності в GPON-мережі та збільшення кількості абонентів без втрати якості послуг.

					КНУ.РМ.123.24.06.01.ОСОСІПІ	Арк.
	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

## 2 ПРОБЛЕМАТИКА ЗБІЛЬШЕННЯ ОПТИЧНОГО БЮДЖЕТУ В МЕРЕЖАХ GPON

### 2.1 Способи тестування якості GPON-лінії зовнішніми вимірювальними приладами

Тестування будь-якої ВОЛЗ лінії і загального стану параметрів PON-гілки необхідно виконувати одразу після введення її в експлуатацію, тим самим порівнявши попередньо розраховані параметри з фактичними. Так само необхідно контролювати стан оптичної PON-гілки протягом усього періоду її експлуатації. Також із урахуванням того, що, наприклад, в ВОЛЗ на основі технології Ethernet у своєму мінімумі наявні два оптичних конектори, що можуть створювати оптичне відображення, то в PON-технології таких конекторів можуть налічуватись десятки. Таким чином, особливу увагу треба приділити тестуванню лінії на параметр рівня ORL.

Тестування ORL виконується після проведення робіт з інсталяції ВОЛЗ для перевірки якості роботи лінії. Звичайно досить проведення однобічного тестування лінії, але в деяких випадках при будівництві систем із двонаправленим трафіком, таких як FTTx (PON), CWDM або HFC, можуть знадобитися й двосторонні виміри.

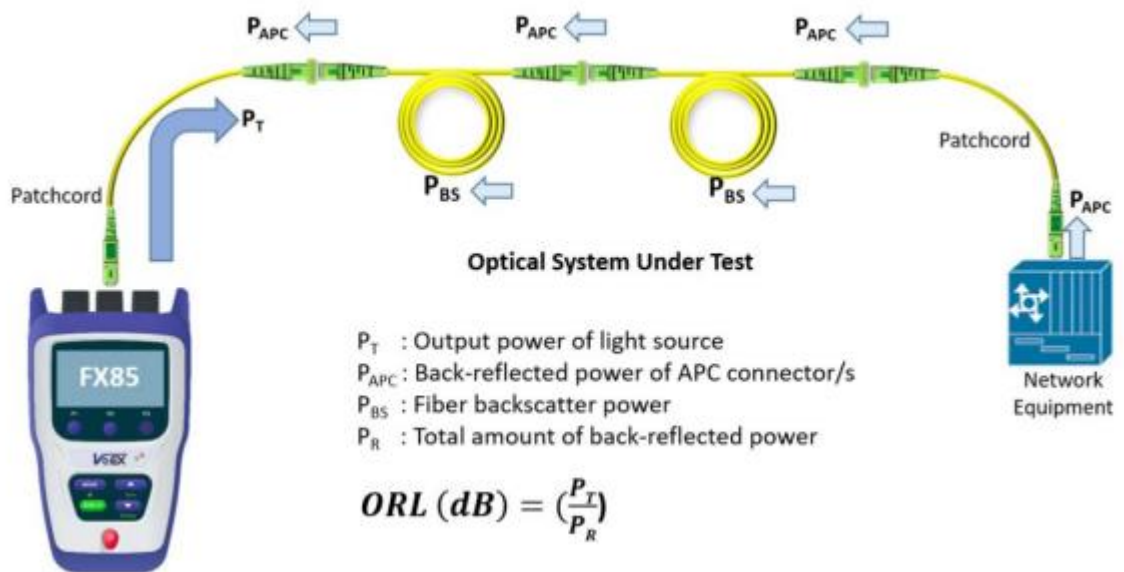


Рисунок 2.1 – Вимірювач ORL для тестування оптоволоконна, яке буде використовуватися в оптичній мережі [30]

ORL-тестер повинен підтримувати ті ж самі довжини хвиль, що й система передачі, і мати динамічний діапазон більший, ніж будь-яке можливе значення ORL. Для більшості варіантів використання достатнім є діапазон в 60 дБ.

					КНУ.РМ.123.24.06.02.ПЗОБМГ		
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата			
Розробив		Кондрашов			Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Чубаров					
Н.контроль		Кузнецов			КІ-23м		
Затвердив		Купін					
ПРОБЛЕМАТИКА ЗБІЛЬШЕННЯ ОПТИЧНОГО БЮДЖЕТУ В МЕРЕЖАХ GPON							

Існує кілька методик виміру ORL у ВОЛЗ. Найпоширеніші способи використання безперервного хвильового рефлектометра (OCWR або ORL-тестера) і оцінка зворотних втрат за допомогою імпульсного рефлектометра (OTDR).

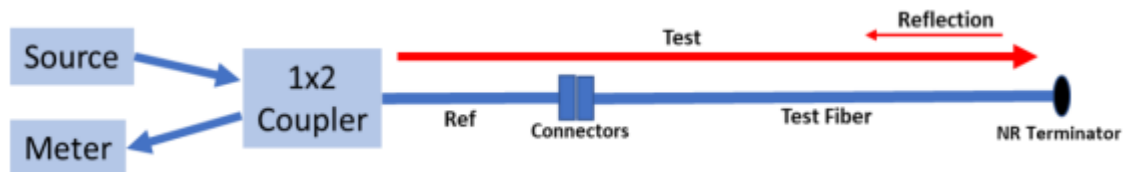


Рисунок 2.2 – Метод OCWR для вимірювання зворотних втрат конекторів або патч-кордів [30]

Звичайний OCWR складається із вбудованого оптичного лазерного випромінювача, вимірника потужності та пристрою підключення ОБ (coupler) і дозволяє тестувати повне ORL лінії від початку до кінця. Вимір ORL за допомогою OCWR складається із трьох етапів. Перші два необхідні для калібрування пристрою. При цьому виконується вимір випромінюваної приладом потужності, потім вимірюється потужність відбитого сигналу, безпосередньо перед підключенням з'єднувального кабелю. Калібровані етапи повинні виконуватися при кожному вимірі. Далі проводиться безпосередній вимір ORL об'єкта. Стандарт TIA/EIA-455-107A [32] описує два методи виміру зворотних втрат за допомогою OCWR – А і В. Їхня відмінність у тому, що метод А вимагає застосування двох детекторів оптичного сигналу, тоді як В тільки одного, тому другий метод більш розповсюджений, він і буде розглянутий більш докладно.

Спосіб виміру ORL методом OCWR (В) передбачає 4 етапи. Перший етап – визначення випромінюваної потужності передавача. ORL-тестер визначає рівень потужності передавача якому присвоюється статус опорного P0 (рисунок 2.3).

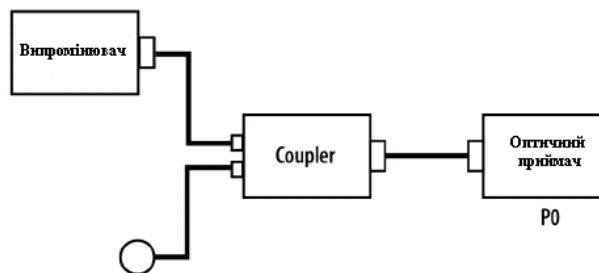


Рисунок 2.3 – Перевірка випромінювальної потужності передавача

Далі виконується попередній вимір відбитого сигналу. Цей етап тестування необхідний для компенсації зворотних втрат, внесених пристроєм підключення приладу й сполучним кабелем. Крім того, необхідно подбати про компенсацію додаткового відбиття від кінця сполучного кабелю. Для цього до нього підключають навантаження з малим рівнем зворотного розсіювання, що мають рівень ORL більший за 70 дБ (рисунок 2.4). Отриманий рівень ORL вважається опорним або «нульовим».

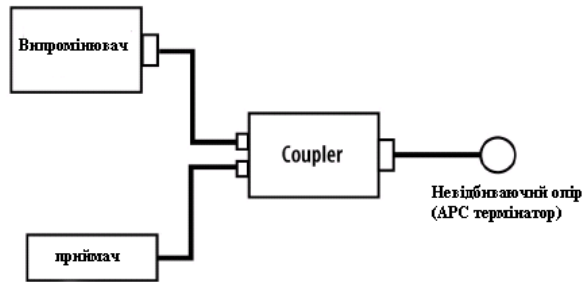


Рисунок 2.4 – Виконання опорного виміру

Після виконання опорних вимірів до ORL-метру під'єднується тестуюча лінія або ділянка ВОЛЗ, і проводиться вимір рівня зворотних втрат. При вимірі необхідно врахувати додатковий вплив відбиття переходу скло-повітря, що становить близько -14 дБ, на віддаленому кінці кабелю. У багатьох випадках для компенсації цього відбиття до кабелю необхідно підключити невідбиваючий обмежувач, наприклад APC-конектор (рисунок 2.5).

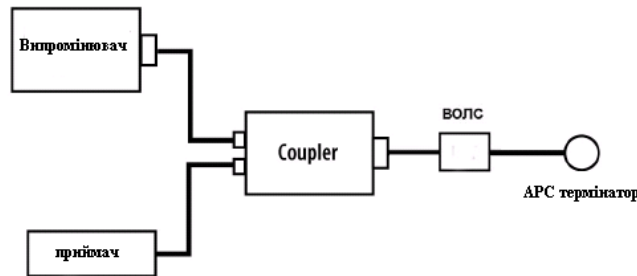


Рисунок 2.5 – Вимірювання ORL методом OCWR

Альтернативне рішення для виміру ORL припускає використання імпульсного оптичного рефлектометра (OTDR). Конструкція оптичного рефлектометра припускає наявність аналогічного OCWR джерела сигналу, приймача й пристрою підключення, але на відміну від ORL-метра основні активні елементи OTDR працюють в імпульсному режимі.

Як перевага на методом OCWR, метод OTDR може вимірювати зворотне релєйське розсіювання та френелівське відбиття окремо, дозволяючи OTDR визначати як загальний рівень ORL для тестованого волокна, так і конкретну подію відбиття, що робить цей метод ідеальним для виявлення несправностей в лінії [30].

Для обчислення ORL цим методом доводиться використовувати інтегральне вираження потужності прийнятого імпульсу щодо ширини імпульсу випромінювання та довжини вимірюваної ділянки волокна.

$$ORL = 10 \text{ Log} \left( \frac{P_0 \cdot \Delta t}{\int Pr(z) dz} \right), \quad (2.1)$$

де  $P_0$  – вихідна потужність сигналу OTDR;

$\Delta t$  – ширина імпульсу OTDR;

$\int pr(z) dz$  – сумарна прийнята потужність, що враховує дистанцію виміру (залежно від положення курсорів на рефлектограмі).

Також рефлектометр дозволяє тестувати зворотні втрати окремих ділянок або елементів ВОЛЗ, а також визначати їхнє місце розташування. Для цього досить обмежити курсорами ділянку, на якій необхідно виміряти зворотні втрати й активізувати функцію ORL. Отримане значення й буде показувати рівень втрат сегмента мережі.

Під час застосування OTDR при аналізі ORL не потрібно проводити опорні або калібровані виміри, тому такий метод простіше для монтажників або інженерів. Крім того, в більшості сучасних оптичних рефлектометрах є функція виміру ORL, яка дозволяє аналізувати оптичні відображення як у ручному, так і в автоматичному режимах, а також знаходити ділянки з найбільшими зворотними втратами. Однак метод OCWR дає більш точні результати виміру і через це більш придатний для паспортизації споруджуваних або ділянок ВОЛЗ, що ремонтуються. Для порівняння варто вказати, що точність тестування втрат ORL-метром становить близько  $\pm 0,5$  дБ, тоді як OTDR метод дає результат з точністю близько  $\pm 2$  дБ. Крім того, OTDR методом дуже важко проводити вимір коротких ділянок кабелю від 1 до 20 метрів або окремих пасивних компонентів оптичної лінії, із чим прекрасно справляється OCWR.

За функціоналом OTDR багато в чому схожий із імпульсним рефлектометром, який використовується для тестування мідних ліній. Обидва типи рефлектометрів надсилають у лінію потужний зондувальний імпульс (відповідно, оптичний або електричний) і виконують вимірювання потужності, а також затримку повернених імпульсів. Головна відмінність полягає в тому, що в Ethernet лініях реєструються лише відбиті імпульси, які виникають у місцях, де є зміни хвильового опору. В оптоволокну зворотні хвилі формуються не тільки через відбиття від дефектів, розмір яких перевищує довжину хвилі, а й завдяки релєївському розсіюванню. Це розсіювання виникає через флуктуації показника заломлення кварцового скла, які утворилися під час витягування волокна. Розмір таких релєївських центрів (неоднорідностей) набагато менший за довжину хвилі, тому світло розсіюється в усіх напрямках, включаючи повернення в моду волокна (рисунок 2.6).

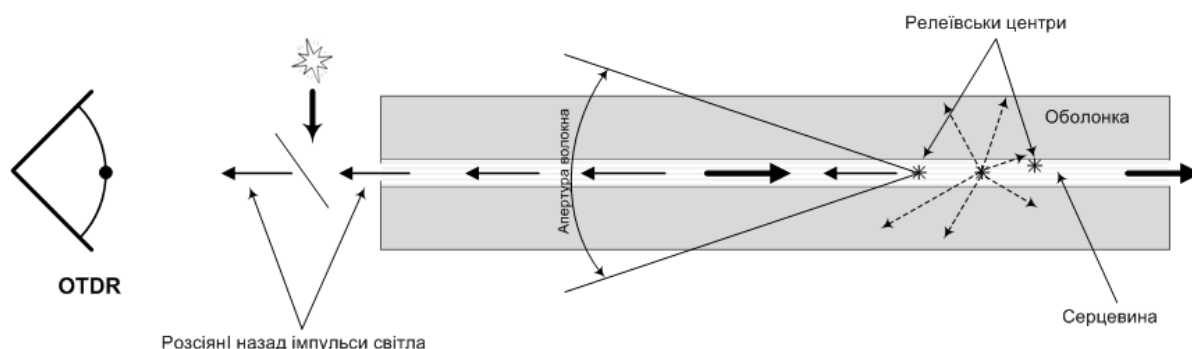


Рисунок 2.6 – Надходження імпульсів світла розсіяних назад у моду волокна (в OTDR)

Релєївські центри рівномірно розподілені вздовж волокна, а розсіяна на них хвиля містить інформацію про всі характеристики лінії, які мають вплив на поглинання світла. Завдяки детектуванню цього розсіяного випромінювання є можливим виявлення поглинаючих (невідбиваючих) неоднорідності у волокні.



За допомогою світлового сигналу зворотного релієвського розсіювання можна визначати розподіл втрат у довжинах оптичних кабелів при будівництві, а також втрати на стиках волокон. Такі вимірювання неможливо виконати, враховуючи лише відбите випромінювання.

Та частина оптичної потужності, що розсіюється назад у моду волокна, є дуже малою. Наприклад, для імпульсу шириною 1 м з тривалістю 10 нс коефіцієнт зворотного релієвського розсіювання дорівнює приблизно -70 дБ. Саме через це, OTDR посилає у волокно імпульси більшої потужності та довші за часом, а для виявлення зворотно розсіяних імпульсів застосовуються фотоприймачі зі збільшеною чутливістю.

Більшість моделей OTDR побудовані за модульним принципом (рисунок 2.7). Вони складаються з базового модуля та змінних оптичних модулів. Базовий модуль – це персональний комп'ютер, призначений для обробки сигналів і виведення даних на дисплей. Оптичний модуль складається з лазерного діоду, фотоприймача, оптичного відгалужувача і оптичного роз'єму. Собівартість кожного оптичного модуля залежить від його динамічного діапазону і може значно перевищувати ціну стандартного модуля. Завдяки модульній конструкції OTDR, користувач може обрати або змінити конфігурацію пристрою, а згодом модернізувати його – встановити багатомодовий або одномодовий модуль із розширеним динамічним діапазоном.

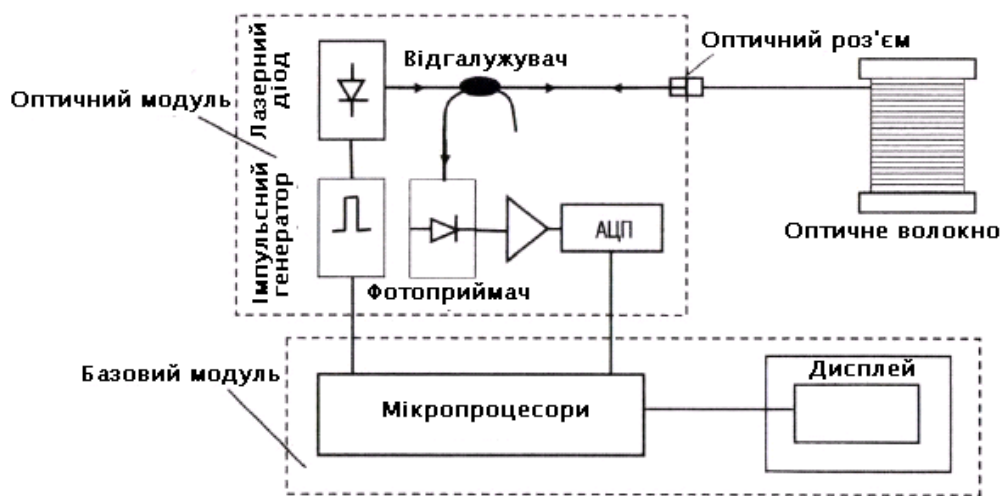


Рисунок 2.7 – Блок схема OTDR

В оптичному модулі як джерело випромінювання використовуються лазерні діоди Фабрі-Перо. Для досягнення максимальної потужності випромінювання та збільшення динамічного діапазону рефлектометра застосовуються лазерні діоди із квантовими ямами. Вони генерують імпульси потужністю від 10 до 1000 мВт, що тривають від 2 нс до 20 мкс із частотою повторення у декілька кілогерц. Ці імпульси подаються через оптичний відгалужувач до роз'єму, до якого підключається досліджуване оптичне волокно. Розсіяні оптичні імпульси повертаються назад в оптичний модуль, де через відгалужувач вони спрямовуються до фотоприймача. У фотоприймачі ці імпульси перетворюються на електричний сигнал, який підсилюється, накопичується та



обробляється в базовому модулі. Потім результати вимірювань відображаються на дисплеї у вигляді графічної рефлектограми, що дозволяє аналізувати дані як вручну (візуально), так і автоматично за допомогою вбудованих функцій.

Розсіяні імпульси мають потужність на 50–80 дБ меншу, ніж початкові вхідні імпульси, в залежності від їхньої тривалості. Для покращення співвідношення сигнал/шум виміри проводяться багато разів, а отримані результати усереднюються. Цей процес займає лише кілька секунд, оскільки час проходження світлом лінії дуже малий, приблизно 100 км за 1 мс. Рефлектограми зазвичай складаються з 32 тисяч вимірюваних точок, кожна з яких обчислюється шляхом усереднення кількох тисяч імпульсів. Обробка такого масиву даних відбувається менше ніж за секунду: перша рефлектограма одразу відображається на дисплеї, а далі виводяться вже усереднені результати. При подвоєнні часу вимірювання рівень шуму у рефлектограмі зменшується приблизно на 0,75 дБ.

Для обробки даних і забезпечення зручності використання рефлектометр оснащений двома мікропроцесорами. Перший високопродуктивний процесор здатний усереднювати до 50 мільйонів точок за секунду. Другий мікропроцесор відповідає за інтерфейс користувача, автоматичне виявлення дефектів у волокні, відображення інформації на дисплеї та забезпечення сумісності з ПК. Це дозволяє використовувати стандартні пристрої, такі як клавіатура, миша, принтер і жорсткий диск, а також додаткове програмне забезпечення.

Такий рефлектометр виконує функції як вимірювального приладу, так і персонального комп'ютера, що надає широкі можливості для обробки даних. Основний функціонал включає масштабування окремих частин рефлектограми, створення списку неоднорідностей у лінії, визначення загасання на окремих ділянках волокна, формування звіту тощо.

Як було описано раніше, оптичні рефлектометри використовуються для перевірки стану оптичних кабелів і каналів ВОЛЗ у місці зрощування оптоволокна. Рефлектометри можуть застосовуватися для пошуку будь-яких несправностей ВОЛЗ. Далі буде наведено, яким чином рефлектометр може застосовуватися при тестуванні й усуненні несправностей кабелю.

Типова рефлектограма представлено на рисунку 2.8.

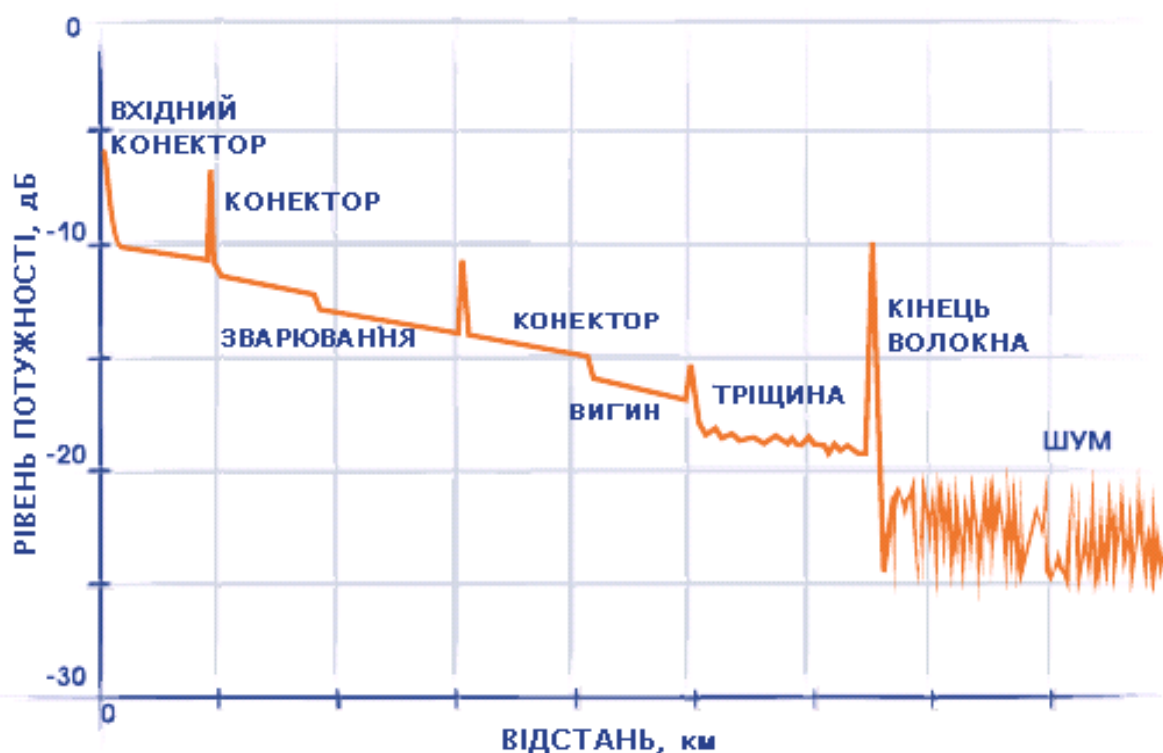


Рисунок 2.8 – Приклад типової рефлектограми OTDR оптоволоконної лінії [55]

Рефлектометр відображає велику кількість даних. Кут нахилу рефлектограми вказує на рівень загасання у волокні та може бути відкалібрований в дБ/км. Для точного вимірювання загасання в оптичному волокні необхідно використовувати кабель достатньої довжини, без спотворень сигналу на обох його кінцях. Це допомагає уникнути перевантаження приймача рефлектометра, яке може виникнути через сильне зворотне відбиття сигналу. Якщо в оптичному волокні спостерігається нелінійність на одному з його кінців, особливо поблизу «подій», які викликають відбиття, таку ділянку слід виключити з розрахунків загасання.

Оптичні рознімання і місця зрощування в термінології рефлектометрії називаються «подіями». Обидва терміни означають втрату сигналу, але оптичні роз'єми та механічні з'єднувачі (сплайси) породжують відбиваючий сплеск. Отже, вони відрізняються від місць зварювання оптичних волокон, які цього сплеску не викликають. Крім того, висота такого сплеску показує величину відбиття оптичного сигналу під час даної «події», за винятком випадків, коли воно настільки велике, що перевантажує приймач рефлектометра.

Також оптичні рефлектометри можуть виявляти дефекти кабелю до моменту або в процесі інсталяції. Якщо волокно було ушкоджено, то його довжина, отримана за допомогою рефлектометра, виявиться суттєво менше всієї довжини оптичного кабелю, а місце відколу волокна буде видно на рефлектограмі як місце зрощування з високими втратами. Якщо на кабель було зроблено надмірне навантаження, викликана перевищенням припустимого радіуса вигину або просто неприпустимим вигином, то рефлектометр визначить цю подію просто як кабельний зросток у неприпустимому місці.

Обмежена здатність рефлектометра по дальності вимірів робить його використання досить скрутним у локальних обчислювальних мережах або структурованих кабельних системах, де оптичні кабелі звичайно мають довжину в кілька сотень метрів. Рефлектометр має обмежене функціонування при роботі з кабелями коротких довжин у локальних мережах і з великою ймовірністю покаже «примарний» сигнал (сигнал багаторазового відбиття), відбитий від оптичного конектора найблищого кінця, чим може досить просто ввести користувача рефлектометра в оману.

Є кілька правил, які роблять застосування рефлектометра більш простим і зрозумілим. Завжди при вимірах використовується довгий компенсуючий кабель, який дозволить рефлектометру стабілізуватися після стартового імпульсу. Цей кабель є еталонним для тестування оптоволоконної ділянки після першого оптичного роз'єму, яке необхідно перевірити. Для кращого аналізу, перевірка рефлектометром завжди починається з установки найменшої тривалості імпульсу й використовується компенсаційна котушка оптоволоконна, довжина якого перевищує довжину оптичного кабелю, який тестується, як мінімум, у два рази. Далі зробити стартове трасування і підібрати параметри які необхідно налаштувати, щоб одержати гарні наочні результати.

Критично важливою є наявність якісної кабельної документації на СКС. Без інформації про те, куди йдуть кабелі, яка їхня довжина й результати тестування оптичної потужності випромінювання, то робота із з'ясування причин неробочої ділянки ВОЛЗ може бути сильно ускладнена. Також обов'язково мати в наявності інструменти для діагностики несправностей та їх ліквідації, устаткування, включаючи портативний зварювальний апарат (для зварювання оптичних волокон), механічні сплайси, а також запасні кабелі.

Першим кроком необхідно з'ясувати, де саме виникла проблема: в оптичному кабелі або в устаткуванні, що використовує ці кабелі. За допомогою простого вимірника оптичної потужності випромінювання тестується джерело на можливість передачі сигналу, а приймач – на можливість його приймання. За допомогою оптичного трасувальника перевіряється цілісність оптоволоконна. Якщо проблеми виявляться в кабельній системі, то для їхньої подальшої локалізації застосовується оптичний рефлектометр.

Варто відзначити, що первісна установка встаткування Fast Ethernet (100 Мбіт/с) у такій лінії не буде викликати проблем, тому що припустимий рівень втрат в 100-мегабітних системах суттєво вище. Дуже важливо при прокладці мережі буде переконатися в тому, що в майбутньому мережу можна буде перевести на стандарт Gigabit Ethernet і на стандарт 10Gigabit Ethernet, що в мережі виконані всі вимоги цього стандарту, які запропоновані до довжини кабельного з'єднання й допустимі величини загасання.

## **2.2 Експлуатаційні та діагностичні виміри апаратними засобами GPON OLT та GPON ONU**

Під час експлуатації GPON-мережі, для забезпечення її стабільної роботи, є необхідність проведення неперервних вимірів таких параметрів, як оптична

					КНУ.РМ.123.24.06.02.ПЗОБМГ	Арк.
	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

потужність SFP-трансивера в OLT та ONU – як потужність, що надходить на OLT від абонентської ONU, так і на ONU від OLT.

Фактично кожен оптичний трансивер в ONU та OLT має в своєму складі апаратні засоби діагностики та вимірювання параметрів. Одним із таких засобів є DDM.

DDM розшифровується як цифровий діагностичний моніторинг, відповідно до галузевого стандарту MSA (Multi-Source Agreement). DDM також широко відомий як DOM, що означає цифровий оптичний моніторинг. Більшість трансиверів, що використовуються сьогодні, мають функцію DDM. DDM – це технологія, яка дозволяє користувачам контролювати параметри волоконно-оптичних трансиверів в режимі реального часу [38]

DDM дозволяє адміністратору контролювати ключові параметри, які можуть впливати на продуктивність оптичного трансивера, такі як:

- температура трансивера;
- напруга живлення трансивера;
- струм зміщення лазера;
- середня оптична потужність передачі;
- прийнята амплітуда оптичної модуляції або середня оптична потужність.

Моніторинг цих параметрів у реальному часі може попередити систему про ненормальну роботу трансивера або про перевищення встановлених робочих меж. Функція DDM також може бути використана для ізоляції конкретного місця несправності в системі волоконно-оптичної мережі. На додаток до ізоляції несправностей, DDM також може допомогти в прогнозуванні відмов на волоконно-оптичних лініях на основі продуктивності трансивера. Функція DDM відкриває широкі можливості адміністрування при обслуговуванні мережі, а також допомагає забезпечити мінімальні перебої в роботі. DDM дозволяє мережевим спеціалістам виявляти потенційні збої до того, як це вплине на продуктивність системи. Система сповіщення про збої DDM також дозволяє мережевим менеджерам переключитися на резервне з'єднання або замінити пристрій, що працює ненормально. DDM також слугує для перевірки сумісності модулів [38].

Інформацію DDM про стан оптичного трансивера можна в подальшому прочитати за допомогою протоколу управління мережею SNMP. Зараз більшість волоконно-оптичних приймально-передавальних модулів мають функцію DDM. Таким чином, використовуючи SNMP, можна легко отримати інформацію про робочий стан волоконно-оптичних модулів в режимі реального часу. За допомогою DDM можна прогнозувати несправності. Зазвичай вихідна потужність оптичного модуля контролюється на стабільному рівні зі збільшенням струму зміщення лазера. Чим довше збільшується струм зміщення лазера, тим більша квантова ефективність лазера буде зменшуватися. Тому адміністратори можуть контролювати струм зміщення лазера, щоб передбачити термін служби лазера. За допомогою такого прогнозу адміністратор мережі може вчасно запустити резервне з'єднання і відремонтувати системи заздалегідь [37].

На рисунку 2.9 зображено приклад отримання конфігурації SFP-модуля за допомогою DDM на обладнанні Cisco.

```

Device> enable
Device# configure terminal
Device(config)# show interface sfp ethernet 1/1
Port e1/1 :
Common information:
Transceiver Type           :SFP
Compliance                 :10G BASE-LR
Connector Type             :LC
WaveLength (nm)           :1310
Transfer Distance (m)      :10000 (9um)
Digital Diagnostic Monitoring :YES
VendorName                 :WTD
Manufacture information:
Manu. Serial Number       :BP132500260047
Manufacturing Date        :2013-06-19
VendorName                 :WTD
Diagnostic information:
Temperature ( )           :28
Voltage (V)               :3.3098
Bias Current (mA)         :35.419
Bias High Threshold (mA)  :70.00
Bias Low Threshold (mA)   :15.00
RX Power (dBm)            :-2.80
RX Power High Threshold (dBm) :0.00
RX Power Low Threshold (dBm) :-15.20
TX Power (dBm)            :-3.10
TX Power High Threshold (dBm) :0.00
TX Power Low Threshold (dBm) :-8.20

```

Рисунок 2.9– Приклад відображення DDM-інформації на обладнанні Cisco [6]

Для контролю стану ONU через OLT використовується протокол OMCI (ONT Management and Control Interface) [67]. Цей протокол дає змогу OLT:

- встановлювати з'єднання через ONU;
- керувати інтерфейсом User-to-Network через ONU;
- виконувати запити інформації про конфігурацію і статистику якості передачі;
- автономно інформувати системного оператора про помилки і проблеми зі з'єднанням [67].

OMCI виступає каналом передачі конфігурації, визначеним у стандарті GPON. Він встановлює власний ATM PVC або GEM PORT між OLT та ONU для передачі повідомлень OMCI, що слугує методом керування та контролю ONU. Для ONU, що підтримують OMCI, цей протокол пропонує зручні та ефективні можливості управління [17].

OMCI – це протокол керування «ведучий-ведений», в якому OLT виступає в ролі ведучого пристрою, а ONU – в ролі веденого. Обмін інформацією між ведучим і веденим пристроями в основному використовує механізм зупинки та очікування [17].

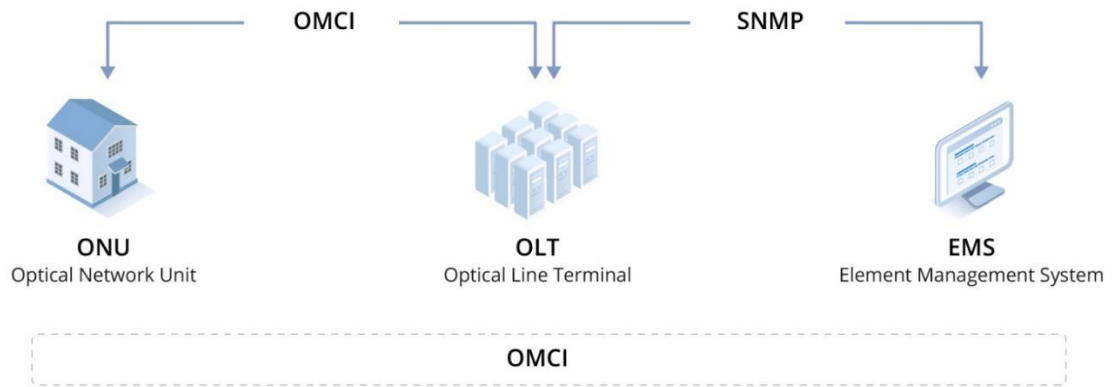


Рисунок 2.10 – Схема контролю ONU та OLT за допомогою протоколів SNMP та OMCI [17]

Механізм зупинки та очікування:

1. Передача кадру даних. Ведучий пристрій надсилає кадр даних і повинен дочекатися підтвердження від веденого пристрою, перш ніж надсилати наступний кадр даних.

2. Підтвердження (АСК). Після отримання кадру даних підлеглий пристрій надсилає відповідь АСК на головний пристрій, що свідчить про успішне отримання.

3. Механізм повторної передачі. якщо головний пристрій не отримує кадр підтвердження протягом певного періоду, він вважає, що кадр даних втрачено або пошкоджено, і повторно передає кадр даних.

Для обміну інформацією між головним OLT і підлеглими пристроями ONU використовується спеціальний двонаправлений канал управління, відомий як OMCC. Цей канал встановлюється під час ініціалізації ONU і використовується для надсилання команд управління та контролю, а також для отримання інформації про стан від ONU. Протокол OMCI працює через канал OMCC за допомогою з'єднань GEM (метод інкапсуляції GPON) [17].

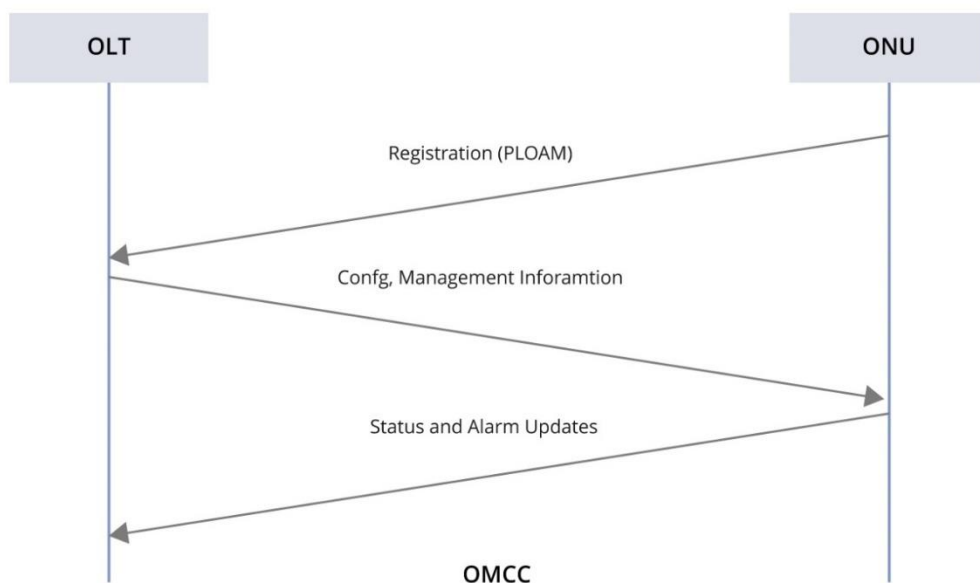


Рисунок 2.11 – Обмін інформацією між головним OLT і підпорядкованим ONU [17]

Між термінальними пристроями, такими як ONU, існує логічний інтерфейс, відомий як UNI (User-Network Interface), який відповідає за пересилання даних користувача і сигналів управління. Протокол OMCI дозволяє здійснювати операції управління на інтерфейсі UNI, визначаючи і маніпулюючи різними керованими об'єктами:

- Керування конфігурацією. OMCI дозволяє OLT віддалено конфігурувати різні параметри ONU, включаючи конфігурацію ініціалізації, розподіл смуги пропускання і налаштування якості обслуговування (QoS).

- Управління продуктивністю. OLT може збирати дані про продуктивність ONU, такі як швидкість передачі, рівень помилок і затримки. Крім того, він може аналізувати продуктивність для виявлення потенційних проблем і можливостей оптимізації.

- Управління безпекою. Протокол OMCI надає функції управління безпекою, такі як контроль доступу і шифрування даних, що дозволяє OLT налаштовувати дозволи доступу до ONU, запобігати несанкціонованому доступу і підвищувати безпеку за допомогою шифрування даних.

- Управління несправностями. Ця функція в першу чергу передбачає моніторинг ONU на наявність несправностей, виявлення проблем і повідомлення системному адміністратору про такі події, як збої в роботі з'єднання [17].

На рисунку 2.12 наведено інтерфейс керування OLT ZTE C320, а саме – отримання діагностичної інформації від абонентських ONU.

```
wat31-zte320#show pon power attenuation gpon-onu_1/1/3:8
      OLT                ONU                Attenuation
-----
up      Rx :-19.120 (dbm)    Tx:2.219 (dbm)    21.339 (dB)
down    Tx :6.521 (dbm)       Rx:-15.342 (dbm)  21.863 (dB)
wat31-zte320#show pon power attenuation gpon-onu_1/1/3:9
      OLT                ONU                Attenuation
-----
up      Rx :-20.287 (dbm)    Tx:2.508 (dbm)    22.795 (dB)
down    Tx :6.521 (dbm)       Rx:-17.012 (dbm)  23.533 (dB)
wat31-zte320#show pon power attenuation gpon-onu_1/1/3:11
      OLT                ONU                Attenuation
-----
up      Rx :-20.421 (dbm)    Tx:2.014 (dbm)    22.435 (dB)
down    Tx :6.521 (dbm)       Rx:-15.032 (dbm)  21.553 (dB)
wat31-zte320#show pon power attenuation gpon-onu_1/1/3:15
      OLT                ONU                Attenuation
-----
up      Rx :-19.742 (dbm)    Tx:1.754 (dbm)    21.496 (dB)
down    Tx :6.521 (dbm)       Rx:-14.548 (dbm)  21.069 (dB)
wat31-zte320#
```

Рисунок 2.12 – Отримання діагностичної інформації від абонентських ONU

Взаємодія мережевого адміністратора з OLT для діагностування може виконуватися за допомогою протоколу SNMP.



Simple Network Management Protocol (SNMP) – це протокол прикладного рівня, який використовується для керування та моніторингу мережі. SNMP використовується мережевими адміністраторами для управління продуктивністю мережі, виявлення та усунення можливих проблем і збору мережевої статистики. Мережа, керована SNMP, складається з керованих пристроїв, агентів і мережевого менеджера [26].

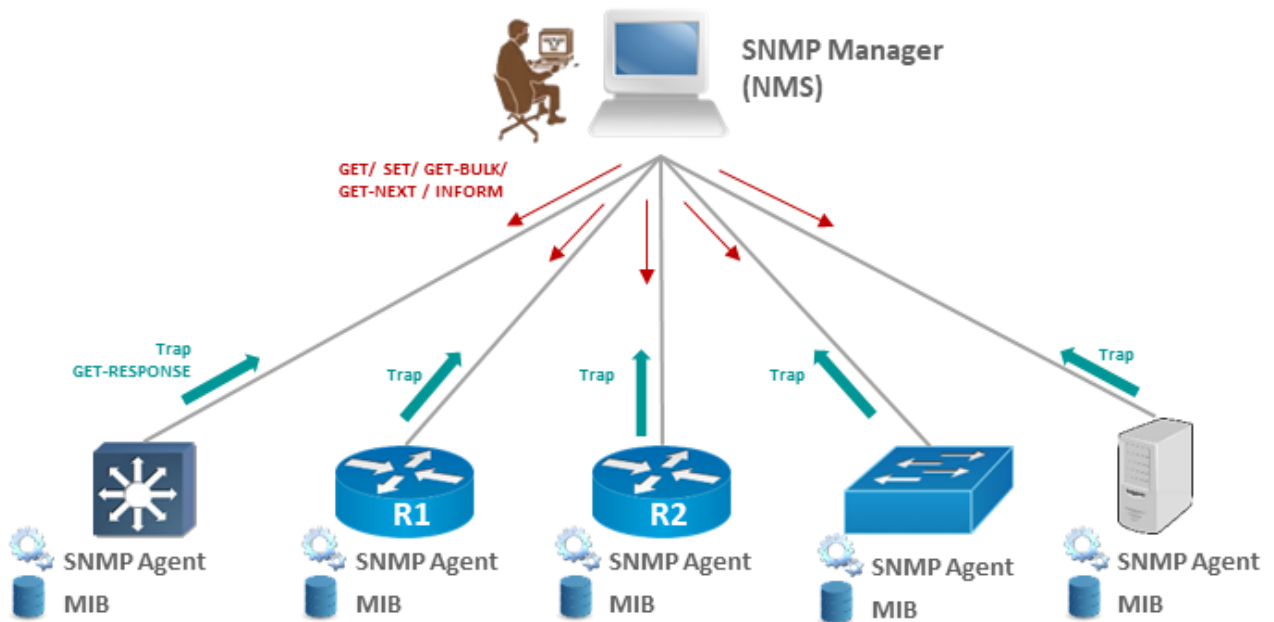


Рисунок 2.13 – Керування пристроями за допомогою SNMP-протоколу [28]

SNMP використовується для збору даних, пов'язаних зі змінами в мережі або для визначення стану підключених до мережі пристроїв. Збір цих даних може допомогти ІТ-фахівцям тримати руку на пульсі всіх керованих ними пристроїв і додатків. Кожен пристрій у мережі можна опитувати в режимі реального часу за допомогою SNMP, TCP та інших типів зондів для отримання метрик його продуктивності. При перевищенні порогових значень певних показників програмне забезпечення може попередити системних адміністраторів про проблему, що дозволить їм заглибитися в дані і знайти рішення [42].

Протокол SNMP працює шляхом надсилання повідомлень, які називаються одиницями даних протоколу (PDU), на пристрої у мережі, на яких налаштований SNMP. Ці повідомлення називаються SNMP Get-запити. Використовуючи ці запити, мережеві адміністратори можуть відстежувати практично будь-які значення даних, які вони вказують [42].

Для виконання моніторингу мережевої активності протокол SNMP використовує архітектуру, яка включає такі компоненти:

- Керовані пристрої. До них належать принтери, робочі станції, маршрутизатори, комутатори та інше активне мережеве обладнання, яке потребує управління і контролю. Керовані пристрої оснащуються SNMP-вузлами, що дозволяють їм обмінюватися інформацією з іншими елементами мережі.



– Агенти. Вся система SNMP базується на зборі та передачі даних про стан пристроїв. Це завдання виконують програмні агенти, які встановлюються на локальних пристроях для збору і зберігання інформації, а також для сповіщення про важливі події.

– MIB. Це база даних, яку спільно використовують агенти та SNMP-менеджери, і вона забезпечує пам'ять та обробку даних для управління мережею.

Разом ці компоненти збирають інформацію, яку потім передають мережевому користувачу [42].

MIB розшифровується як Management Information Base і являє собою набір інформації, організованої в ієрархічному порядку. Доступ до них здійснюється за допомогою такого протоколу, як SNMP. Існує два типи MIB: скалярні та табличні [29].

Скалярні об'єкти визначають один екземпляр об'єкта, тоді як табличні об'єкти визначають кілька пов'язаних екземплярів об'єктів, згрупованих у таблицях MIB.

MIB – це колекції визначень, які описують властивості керованого об'єкта в пристрої, яким потрібно керувати. Для того, щоб все було належним чином організовано, всі керовані функції продуктів (від кожного постачальника) розташовані в дереві MIB. Кожна «гілка» цього дерева має номер і назву, а повний шлях від вершини дерева до необхідної точки утворює назву цієї точки – ідентифікатор OID. Вузли біля вершини дерева мають максимально загальний характер. У процесі переходу до наступних каталогів, назви стають все більш конкретними, поки користувач не дійде до самого низу, де кожен вузол представляє конкретну функцію на конкретному пристрої (або агенті) [29].

Інформація про оптичний термінал ZTE C320, що був розглянутий у розділі 1.10, також має своє місце в MIB. Далі будуть наведені основні відомості про цей OLT із довідника-специфікації, що пов'язані з апаратною діагностикою [47].

Для визначення значень оптичної потужності на стороні OLT (оптичної лінійної термінальної станції) використовується змінна `zxAnPonRxOpticalPower`, яка пов'язана з відповідним OID у MIB. Основна інформація про цей атрибут наведена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Отримання оптичної потужності на стороні OLT [47]

Змінна MIB	OID	Значення MIB	Опис
<code>zxAnPonRxOpticalPower</code>	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.1.2.4.2.1.2	INTEGER {reboot ( 1 ) }	Виміряно отриману оптичну потужність. 65535000 означає N/A, ONU не працює. -80000 означає, що сигнал не отримано.

Цей атрибут дозволяє інженерам точно визначити стан сигналу на вході OLT, що є важливим для діагностики та усунення можливих проблем у мережі.

На стороні GPON ONU для визначення оптичної потужності використовуються атрибути `zxAnGponRmAniRxOptLevel` та `zxAnGponRmAniTxOptLevel`, описані у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Отримання оптичної потужності на стороні GPON ONU [47]

Змінна MIB	OID	Значення MIB	Опис
zxAnGponRmAniRxOptLevel	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.20.2.2.2.1.10		Цей атрибут повідомляє про поточне вимірювання загального рівня оптичного сигналу, dBuW, доповнення 2 с, роздільна здатність 0,002 дБ. 0xFFFF означає, що рівень оптичного сигналу невідомий (N/A), коли ONU перебуває в автономному режимі.
zxAnGponRmAniTxBOptLevel	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.20.2.2.2.1.14		Цей атрибут повідомляє про поточний вимір середньої оптичної потужності запуску, dBuW, доповнення 2с, роздільна здатність 0,002 дБ. 0xFFFF означає, що рівень оптичного сигналу невідомий (N/A), коли ONU перебуває в автономному режимі.

У базі даних MIB для ZTE C320 існує окрема гілка, що описує роботу з технологією PON та керування ONU. Цей розділ забезпечує можливість налаштовувати параметри роботи, виконувати реєстрацію або видалення ONU для конкретного OLT, а також керувати автентифікацією. Основні змінні, пов'язані з управлінням ONU, наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Змінні MIB для управління ONU [47]

Змінна MIB	OID	Значення MIB	Опис
zxAnGponOnuMgmtType	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.3.3.1.1	DisplayString ( SIZE ( 1 .. 64 ) )	Ім'я типу ONU, яке повинно посилатися на запис zxAnPonOnuTypeTable.

## Продовження таблиці 2.3

Змінна MIB	OID	Значення MIB	Опис
zxAngponOnuMgmtRegMode	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.3.3.1.5	INTEGER { regModeSn (1), regModePwd (2), regModeSnPlusPwd(3), regModeRegisterId (4), regModeRegisterIdPlus8021x (5), regModeRegisterIdPlusMutual (6), regModeHexPwd (7), regModeSnPlusHexPwd (8), regModeLoid ( 9 ) , regModeLoidPlusPwd ( 10 ) }	Цей атрибут вказує на режим реєстрації ONU. regModeSn: GPON/XGPON – G.984 G.987 – 8 байт regModePwd: GPON – G.984 – 10 байт regModeSnPlusPwd: GPON – G.984 – 8+10 байт regModeRegisterId: GPON/XGPON – G.984 G.987 – 36Bytes(XGPON) regModeRegisterIdPlus8021x: XGPON – G.987 – 36Bytes regModeRegisterIdPlusMutual: XGPON – G.987 – 36Bytes regModeHexPwd: GPON – Шістнадцятковий формат пароля – 7 байт (hex, фіксований) regModeSnPlusHexPwd: GPON – формат Hex SN+Пароль – 8+7Bytes(hex, fixed) regModeLoid: GPON/XGPON – формат CTC – 24 байти regModeLoidPlusPwd: GPON/XGPON – формат CTC – 24+12Bytes Атрибут також використовується для визначення режиму реєстрації в 'zxAngponOnuMgmtRegistrationInfo'.

## Продовження таблиці 2.3

Змінна MIB	OID	Значення MIB	Опис
zxAvgponOnuMgmtSn	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.3.3.1.6	OCTET STRING ( SIZE ( 8 ) )	SN, налаштований OLT з метою реєстрації. Серійний номер є унікальним для кожного ONU. Він визначений у [ITU-T G.984.3] та [ITU-T G.987.3] і містить ідентифікатор постачальника та серійний номер конкретного постачальника. Перші чотири байти – це ASCII-кодований чотирилітерний ідентифікатор постачальника. Другі чотири байти – це двійкове кодування серійного номера, який контролюється виробником ONU. Цей атрибут дійсний, коли 'zxAvgponOnuMgmtRegMode' має таке значення: regModeSn(1) – 8 байт, regModeSnPlusHexPwd(8) – 8 байт
zxAvgponOnuMgmtPwd	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.3.3.1.7	OCTET STRING ( SIZE ( 0 .. 12 ) )	Пароль, сконфігурований OLT для реєстрації. Цей атрибут дійсний, коли 'zxAvgponOnuMgmtRegMode' має таке значення: regModePwd(2) – 10 байт, regModeSnPlusPwd(3) – 10 байт, regModeHexPwd(7) – 7

Продовження таблиці 2.3

Змінна MIB	OID	Значення MIB	Опис
			байт(hex), regModeSnPlusHexPwd(8) – 7 байт(hex), regModeLoidPlusPwd(10) – 12 байт
zxAnGponOnuMgmtLoid	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.3.3.1.8	DisplayString ( SIZE ( 0 .. 24 ) )	LOID, сконфігурований OLT для роботи з реєстром. Цей атрибут є дійсним, коли 'zxAnGponOnuMgmtRegMode' має таке значення: regModeLoid(9); regModeLoidPlusPwd(10)
zxAnGponOnuMgmtRegistrationId	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.3.3.1.9	DisplayString ( SIZE ( 0 .. 36 ) )	Реєстраційний ідентифікатор, сконфігурований OLT з метою реєстрації. Цей атрибут є дійсним, коли 'zxAnGponOnuMgmtRegMode' має таке значення: regModeRegisterId(4) regModeRegisterIdPlus8021x(5) regModeRegisterIdPlusMutual(6)
zxAnGponOnuMgmtRowStatus	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.3.3.1.50	RowStatus	

Описані змінні MIB для управління ONU дають змогу:

- ідентифікувати пристрої в мережі завдяки унікальним серійним номерам та реєстраційним ідентифікаторам;
- забезпечити безпеку шляхом автентифікації за допомогою паролів або LOID;
- виконувати моніторинг стану реєстрації пристроїв у реальному часі.

У MIB-дереві для OLT ZTE C320 виділено окрему гілку для реалізації функцій віддаленого керування ONU. Цей розділ містить змінні, які дозволяють налаштовувати параметри обслуговування, пов'язані з портами GEM, та керувати характеристиками мережевих служб. Основна інформація про ці змінні наведена у таблиці 2.4.

					КНУ.РМ.123.24.06.02.ПЗОБМГ	Арк.
Арк.	№ документа	Підпис	Дата			

Таблиця 2.4 – Віддалене керування ONU [47]

Змінна MIB	OID	Значення MIB	Опис
zxAngponRmServiceName	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.20.2.7.2.1.1	DisplayString ( SIZE ( 1 .. 32 ) )	Назва служби.
zxAngponRmServiceGemPort	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.20.2.7.2.1.2	Integer32 ( 1 .. 255 )	Індекс обслуговування порту GEM.
zxAngponRmServiceMapType	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.20.2.7.2.1.4	INTEGER { cos ( 1 ) , vlan ( 2 ) , cosAndVlan ( 3 ) , transparent ( 4 ) , untag ( 5 ) }	Служба Тип мапи. – cos: зіставлення з gemport за значенням cos – vlan: зіставлення з gemport за значенням VLAN – cosAndVlan: зіставлення з gemport за значенням cos і VLAN – transparent: зіставлення з gemport прозора – untag: зіставлення з gemport для кадрів без тегів
zxAngponRmServiceMapCos	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.20.2.7.2.1.5	Integer32 ( 0 .. 255 )	Бітове поле визначає кадри з пріоритетом, пов'язаним з цією послугою. MSB означає пріоритет 7, LSB – пріоритет 0. Значення біта 0 вказує на те, що кадри з відповідним пріоритетом мають бути відкинуті.
zxAngponRmServiceMapVid	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.20.2.7.2.1.6	OCTET STRING ( SIZE ( 24 ) )	Кожні 2 байти означають ідентифікатор VLAN, пов'язаний з цією службою. Перші N*2 байти є дійсними, доки VLAN ID=0.
zxAngponRmServiceRowStatus	.1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.20.2.7.2.1.50	RowStatus	

Ця гілка дозволяє гнучко налаштувати мережеві параметри та керувати послугами:

- налаштування параметрів GEM-портів для кожного ONU, що дозволяє оптимізувати пропускну здатність та сегментацію трафіку;
- призначення пріоритетів кадрам через змінну `zxAnGponRmServiceMapCos`, що важливо для управління якістю обслуговування (QoS);
- зіставлення VLAN ID із конкретними послугами за допомогою `zxAnGponRmServiceMapVid`, що забезпечує сегментацію мережі та її безпеку.

Для роботи з деревом MIB використовуються MIB-браузери. MIB-браузер – це програмний інструмент для інженерів, що дозволяє керувати мережевими пристроями та додатками з підтримкою SNMP [16]. Основні функції MIB-браузера:

- дозволяє переглядати структуру, швидко знаходити потрібні об'єкти та їхні атрибути;
- підтримує доступ до змінних через протокол SNMP для налаштування та моніторингу пристроїв;
- забезпечує отримання даних про працездатність мережевого обладнання;
- допомагає виявляти несправності або аномалії у роботі обладнання завдяки аналізу значень MIB-змінних.

Для перегляду дерева MIB було використано безкоштовну версію MIB-браузера `iReasoning` [16]. На рисунку 2.14 наведено гілку GPON OLT PON Layer Realtime Statistics.

iReasoning MIB Browser

File Edit Operations Tools Bookmarks Polls Help

Address:  Advanced... OID: .1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.2.2.1.1

SNMP MIBs

- private
  - enterprises
    - zte
      - zxAccessNode
        - zxAnPon
          - zxAnPonBaseMib
          - zxAnGponSrvMib
            - zxAnGponSrvGlobalObjects
            - zxAnGponSrvObjects
              - zxAnGponSrvPrfObjects
              - zxAnGponSrvOltObjects
                - zxAnGponSrvOltPerfObjects
                  - zxAnGponSrvOltCurrPerfTable
                  - zxAnGponSrvOltCurrPerfEntry
                    - zxAnGponUsCorrectNIdleGems**
                    - zxAnGponUsCorrectIdleGems
                    - zxAnGponUsErrGems
                    - zxAnGponUsGemPayloadBytes
                    - zxAnGponUsCorrectEtherFrm
                    - zxAnGponUsErrEtherFrm
                    - zxAnGponUsPloamMsgs
                    - zxAnGponUsErrPloamMsgs
                    - zxAnGponUsErrBits
                    - zxAnGponUsTotalBits
                    - zxAnGponUsCrcErrPkts
                    - zxAnGponDsEtherFrm
                    - zxAnGponDsPloamMsgs
                    - zxAnGponOltReis
                    - zxAnGponCorrectedBytes
                    - zxAnGponCorrectedWords

|         |   |
|---------|---|
| Name    | zxAnGponUsCorrectNIdleGems              |
| OID     | .1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.2.2.1.1 |
| MIB     | ZTE-AN-GPON-SERVICE-MIB                 |
| Syntax  | COUNTER64                               |
| Access  | read-only                               |
| Status  | current                                 |
| DefVal  |   |
| Indexes | ifIndex                                 |

Рисунок 2.14 – Гілка GPON OLT PON Layer Realtime Statistics дерева MIB для OLT ZTE

GPON OLT PON Layer Realtime Statistics на рівні продуктивності забезпечує комплексний моніторинг важливих параметрів роботи PON. Набір змінних MIB, представлений у цьому розділі, дозволяє отримувати дані в реальному часі про ефективність і стан передачі інформації між OLT та ONU, як у висхідному, так і низхідному напрямках. Основними показниками, що підлягають моніторингу, є:



– Коректність переданих даних: це включає кількість правильно переданих GEM-фреймів, Ethernet-кадрів і повідомлень PLOAM. Ці параметри дозволяють оцінити якість передачі трафіку через GPON-мережу.

– Помилки передачі: відстежуються кількість помилкових кадрів і фреймів, таких як GEM-фрейми, Ethernet-кадри та PLOAM-повідомлення. Це допомагає виявляти проблеми в каналі зв'язку, такі як втрати даних або порушення в синхронізації.

– Обсяг переданих даних: вимірюється кількість байтів корисного навантаження, переданого через GEM-фрейми, а також загальний обсяг бітів і кадрів, які були оброблені мережею.

– Показники помилок і корекції: включають кількість помилок на бітах, коригованих та некоригованих слів, що дозволяє оцінити ефективність алгоритмів виявлення та виправлення помилок у мережі.

На рисунку 2.6 наведено гілку GPON ONU PON Layer Realtime Statistics.

Реальні статистичні дані для ONU на рівні PON забезпечують детальний аналіз продуктивності абонентських пристроїв GPON. Ці показники охоплюють як висхідний, так і низхідний потоки даних, що дозволяє відстежувати загальну ефективність роботи мережі та швидко виявляти потенційні збої.

У висхідному напрямку збирається інформація про обсяг правильно переданих кадрів GEM, кількість коректних Ethernet-кадрів, передані байти в кадрах, а також кількість помилкових Ethernet-кадрів і помилок бітів. Крім того, ведеться облік переданих повідомлень PLOAM та OMCI, загальної кількості переданих бітів і втрат бурстів.

У низхідному напрямку аналізуються показники коректних кадрів GEM, переданих повідомлень PLOAM і OMCI. Важливими параметрами також є дані про корекцію помилок, такі як кількість виправлених і не виправлених слів, обсяг коректованих байтів і загальна кількість прийнятих слів.

Ця статистика допомагає виявити основні причини втрат даних, порушень у роботі протоколів або збоїв на рівні фізичного середовища. Таким чином, вона є ключовим інструментом для управління продуктивністю ONU та забезпечення стабільності мережі GPON.

iReasoning MIB Browser

File Edit Operations Tools Bookmarks Polls Help

Address:  Advanced... OID: .1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.3.2.2.1.1

SNMP MIBs

- zxAngponSrvObjects
  - zxAngponSrvPrfObjects
  - zxAngponSrvOltObjects
  - zxAngponSrvOnuObjects
    - zxAngponSrvOnuPerfObjects
      - zxAngponSrvOnuCurrPerfTable
        - zxAngponSrvOnuCurrPerfEntry
          - zxAngponOnuUsCorrectNidleGems**
          - zxAngponOnuUsGemPayloadBytes
          - zxAngponOnuUsCorrectEtherFrm
          - zxAngponOnuUsErrEtherFrm
          - zxAngponOnuUsPloamMsgs
          - zxAngponOnuUsOmcIMsgs
          - zxAngponOnuUsErrBits
          - zxAngponOnuUsTotalBits
          - zxAngponOnuUsCrcErrPkts
          - zxAngponOnuUsLostBursts
          - zxAngponOnuDsCorrectNidleGems
          - zxAngponOnuDsPloamMsgs
          - zxAngponOnuDsOmcIMsgs
          - zxAngponOnuReiis
          - zxAngponOnuCorrectedBytes
          - zxAngponOnuCorrectedWords
          - zxAngponOnuUncorrectedWords
          - zxAngponOnuTotalRxWords
          - zxAngponOnuUsBer
          - zxAngponOnuPerfCapability
          - zxAngponOnuCurrReset
        - zxAngponSrvOnuCurr15MinPerfTable
        - zxAngponSrvOnuCurr1DayPerfTable
        - zxAngponSrvOnuCurr15MinPerfTable

|         |   |
|---------|---|
| Name    | zxAngponOnuUsCorrectNidleGems             |
| OID     | .1.3.6.1.4.1.3902.1082.500.10.2.3.2.2.1.1 |
| MIB     | ZTE-AN-GPON-SERVICE-MIB                   |
| Syntax  | COUNTER64                                 |
| Access  | read-only                                 |
| Status  | current                                   |
| DefVal  |   |
| Indexes | ifIndex, zxAngponOnuIndex                 |

Рисунок 2.15 – Гілка GPON ONU PON Layer Realtime Statistics дерева MIB для OLT ZTE

Діагностика ліній GPON та активного мережевого обладнання є ключовим аспектом у забезпеченні стабільної роботи інтернет-мереж. Для провайдерів інтернету якість послуг безпосередньо залежить від своєчасного виявлення та усунення несправностей на мережевих лініях і пристроях, таких як GPON OLT та GPON ONU. Ефективні інструменти моніторингу та тестування дозволяють оперативно реагувати на збої, мінімізуючи час простою та покращуючи задоволеність абонентів.

Окрім завдань діагностики, інтернет-провайдери стикаються з широким спектром задач. Це включає оптимізацію роботи мережі, збільшення швидкості передачі даних, зниження затримок, впровадження нових технологій та підвищення загальної надійності інфраструктури. Важливим напрямом є також економічна ефективність мережі, адже зростання вимог до швидкості та якості послуг потребує модернізації обладнання та мережевих рішень.

### 2.3 Вирішення задачі збільшення кількості абонентів

Одним з основних завдань інтернет-провайдерів є збільшення кількості абонентів на існуючих мережевих лініях. Необхідним є пошук оптимальних технічних рішень, які дозволять уникнути фізичного розширення інфраструктури і, відповідно, додаткових витрат ресурсів. В більшості випадків для підключення додаткових користувачів є необхідність у побудові нової PON-гілки, але через відсутність магістральних волокон від OLT до найближчої точки поділу, це не завжди є можливим. Більше того, в ряді випадків виникає обмеження на прокладання додаткових магістральних кабелів через складні умови та високі витрати на їх реалізацію.

З огляду на такі обмеження, залишається кілька альтернативних способів вирішення завдання. Один з них – це збільшення коефіцієнта поділу потужності існуючої PON-мережі. Це можна досягти шляхом заміни наявних оптичних сплітерів на моделі з більшим коефіцієнтом поділу, переглянувши і перерахувавши оптичний бюджет. Таким чином, вдасться збільшити кількість абонентів на тій існуючій гілці, проте варто враховувати, що кількість можливих підключень обмежується потужністю оптичного терміналу. Наприклад, описаний раніше OLT ZTE C320 технічно підтримує підключення до 128 пристроїв.

Однак при збільшенні коефіцієнта поділу мережа може працювати на межі можливостей свого оптичного бюджету, що знижує її надійність і стабільність. У такій ситуації система може стати вразливою до зовнішніх факторів, описаних у розділі 1.7, і вимагатиме додаткових технічних налаштувань для постійної підтримки стабільного зв'язку.

Альтернативний варіант – використання трансиверів з покращеними характеристиками, зокрема, підвищеною оптичною потужністю передавача і високою чутливістю приймача (таблиця 2.5). Це дозволить компенсувати збільшення коефіцієнта поділу шляхом збільшення оптичного бюджету системи. Таким чином, можна зменшити ризик зниження якості сигналу при зростанні кількості підключених користувачів і досягти стабільної роботи мережі навіть при значному навантаженні.

Основною характеристикою оптичної системи є оптичний бюджет, важливість якого було описано у розділі 1.6. Сам оптичний бюджет визначається не тільки втратами в лінії, але й параметрами трансиверів.

Для реалізації збільшення кількості абонентів на існуючій GPON-лінії важливим етапом є аналіз ринку трансиверів, які можуть бути використані для підвищення стабільності і надійності системи при збільшенні навантаження.

На сучасному ринку представлені різні класи трансиверів, які відрізняються своїми характеристиками. Основні відмінності між цими класами полягають у значеннях потужності передавача і чутливості приймача, що визначає доступний оптичний бюджет. Найпоширенішими класами оптичних трансиверів є В+, С+ і С++.

Таблиця 2.5 – Основні відмінності GPON SFP (Class B+, C+ та C++) [63]

| Клас                                | В+ модуль  | С+ модуль  | С++ модуль  |
|-------------------------------------|--|--|---|
| Тип                                 | Одноволоконний, двонаправлений оптичний модуль, class B+ | Одноволоконний, двонаправлений оптичний модуль, class C+ | Одноволоконний, двонаправлений оптичний модуль, class C++ |
| Робочі довжини хвиль                | Tx: 1490 нм<br>Rx: 1310 нм                               | Tx: 1490 нм<br>Rx: 1310 нм                               | Tx: 1490 нм<br>Rx: 1310 нм                                |
| Довжина хвилі для КТВ               | 1550 нм  | 1550 нм  | 1550 нм   |
| Форм-фактор                         | SFP  | SFP  | SFP   |
| Швидкість даних за технологією GPON | Tx: 2,488 Gbit/s<br>Rx: 1,244 Gbit/s                     | Tx: 2,488 Gbit/s<br>Rx: 1,244 Gbit/s                     | Tx: 2,488 Gbit/s<br>Rx: 1,244 Gbit/s                      |
| Мін/Макс вихідна оптична потужність | 1,5-5 дБм  | 3-7 дБм  | 6-10 дБм  |
| Максимальна чутливість приймача     | -28 дБм  | -32 дБм  | -35 дБм   |
| Тип оптичного конектора             | SC/PC  | SC/PC  | SC/UPC  |
| Тип оптичного волокна               | Single-mode  | Single-mode  | Single-mode   |
| Робоча відстань                     | 20 км  | 20 км  | 20 км   |
| Середня потужність прийому          | -8 дБм   | -8 дБм   | -15 дБм   |
| Коефіцієнт згасання                 | 8,2 дБ   | 8,2 дБ   | 8,2 дБ  |

Окремо варто зазначити, що окрім зазначених в таблиці, існують також С+++ модулі з більшою загальною продуктивністю (рисунок 1.25). Фактично, це трансивери класу С++ із збільшеною чутливістю приймача та збільшеною потужністю передавача.

На рисунку 2.16 зображено інформацію щодо реальної оптичної потужності модулів, отриманої засобами апаратної діагностики GPON OLT SFP. Перше значення оптичної потужності (6,3 дБм) відповідає оптичному трансиверу С++, встановленому на «короткій» GPON-гілці. Друге значення вказує на рівень

потужності трансивера класу C+++, що встановлений на «довгій» гілці GPON.

```
wat31-zte320#
wat31-zte320#show pon power olt-tx gpon-olt_1/2/3
Tx power: 6.307 (dbm)
wat31-zte320#show pon power olt-tx gpon-olt_1/2/4
Tx power: 7.992 (dbm)
wat31-zte320#
```

Рисунок 2.16 – Виведення реальних значень потужності встановлених GPON SFP OLT-модулів

Зменшення оптичної потужності з часом пов'язано з тим, що характеристики напівпровідникових лазерів можуть погіршуватися в процесі експлуатації. Зазвичай деградація характеризується збільшенням порогового струму, що супроводжується зниженням зовнішньої диференціальної квантової ефективності [57].

Домінуючий механізм, відповідальний за деградацію, визначається одним або кількома процесами виготовлення, включно з епітаксією, обробкою пристрою і склеюванням. Крім того, швидкість деградації лазерів залежить від умов експлуатації, а саме – робочої температури і струму інжекції.

Механізми деградації можна розділити на три категорії:

1. утворення дефектів в активній ділянці;
2. катастрофічне пошкодження дзеркала при високій потужності;
3. деградація струмообмежувальних переходів [5].

Катастрофічна деградація через пошкодження дзеркала зазвичай відбувається під час імпульсної роботи на високій потужності. Поверхня кристала являє собою недосконалу решітку з безліччю обірваних зв'язків, які поглинають домішки з повітря. Ці поглинені домішки утворюють дефектні ділянки, які викликають надлишкове оптичне поглинання. Коли оптична інтенсивність на грані лазера перевищує певне критичне значення, локалізоване тепло на грані дзеркала може бути досить великим, щоб спричинити плавлення і, отже, зруйнувати грань [5].

Саме тому, при проектуванні GPON-мережі необхідно розраховувати оптичний бюджет із запасом, з урахуванням фактору деградації оптичних модулів. При зміні та модернізації існуючих GPON-мереж важливим є перерахунок оптичного бюджету з урахуванням наявних показників потужності передавачів та чутливості приймачів GPON SFP модулів.

## 2.4 Розрахунок оптичного бюджету в існуючих PON-лініях

В реальних ситуаціях роботи мережевих провайдерів оптичний бюджет постійно змінюється і перераховується в залежності від додання або зміни абонентів. Саме тому нижче наводиться абстрактний приклад розрахунку оптичного бюджету.

Таблиця 2.6 – Результати вимірів ВОЛЗ і параметри C++ SFP модуля [57]

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| джерело світла                   | DFB лазер |
| тип волокна                      | G652      |
| робоча довжина хвилі             | 1310 нм   |
| мінімальна потужність передавача | -14,5 дБм |
| чутливість приймача              | - 30 дБм  |
| фактор флуктуації                | 0,2 дБ    |
| динамічний діапазон              | 18 дБ     |
| втрати конекторів                | 0,5 дБ    |
| втрати з'єднань (механічних)     | 0,3 дБ    |
| число конекторів                 | 1         |
| число зварених з'єднань          | 5         |
| довжина ділянки                  | 5,8 км    |

Поетапний розрахунок енергетичного потенціалу:

- 1) потужність генеруєма у волокно  $P_F = -14,5$  дБм;
- 2) посилення системи  $P_A = (-14,5 \text{ дБм}) - (-30 \text{ дБм}) = 15,5$  дБм;
- 3) фактор середовища  $F_M = 2,1$  дБ,  
фактор старіння  $F_O = 1$  дБ,  
фактор ремонту  $F_R = 0,5$  дБ,  
фактор помилок проекту  $F_E = 1$  дБ,  
фактор флуктуації  $F_F = 0,2$  дБ;

Таким чином,

Запас надійності  $M_S = 2,1 \text{ дБ} + 1 \text{ дБ} + 0,5 \text{ дБ} + 1 \text{ дБ} + 0,2 \text{ дБ} = 4,8$  дБ;

4) енергетичний потенціал  $P_E = 15,5 \text{ дБ} - 4,8 \text{ дБ} = 10,7$  дБ;

5) загальні втрати конекторів  $L_T = 1 * 0,5 \text{ дБ} = 0,5$  дБ;

6) загальні втрати з'єднань  $F_S = 5 * 0,3 \text{ дБ} = 1,5$  дБ;

7) інших втрат немає;

8) максимально припустиме загасання кабелю  $L_P = 10,7 \text{ дБ} - 1,5 \text{ дБ} - 0,5 \text{ дБ} = 8,7$  дБ;

9) максимальне нормалізоване загасання кабелю в діапазоні 1310нм  $M_N = 8,7 \text{ дБ} / 5,8 \text{ км} = 1,5$  дБ/км;

10) рівень прийнятого сигналу  $P_R = -14,5 \text{ дБ} - 0,5 \text{ дБ} - 1,5 \text{ дБ} = -12,5$  дБм.

Цей результат розрахунків показав, що лінія буде працювати з достатнім рівнем запасу енергетичного потенціалу і знаходитися в діапазоні значень мінімального й максимального значення чутливості приймача.

Існують також інші варіанти розрахунку оптичного бюджету лінії, але усі вони мають однакову сутність. Нижче наведено алгоритм від компанії Cisco [20].

За цим алгоритмом, першим кроком у розрахунку бюджету оптичної потужності є визначення кількості світла, доступного для самих електронних пристроїв. Отримуються два виміри від виробника обладнання. Мінімальна потужність передачі являє собою найгіршу потужність передачі для пристрою – пристрій гарантовано забезпечує принаймні таку потужність. Варто зазначити, що деякі виробники вказують «середню мінімальну потужність передачі». Але

середня мінімальна потужність не гарантує, що пристрій буде працювати з такою потужністю. Будьте обережні, купуючи продукти на основі середніх значень.

Інший необхідний параметр – це мінімальна чутливість прийому. Цей показник відображає мінімальну кількість світла, необхідну приймачу для коректної роботи і розпізнання. В цьому випадку використовується фактичний мінімум, а не середнє значення мінімумів.

При наявності даних про мінімальну потужність випромінювання і мінімальну чутливість прийому, можна розрахувати доступний оптичний бюджет. Для цього необхідно відняти мінімальну чутливість прийому від мінімальної потужності передачі (доступне світло = мінімальна потужність передачі – мінімальна чутливість прийому). Мінімальна чутливість прийому зазвичай є від'ємним числом, наприклад, -33 дБм. Якщо пристрій має мінімальну потужність передачі -10 дБм і мінімальну чутливість прийому -33 дБм, доступна потужність буде дорівнювати  $-10 \text{ дБм} - (-)33 \text{ дБм} = 23 \text{ дБм}$  або  $-10 \text{ дБм} + 33 \text{ дБм} = 23 \text{ дБм}$ .

Таблиця 2.7 – Вихідні дані для розрахунків [20]

| <b>Device 1</b> |        | <b>Device 2</b> |        |
|-----------------|--------|-----------------|--------|
| Min Tx Power    | -3dBm  | Min Tx Power    | -1dBm  |
| Min Rx Sens.    | -32dBm | Min Rx Sens.    | -31dBm |

| <b>Budget 1</b> |              | <b>Budget 2</b> |              |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| Device 1 Tx     | -3dBm        | Device 2 Tx     | -1dBm        |
| Device 2 Rx.    | -31dBm       | Device 1 Rx.    | -32dBm       |
| Available Power | <b>28 dB</b> | Available Power | <b>29 dB</b> |

При підключенні пристроїв різних виробників або різних моделей продуктів одного виробника, розрахунок доступної потужності виконується в обох напрямках. При цьому, для решти розрахунків використовується менша з двох величин. Наприклад, виконується підключення двох пристроїв, позначених як «Пристрій 1» і «Пристрій 2». Пристрій 1 має мінімальну потужність передачі -3 дБм і мінімальну чутливість прийому -32 дБм, а Пристрій 2 має мінімальну потужність передачі -1 дБм і чутливість прийому -31 дБм. Доступна потужність, що передається від Пристрою 1 до Пристрою 2, буде розраховуватися за формулою  $-3 \text{ дБм} - (-)31 \text{ дБм}$  і дорівнює 28 дБ. Доступна потужність, що передається від Пристрою 2 до Пристрою 1, буде розрахована за формулою  $-1 \text{ дБм} - (-)32 \text{ дБм}$ , що дорівнює 29 дБ. У напрямку від Пристрою 1 до Пристрою 2 кількість світла менша, а тому буде використовуватись саме це значення для розрахунків. Від доступної потужності віднімаються усі втрати. Ці втрати включають загасання кабелю, втрати в роз'ємах і з'єднаннях. Загасання кабелю часто є найбільш значущим фактором втрат. Загасання кабелю визначається шляхом отримання точного числа з кабелю, що встановлюється, або за допомогою найгіршого числа виробника для типу волокна. Це число буде в діапазоні від 0,22 дБ до 0,5 дБ на кілометр. Цей коефіцієнт множиться на довжину лінії. Наприклад, оптоволокно з втратами 0,4 дБ на кілометр втратить 16 дБ на відстані 40 км.



Оптоволокно не поставляється в котушках по 40 км, а тому 40-кілометрова лінія матиме кілька з'єднань. Кожне з'єднання, як правило, вносить 0,1 дБ додаткових втрат. Монтажники оптоволокна можуть надати гарантоване найгірше число втрат, яке множиться на кількість з'єднань. З'єднувачі – ще одне джерело оптичних втрат. Типова структура для великих відстаней має шість роз'ємів. Перший з'єднує волокно з електронікою. Цей роз'єм зазвичай знаходиться на оптоволокні, що прокладається всередині приміщення. Це волокно з'єднує приміщення для обладнання з входом в будівлю для зовнішнього (підземного або повітряного) оптоволоконного кабелю. На цьому кінці внутрішнього кабелю є один роз'єм, і ще один на зовнішньому. Це повторюється на іншому кінці мережі, загалом наявні шість роз'ємів. Однак структура мережі може відрізнятись, тому точну кількість необхідно визначати.

Втрати в роз'ємах передбачені виробником роз'ємів та інсталятором. Для того, щоб отримати загальну кількість втрат у роз'ємах, необхідно помножити кількість роз'ємів на втрати для кожного роз'єму. Потім кожна з цих втрат, загасання кабелю, втрати в роз'ємах і втрати в з'єднувачах віднімаються від доступної потужності. Якщо це число від'ємне, немає необхідності продовжувати, оскільки потужності недостатньо для роботи мережі. Якщо це число додатне, є ще два моменти, які враховуються, перш ніж оголосити мережу придатною для експлуатації. Правильна інсталяція передбачає можливість пошкодження кабелю і враховує її в бюджеті на електроенергію. Зазвичай оцінюється кількість очікуваних ремонтів протягом терміну служби оптоволокна. Ці ремонти збільшать втрати на з'єднаннях, тому необхідно помножити кількість очікуваних з'єднань на втрати на кожному з них і відняти його від потужності, що залишилася. Число все одно має бути додатним.

Необхідно також враховувати екстремальні температури, погодні умови, а також будь-які інші непередбачувані фактори. Зазвичай це робиться шляхом визначення «коефіцієнта безпеки». Це число буде різним для кожної організації в залежності від того, який ризик вони хочуть взяти на себе в своїй мережі. Зазвичай використовується значення близько 3 дБ. Щоб гарантувати безпомилкову роботу, слід використовувати значення не менше 1,7 дБ. Цей коефіцієнт безпеки віднімається від потужності, що залишилася. Якщо після всього цього число залишається додатним, то оптоволоконна мережа буде забезпечувати необхідну продуктивність протягом усього терміну експлуатації.

Таблиця нижче містить деякі типові числа, які можна використовувати для приблизних розрахунків бюджету оптичного каналу. Якщо це можливо, слід використовувати реальні виміряні значення з мережі.

Таблиця 2.8 – Типові значення для розрахунку оптичного бюджету [20]

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| TIA standard for connector loss     | .75 dB |
| Typical cable attenuation at 1310nm | .4 dB  |
| Typical cable attenuation at 1550nm | .3 dB  |
| Typical splice attenuation          | .1 dB  |
| Typical distance between splices    | 6km    |
| Typical safety margin               | 3 dB   |



Розрахунок оптичного бюджету за цим алгоритмом наведено на рисунку 2.17.

| <b>Optical Budget Calculator</b> |                |   |                             |                     |                      |
|----------------------------------|----------------|---|-----------------------------|---------------------|----------------------|
|                                  |                |   | Minimum Transmit Power      |                     | -10 dBm              |
|                                  |                |   | Minimum Receive Sensitivity | -                   | -33 dBm              |
|                                  |                |   | <b>Available Power</b>      | =                   | <b>23 dB</b>         |
| <u>20</u>                        | Km of cable    | X | <u>.5 dB</u>                | dB/km               | = <u>10 dB</u>       |
| <u>6</u>                         | Connectors     | X | <u>.75 dB</u>               | dB/Con.             | = <u>4.5 dB</u>      |
| <u>4</u>                         | Splices        | X | <u>.1 dB</u>                | dB/splice           | = <u>.4 dB</u>       |
|                                  |                |   |                             | Link Margin         | = <u>8.1 dB</u>      |
| <u>5</u>                         | Repair Splices | X | <u>.1dB</u>                 | dB/Splice           | = <u>.5 dB</u>       |
|                                  |                |   |                             | Safety Margin       | - <u>3 dB</u>        |
|                                  |                |   |                             | <b>Excess Power</b> | <b><u>4.6 dB</u></b> |

Рисунок 2.17 – Приклад розрахунку оптичного бюджету [20]

Схожим чином проводився перерахунок оптичного потенціалу для реальних GPON-ліній, описаних в розділі 1.10. До перерахунку на лініях використовувалися оптичні трансивери класу C+, а після перерахунку, відповідно до отриманих значень, було прийнято рішення збільшити продуктивність мережі шляхом встановлення більш потужних модулів класу C++ та C+++.

Теоретично, використання модулів з максимальною потужністю та максимальною чутливістю мало задовольнити вирішення проблеми збільшення кількості абонентів, описаної в розділі 2.3 цієї роботи. Але на практиці такі зміни призвели до наступної проблеми. При підключенні нових абонентських пристроїв ONU до «короткої лінії» – вони не реєструються і не встановлюються у зв'язок з OLT. При спробі підключення нових ONU до «довгої» гілки з більш потужними трансиверами проблема не була виявлена.

Було виконано діагностику «короткої» оптичної лінії, описану в розділах 2.1–2.2. Було перевірено цілісність оптоволоконної гілки, якість зварювання, справність конекторів і зроблено висновок, що це проблема не механічного характеру. Саме тому, було прийнято рішення зняти рефлектограми.

## 2.5 Аналіз рефлектограм існуючих ліній PON

Зняття рефлектограм існуючих гілок було виконано методом OTDR, описаним у розділі 2.1. Для цього було використано оптичний рефлектометр виробництва Гамма Лайт (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18 – Оптичний рефлектометр Гамма Лайт [60]

Характеристики використаного рефлектометра:

- ударостійкий корпус з металу;
- функція визначення активного волокна;
- ємний акумулятор забезпечує 6 годин безперервної роботи;
- РК-екран з роздільною здатністю 320 x 240 і високим контрастом;
- вбудована пам'ять на 128 результатів вимірювань;
- синхронізація з ПК по USB; зручне оригінальне програмне забезпечення «Visa Viewer X-PRO»;
- Ni-MH акумулятори типу AA;
- вбудований зарядний пристрій ~220 В, 50-60 Гц;
- лазерне джерело випромінювання VFL 650 нм встановлюється у вигляді додаткової опції [60].

Функціональні можливості рефлектометра Гамма Лайт:

- визначення розподілу втрат уздовж маршруту ВОЛЗ і виявлення дефектних ділянок або елементів лінії зв'язку;
- визначення точного розташування дефектних ділянок або обривів ВОЛЗ;
- оцінка повних втрат у волоконно-оптичній лінії зв'язку під час приймання лінії та періодичного тестування;
- вимірювання середніх втрат у світловоді на котушках, рівномірності розподілу втрат у волокні та виявлення наявності локальних дефектів під час виробництва оптичного волокна;
- вимірювання втрат у будь-яких типах (механічних або зварних) з'єднань;
- виявлення поступового або раптового погіршення якості волокна за допомогою порівняння його характеристик з результатами більш ранніх тестів;
- збереження в енергонезалежній пам'яті результатів тестів з можливістю їхнього перегляду та подальшої передачі на ПК [60].

За допомогою цього рефлектометра було знято дві рефлектограми в діапазонах 1310 нм та 1550 нм – для «короткої» (рисунки 2.19 – 2.20) та для «довгої» гілки (рисунки 2.21 – 2.22).

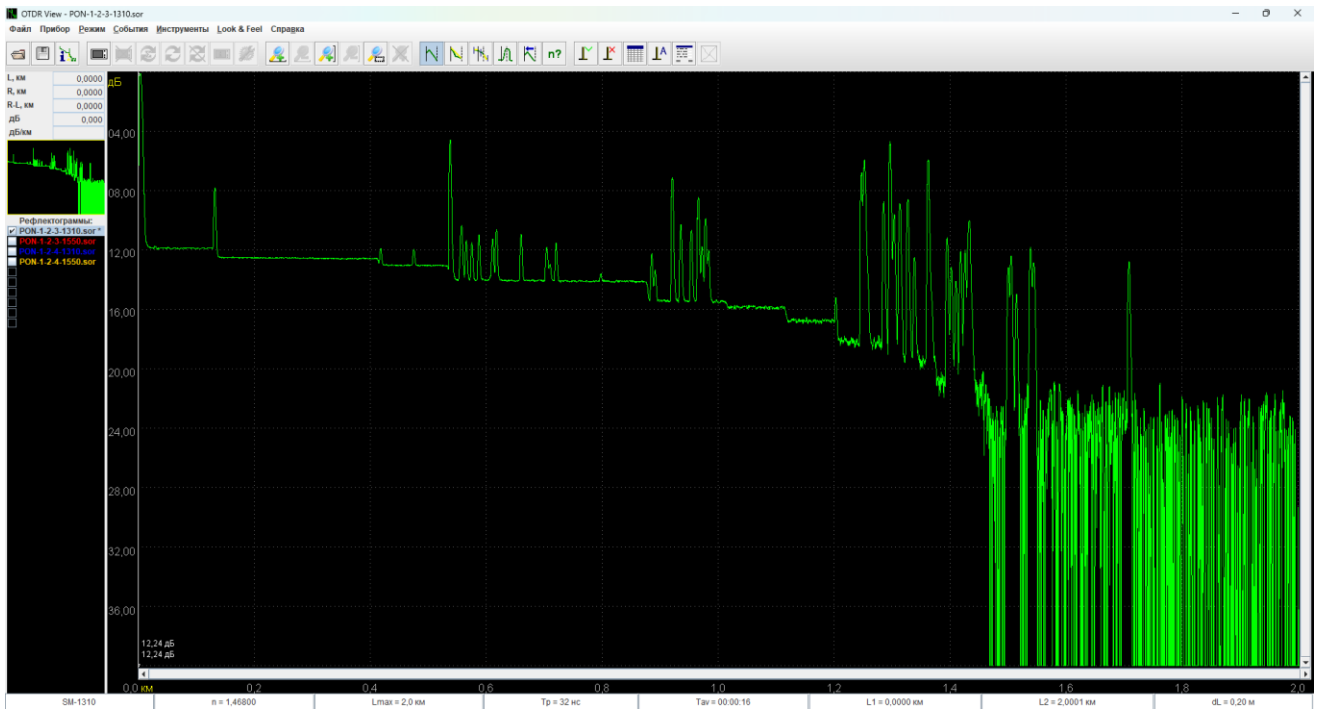


Рисунок 2.19 – Рефлектограмма «короткой» гілки у діапазоні 1310 нм

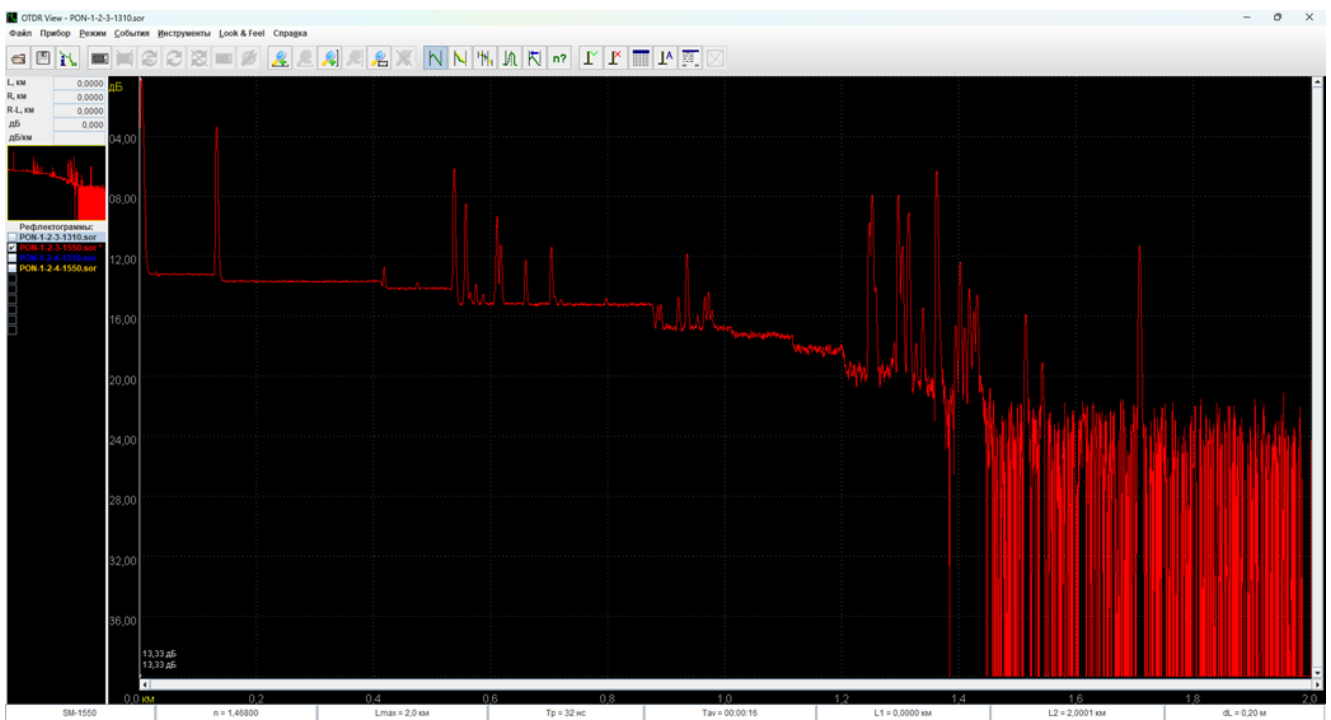


Рисунок 2.20 – Рефлектограмма «короткой» гілки у діапазоні 1550 нм

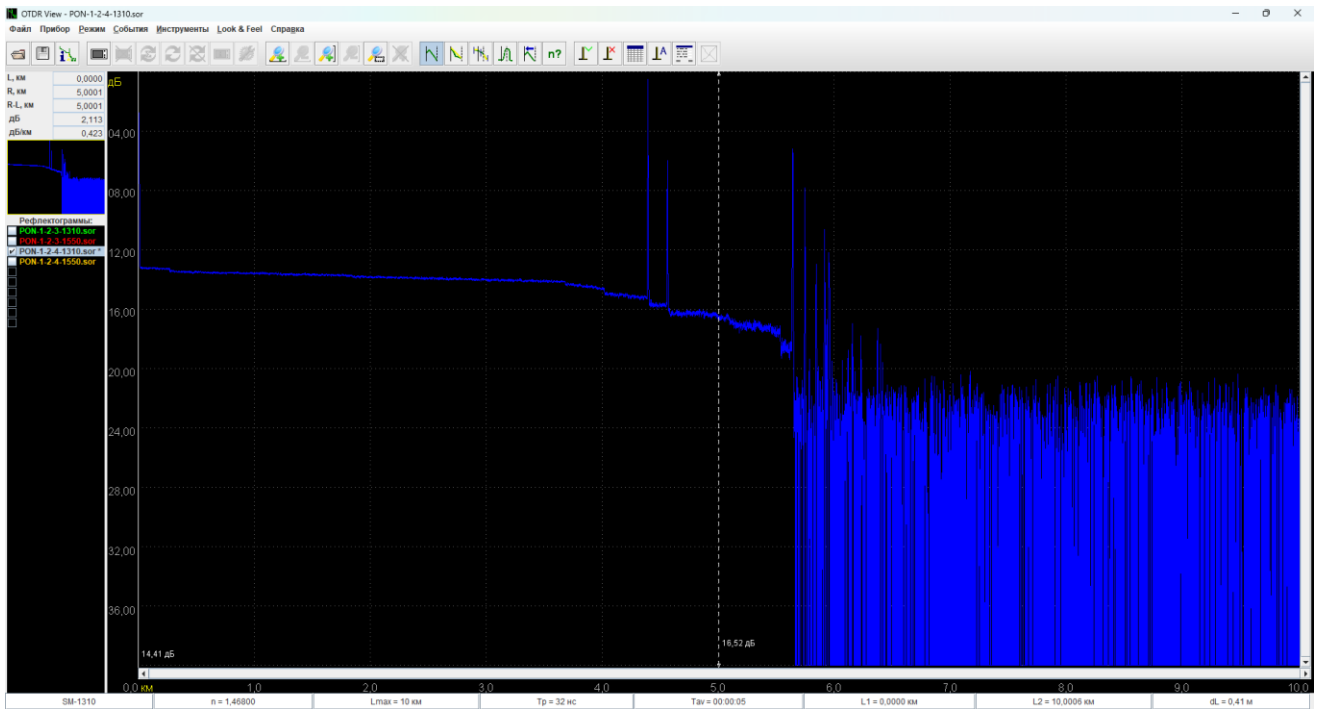


Рисунок 2.21 – Рефлектограма «довгої» гілки у діапазоні 1310 нм

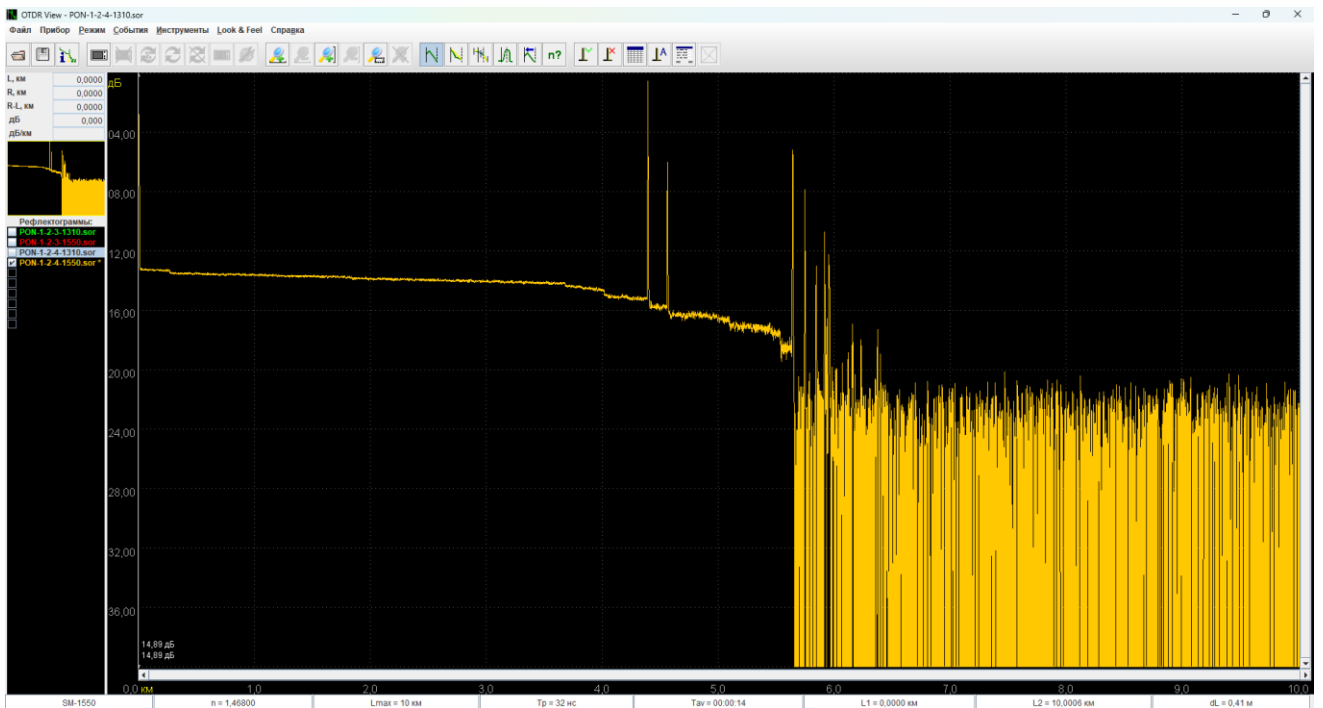


Рисунок 2.22 – Рефлектограма «довгої» гілки у діапазоні 1310 нм

До опису подій варто окремо наголосити на тому, що якщо знімати рефлектограму з ділянки ВОЛЗ кабелю, де активним обладнанням є медіаконвертори, SFP-трансивери або інше ЕТН-обладнання, то в такій ВОЛЗ системі є тільки два пристрої СО/СРЕ. А у разі зняття рефлектограми з ділянки PON – в ній може бути активне обладнання як на початку, так і безліч активних абонентів посередині будівельної довжини кабелю, які ввімкнуті з дільника на різній відстані до кожної квартири або будинку. В такому випадку події на такій рефлектограмі (наприклад, події френелівського розсіювання) знаходяться не в самому волокні, а за відгалужувачем або дільником. Отже, до таких подій на

рефлектограмі варто ставитися не як до подій у волокні, що перебувають на певній відстані, а як до подій з величиною зворотного відбиття. Оскільки саме зворотні відбиття є головною метою дослідження в цій роботі.

Будь-яка рефлектограма складається з подій. Приклади таких подій вказані в розділі 1.7 цієї роботи. В рефлектограмах, що представлені вище, наявна величезна кількість подій. Кожна подія являє собою або механічні з'єднання, або з'єднання від полірувань кінцевих користувацьких пристроїв. Через те, що кожен абонент знаходиться на різній відстані та підключений із своєю специфікою, детальний опис кожної події не є доцільним. Саме тому, при описі рефлектограм будуть визначені лише найважливіші події, що можуть внести певний вклад у працездатність та надійність (стійкість) PON-гілки.

Варто зазначити, що програмне забезпечення для роботи з рефлектограмами, наприклад OTDR View, має функцію автоматичної розстановки міток подій. Але через те, що надані вище рефлектограми GPON-ліній візуально мають дуже велику кількість подій, будуть описані лише основні з них.

На рисунках 2.23 та 2.24 зображено рефлектограму «короткої» гілки у діапазонах 1310 нм і 1550 нм відповідно з умовними позначеннями.

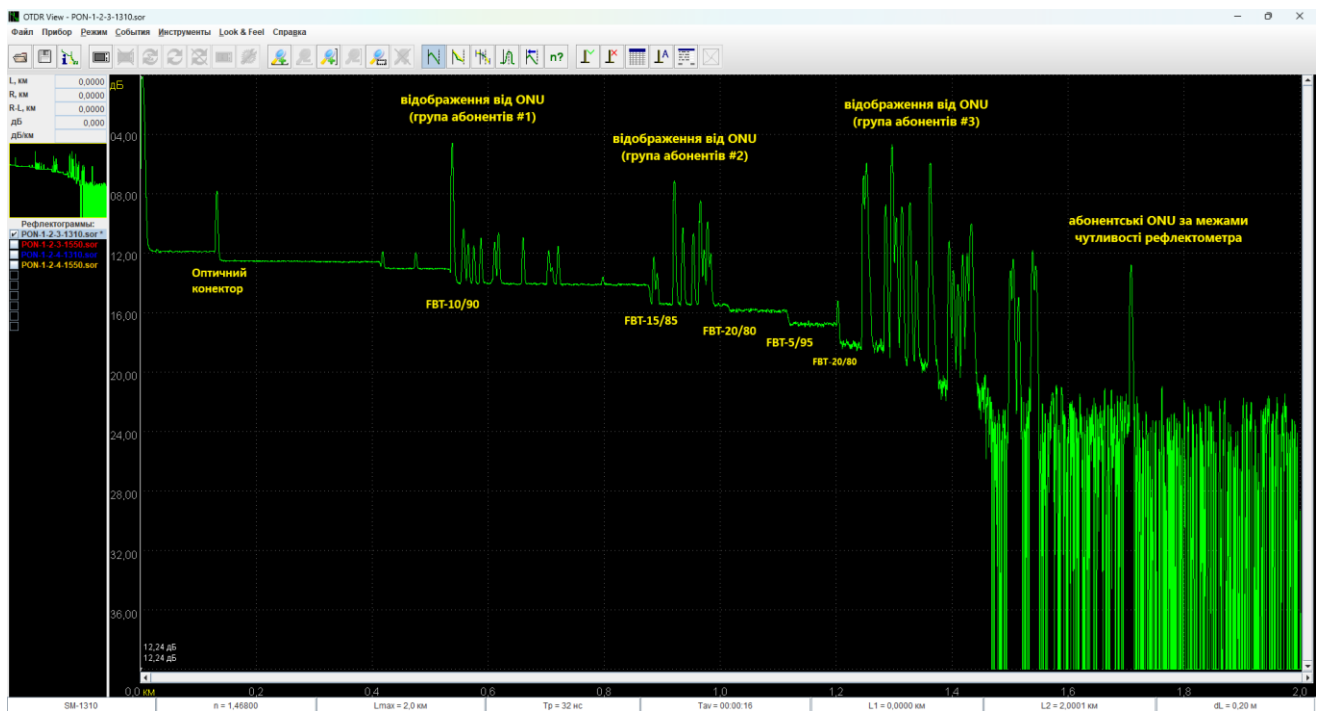


Рисунок 2.23 – Аналіз рефлектограми «короткої» гілки у діапазоні 1310 нм

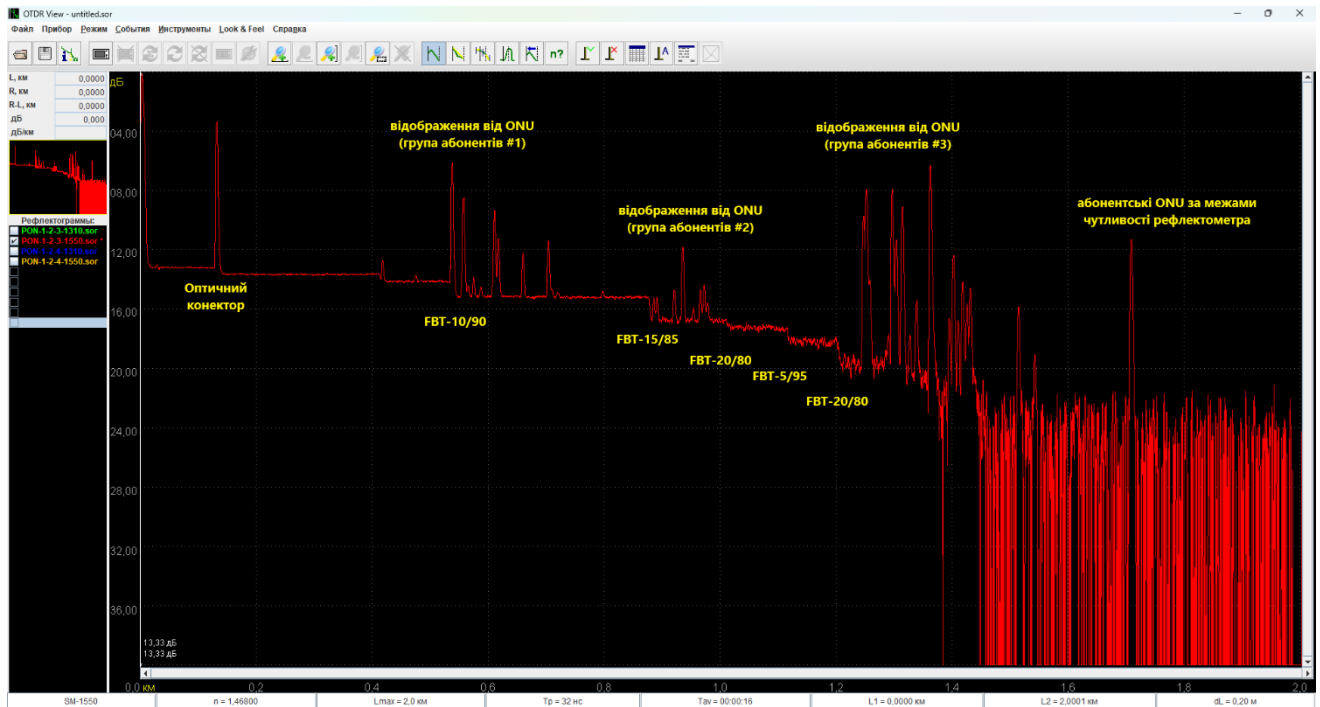


Рисунок 2.24 – Аналіз рефлектограми «короткої» гілки у діапазоні 1550 нм

Ця рефлектограма представлена наступними подіями. Перша подія – це механічне з'єднання на відстані 130 метрів (оптичний конектор). Далі – 3 групи подій, де наявна велика кількість зворотних відображень:

- 1 група знаходиться на відстані 540 м;
- 2 група знаходиться на відстані 920 м;
- 3 група знаходиться на відстані 1,3 км.

Групи визначаються наявними в лінії абонентськими пристроями ONU, від модулів яких відбивається світло. Відстань зазначено по максимальному рівню події. Найбільші за рівнем відображення є сумою відображень від декількох абонентських ONU, що знаходяться на однаковій відстані від OLT. Подальші абонентські ONU знаходяться за межами можливої чутливості рефлектометра і визначені нечітко. На видимому проміжку рефлектограми (приблизно до 1,45 км) можна спостерігати велику кількість оптичних зворотних відбиттів, що можуть впливати на якість зв'язку. Кількість оптичних відображень на рефлектограмі GPON-лінії, у порівнянні з будь-якою рефлектограмою Ethernet-лінії, є величезною. Саме це спричинює втрати сигналу і заважає абонентським пристроям реєструватися в мережі.

На рисунках 2.25 та 2.26 зображено рефлектограму «довгої» гілки у діапазонах 1310 нм і 1550 нм відповідно з умовними позначеннями.

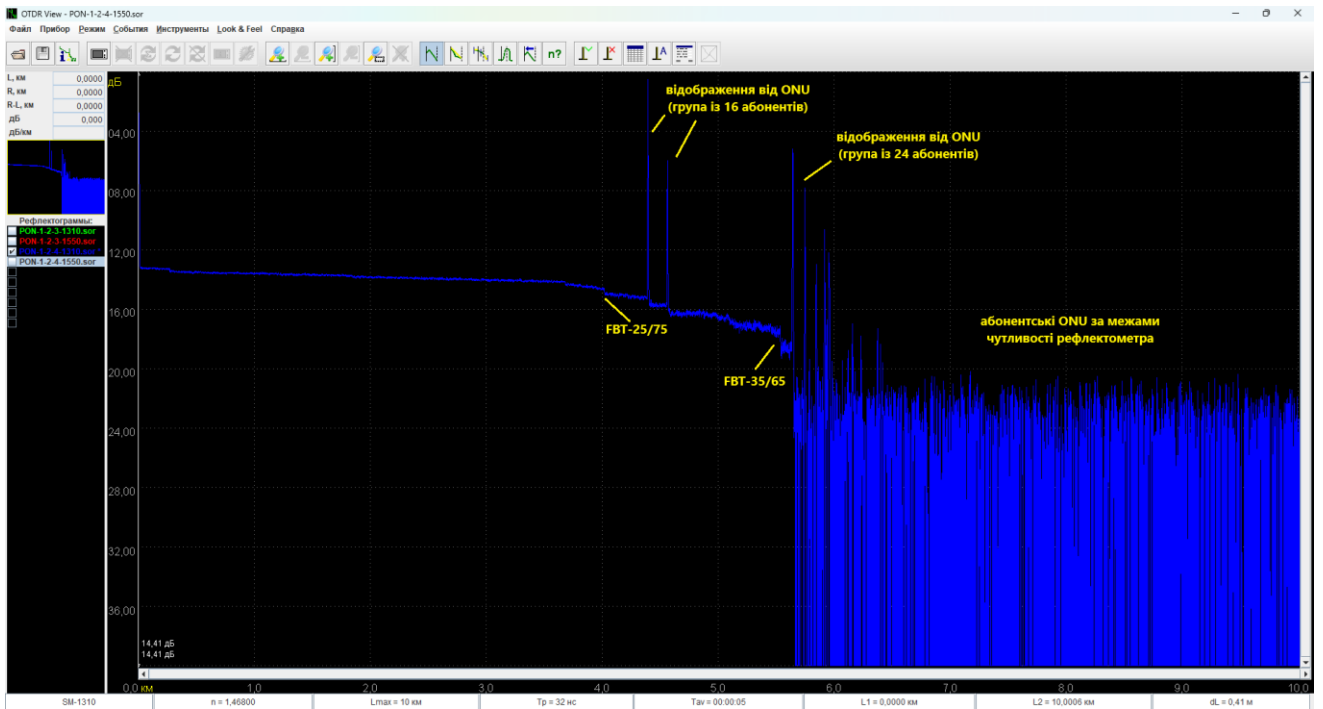


Рисунок 2.25 – Аналіз рефлектограми «довгої» гілки у діапазоні 1310 нм

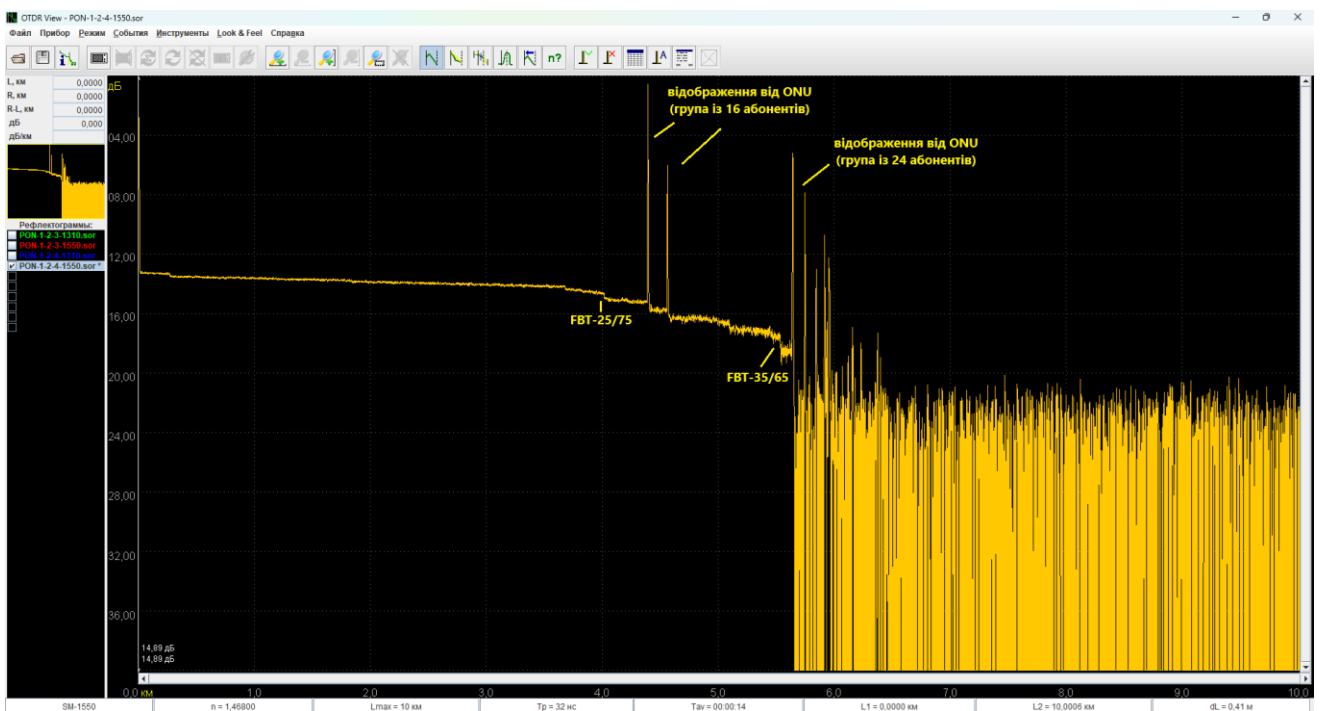


Рисунок 2.26 – Аналіз рефлектограми «довгої» гілки у діапазоні 1550 нм

На описаній рефлектограмі можна виділити дві групи подій:

- 1 група знаходиться на відстані 4,4 км;
- 2 група знаходиться на відстані 5,6 км.

Можна спостерігати, що через досить велику відстань між ONU і OLT, кількість оптичних зворотних відображень набагато менша, ніж на рефлектограмі «короткої» гілки. Оптичні відображення затухають з відстанню і вже не розпізнаються OLT як реальний сигнал. На рисунках позначені дві великі групи абонентських ONU, від яких відбивається світло. Через те, що відстань між ONU набагато менша, ніж відстань між ONU і OLT, відбиття від груп ONU сумуються



між собою і на рефлектограмі можна спостерігати короткі, але високі за рівнем відображення. Саме через наявність великої фізичної відстані між ONU та OLT в «довгій» гілці, оптичні зворотні відображення не вносять великого спотворення сигналу, як це було на рефлектограмі «короткої» гілки.

У результаті опису двох рефлектограм можна зробити висновок, що в першій рефлектограмі усі групи подій, що стосуються френелівського розсіювання (механічні з'єднання) знаходяться поряд, на відстані від 540 м до 1,3 км від OLT, а в другій рефлектограмі ці події знаходяться на відстані понад 4 км, що є значно більшим. Через те, що оптичні відображення виникають далеко від OLT і загасають разом із корисним сигналом (корисний сигнал сам по собі вищий за рівнем ніж ORL), то вони перестають негативно впливати на якість передавання даних у лінії.

### **Висновки за розділом**

У другому розділі випускної роботи магістра було описано способи тестування якості GPON-лінії зовнішніми вимірювальними приладами, а саме – методом OCWR та OTDR. Перевагою метода OTDR є можливість вимірювати зворотне релеївське розсіювання та френелівське відбиття окремо, дозволяючи OTDR визначати як загальний рівень ORL в оптичному волокні, так і конкретну подію відбиття.

Було також описано способи діагностики GPON OLT та GPON ONU вбудованими апаратними засобами. Так, технологія DDM дозволяє мережевому адміністратору контролювати ключові параметри оптичних трансиверів, такі як температура, напруга живлення, струм зміщення лазера та інші. Для контролю стану ONU через OLT використовується протокол OMCI, що забезпечує управління конфігурацією, продуктивністю, безпекою та виявлення несправностей. Було розглянуто спосіб взаємодії мережевого адміністратора з OLT за допомогою протоколу управління мережею SNMP. Було наведено та описано основні змінні MIB з відповідними ідентифікаторами OID, що відповідають за управління і діагностику OLT ZTE C320. Було наведено приклади перегляду цих даних за допомогою MIB-браузера.

Окрім мережевої діагностики, інтернет-провайдери стикаються з широким спектром задач, однією з яких є задача збільшення кількості абонентів на існуючих мережевих лініях. Для цього перш за все виконується перерахунок оптичного бюджету і проводиться аналіз наявного мережевого обладнання на відповідність характеристик. У роботі наведено приклади розрахунку оптичного бюджету в PON-лініях. В описаних GPON-мережах після перерахунку оптичної потужності було використано більш потужні оптичні трансивери. Теоретично, використання модулів зі збільшеною потужністю та чутливістю мало задовольнити вирішення проблеми збільшення кількості абонентів, але на практиці виникла проблема відсутності зв'язку ONU з OLT на коротких GPON-лініях. Методом експериментальних досліджень було з'ясовано, що на більш протяжних лініях ця проблема не спостерігається. Для аналізу цього явища було знято рефлектограми існуючих PON-гілок.



У результаті аналізу рефлектограм було зроблено висновок, що причиною відсутності зв'язку ONU з OLT на «короткій» гілці була наявність великої кількості оптичних відображень. На «довгій» GPON-лінії проблема була відсутня через те, що оптичні відображення виникають далеко від OLT і загасають разом із корисним сигналом, а тому не мають високого впливу на якість з'єднання.

|  |      |             |        |      |                            |      |
|--|------|-------------|--------|------|----------------------------|------|
|  |      |             |        |      | КНУ.РМ.123.24.06.02.ПЗОБМГ | Арк. |
|  | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                            |      |

### 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ОПТИЧНИХ ЗВОРОТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ НА НАДІЙНІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ В GPON-МЕРЕЖІ

Для моделювання об'єкта ORL використано метод імітаційного моделювання, який представляє собою експериментальне дослідження реальної системи через її модель. Цей підхід поєднує риси експериментального методу та використання можливостей, які надає обчислювальна техніка. Увага акцентується на експериментальній природі імітації, здійснюється експеримент із моделлю. В імітаційному моделюванні важливу роль відіграє не тільки проведення, але й планування експерименту на моделі. Об'єктом дослідження є явище оптичного зворотного відбиття, і його вплив на якість передачі даних.

Необхідність використовувати метод математичного моделювання виникла через те, що якщо використовувати практичну модель, то в цій моделі можливо зробити вимір лише реального значення параметра ORL і, відповідно, одержати відстань до місць в оптичному кабелі, де наявні проблеми.

Але створити процес впливу цих параметрів на сигнал оптичного трансиверу, процес додавання цих сигналів у зв'язку із внесенням їх у тракт приймання, а також аналіз наслідків цього явища є неможливим. Це вимагає наявності спеціального устаткування й додаткових вимірювальних приладів.

Мета дослідження – вивчити реальну систему, розробити логіко-математичну модель реальної системи. Імітаційний характер дослідження припускає наявність логіко- або логіко-математичних моделей, які описують досліджуваний процес. Нижче реальна система визначається як сукупність взаємодіючих елементів, що функціонують у часі (рисунок 3.1).

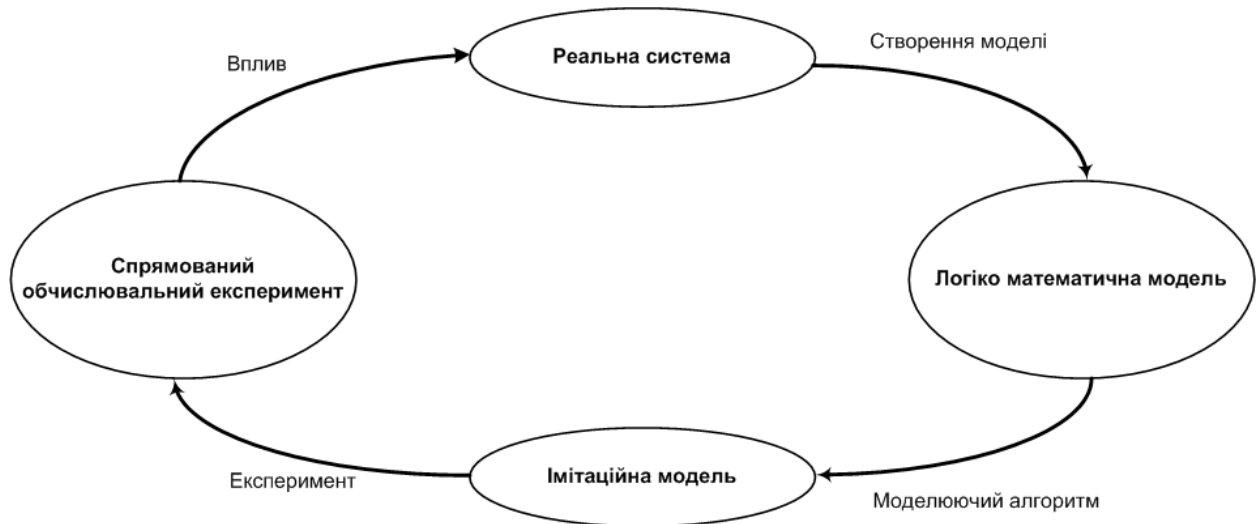


Рисунок 3.1 – Процес імітаційного дослідження ORL

|  |           |             |        |      |                                 |       |         |
|--|-----------|-------------|--------|------|---------------------------------|-------|---------|
|  |           |             |        |      | КНУ.РМ.123.24.06.03.ММВОЗВНПДGM |       |         |
| Змн.   | Арк.      | № документа | Підпис | Дата |                                 |       |         |
| Розробив   | Кондрашов |             |        |      | Літера                          | Аркуш | Аркушів |
| Перевірив  | Чубаров   |             |        |      |                                 |       |         |
| Н.контроль   | Кузнецов  |             |        |      | КІ-23м                          |       |         |
| Затвердив  | Купін     |             |        |      |                                 |       |         |
| МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ<br>ВПЛИВУ ОПТИЧНИХ ЗВОРОТНИХ<br>ВІДОБРАЖЕНЬ НА НАДІЙНІСТЬ<br>ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ В GPON-<br>МЕРЕЖІ |           |             |        |      |                                 |       |         |

Складений характер складної системи описує вираз її моделі у вигляді трьох множин:  $y_b(x)$ ,  $ORF(x)$ ,  $S1(x)$ ,  $x$ , де  $y_b(x)$  та  $ORF(x)$  – множина досліджуваних елементів (в даному випадку це вхідний сигнал трансиверу, який надходить до оптичної лінії);  $S1(x)$  – множина припустимих зв'язків між елементами (структура моделі);  $x$  – множина розглянутих моментів часу.

Для створення математичної моделі було використано середовище Mathcad 15.0.

1) Задано математичну модель вхідного сигналу (формула 3.1).

$$y_b(x) := \begin{cases} (0) & \text{if } 0 \leq x \leq 3 \\ 1 & \text{if } 3 < x \leq 6 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.1)$$

На рисунку 3.2 зображено графік одного періоду заданого вхідного сигналу.

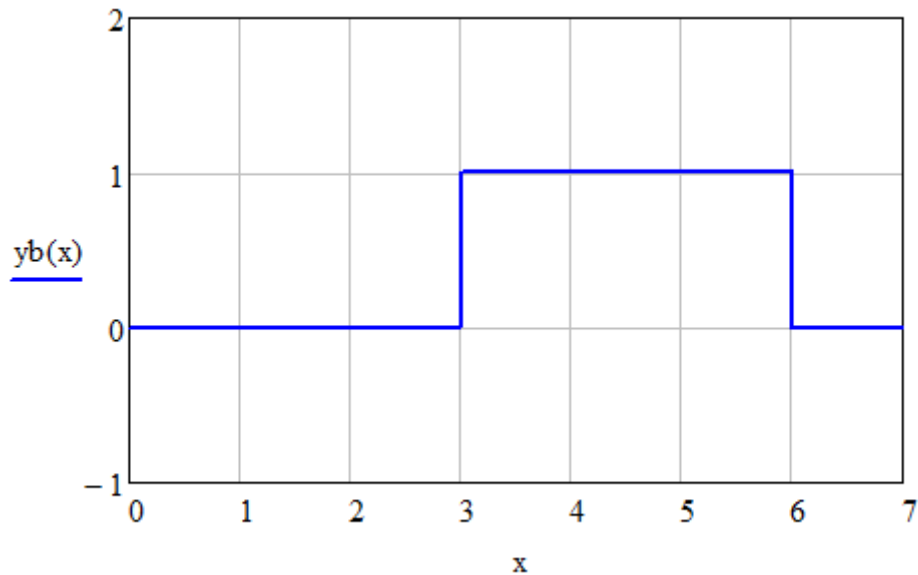


Рисунок 3.2 – Один період математичної моделі вхідного сигналу

На рисунку 3.3 зображено математичну модель вхідного сигналу на досліджуваному інтервалі часу, яка описана формулою 3.2.

$$f(x) := \sum_{m=-1}^7 y_b(x - m \cdot T) \quad (3.2)$$

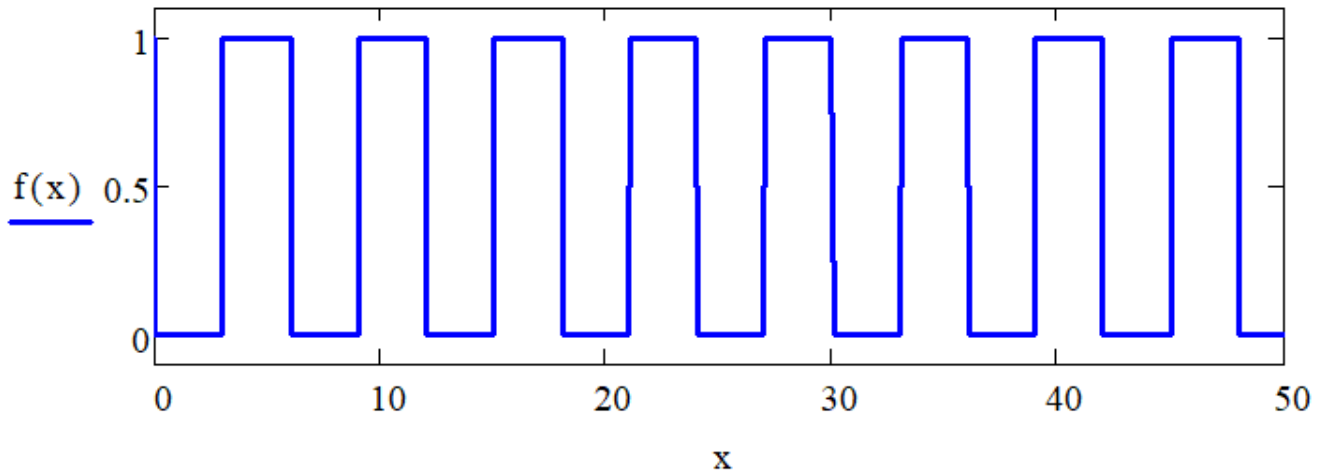


Рисунок 3.3 – Математична модель вхідного сигналу на досліджуваному інтервалі часу

Для того, щоб наблизити математичну модель сигналу до реальної фізичної моделі необхідно знайти неперервну функцію сигналу та внести до неї фізичні властивості обладнання при формуванні сигналу. Для використання перетворення в ряд Фур'є (формула 3.3).

$$S1(x) := \frac{a_0}{2} + \left[ \sum_{k=1}^n (a_k \cdot \cos(k \cdot \Omega \cdot x) + b_k \cdot \sin(k \cdot \Omega \cdot x)) \right] \quad (3.3)$$

де  $a(k)$  та  $b(k)$  приведені у формулах 3.4 та 3.5 відповідно.

$$a_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} y_b(x) \cdot \cos(k \cdot \Omega \cdot x) dx \quad (3.4)$$

$$b_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} y_b(x) \cdot \sin(k \cdot \Omega \cdot x) dx \quad (3.5)$$

На рисунку 3.4 зображений вхідний сигнал, наближений до реальної фізичної моделі у вигляді неперервної функції, знайденої за допомогою розкладання в ряд Фур'є.

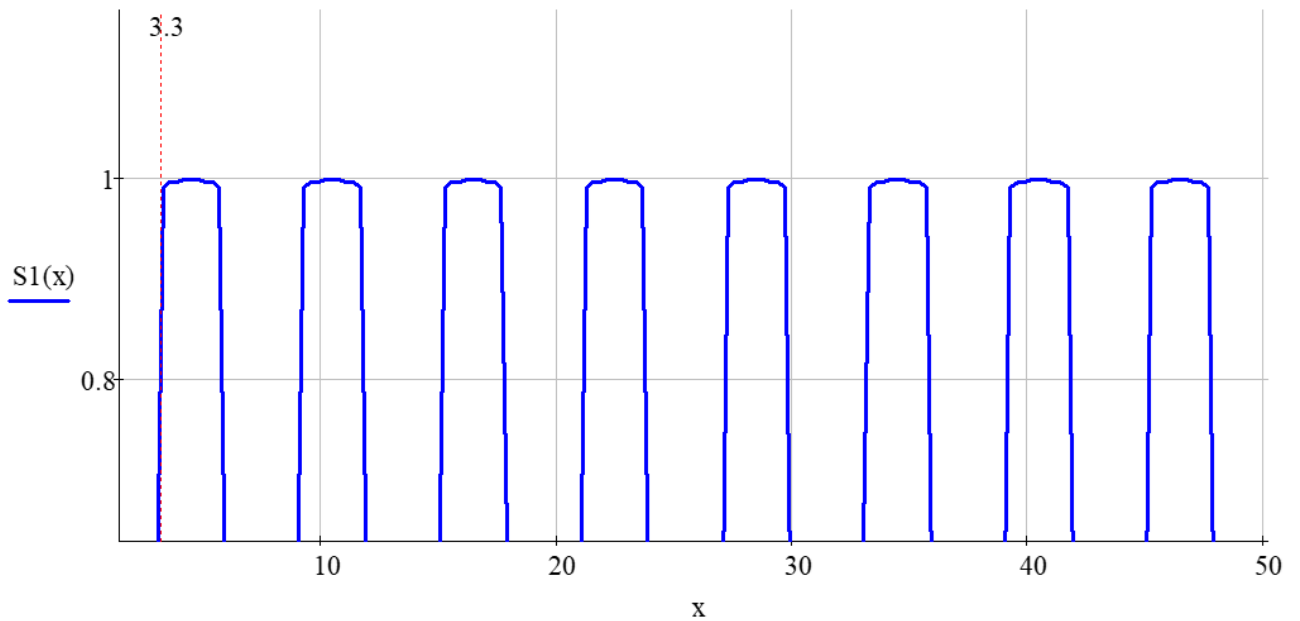


Рисунок 3.4 – Вхідний сигнал, наближений до реальної фізичної моделі

Для створення моделі впливу ORL на сигнал необхідно змодельювати функцію зворотніх відбиттів (ORF або Optical Return Function). Функція ORF буде пов'язана із зворотніми відображеннями вхідного сигналу, які будуть надходити від неоднорідностей, які знаходяться на різних відстанях та, відповідно, мають різну величину. Отже для моделювання необхідно використовувати випадкові значення амплітуд відбиттів та їх затримок у часі.

Для моделювання ORF використано множину випадкових значень коефіцієнтів ( $r$ ) для моделювання затримок та загасань.

$$r := \text{gexp}(n, 10) \quad (3.6)$$

У формулі 3.6 зображена функція створення випадкової множини значень коефіцієнтів, які будуть використовуватися для моделювання ORF. Нижче у формулі 3.7 зображена функція обирання коефіцієнта із створеної множини випадкових значень  $r$  в залежності від кроку анімації.

$$T1(x) := \left( \frac{x + 4}{T} \right) (4 + sm) \quad (3.7)$$

Формула 3.8 буде використовуватися для створення випадкового часового зсуву функції ORF відносно вхідного сигналу.

$$\text{delta}(x) := x - 3 + (r_{\text{floor}(T1(x))}) \cdot 15 \quad (3.8)$$

$$\text{ORF\_base}(x) := \left| \frac{(10 - 45 r_{\text{floor}(T1(x))})}{45} \cdot S1(x) \right| \quad (3.9)$$

У формулі 3.9 зображена функція випадкового коефіцієнту підсилення вхідного сигналу, який надходить від неоднорідностей.

$$\text{ORF}(x) := \text{ORF\_base}(\text{delta}(x - \text{sm})) \quad (3.10)$$

У формулі 3.10 зображена функція випадкового коефіцієнту амплітуди ORF з урахуванням випадкового зсуву в часі сигналу, який відбивається від неоднорідностей.

$$\text{SUM}(x) := \text{S1}(x) + \text{ORF}(x) \quad (3.11)$$

У формулі 3.11 наведена результуюча математична модель вихідного сигналу з урахуванням впливу ORF на вхідний сигнал.

На рисунку 3.5 зображено ORF та вихідний сигнал з підсиленнями вхідного сигналу, які зумовлені ORF, верхньою та нижньою границями сприйнятливості приймача світлового сигналу. Для більш наглядного прикладу приведені зображення графіку накладання сигналів на рисунку 3.5.

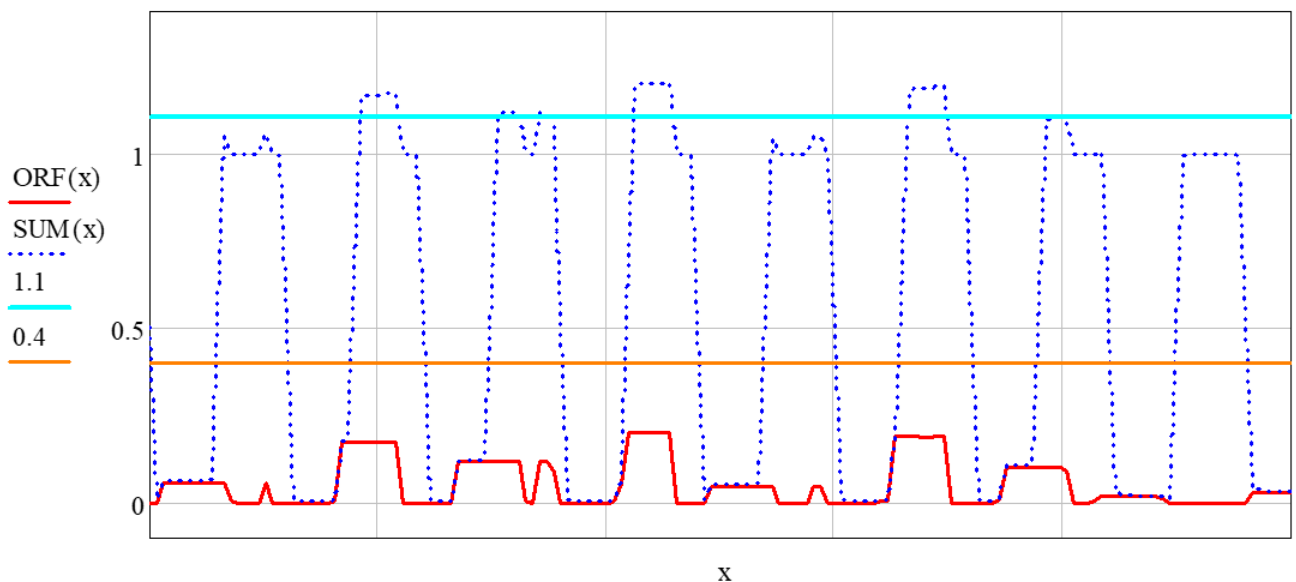


Рисунок 3.5 – ORF та вихідний сигнал, наближений до реальної фізичної моделі

На рисунку 3.5 синім пунктиром наведено вхідний сигнал, що надходить на приймач. Червоним кольором наведено рівень зворотніх відображень, що в рамках прикладу генерується з використанням випадкової множини значень. Верхня та нижня границі сприйняття визначають, яким має бути сигнал, щоб його завхатив приймач, та залежить від класу приймача і його технічної характеристики. У більш потужних та чутливих приймачі класу C++ і вище границі сприйняття є ширшими, а тому ORL можуть бути сприйняті як сигнал і, відповідно, викличуть розсинхронізацію.

На рисунку 3.5 можна спостерігати, що в цьому випадку оптичні зворотні відображення не впливають на приймач, тому що не переходять нижню границю сприйняття. Але якщо змоделювати аналогічну ситуацію з більш чутливим приймачем, то відбиття будуть прийняті як сигнал (рисунок 3.6).

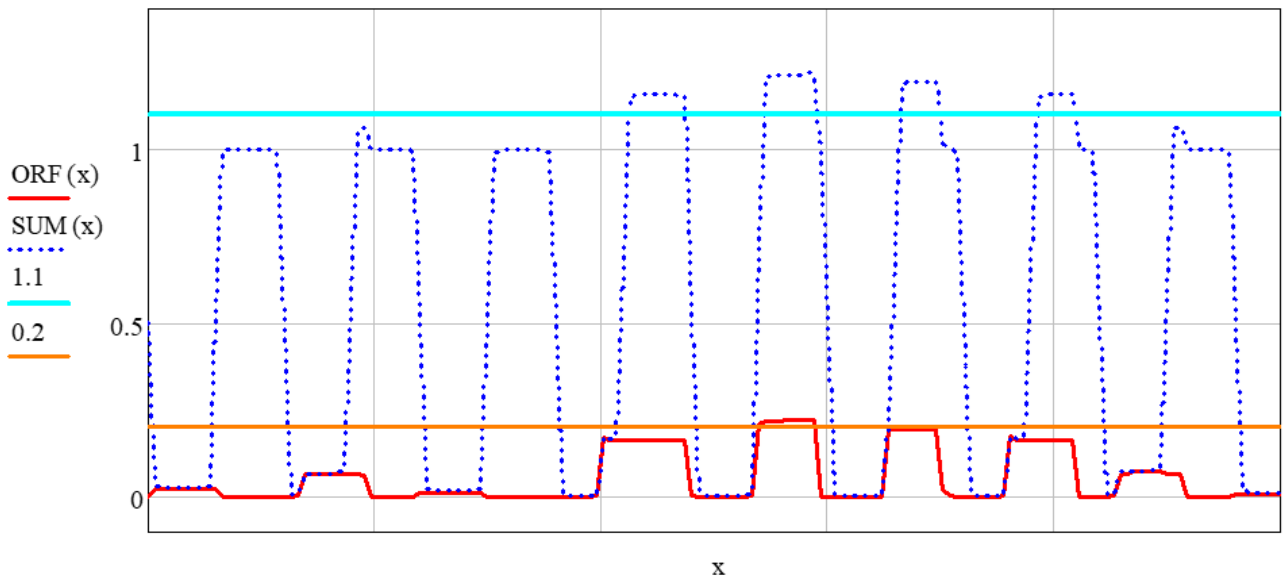


Рисунок 3.6 – ORF та вихідний сигнал при більш чутливому приймачі

Варто зазначити, що в тому випадку, коли вплив ORL на приймач є незначним, то є можливим програмне коригування його границь сприйняття. В іншому випадку для вирішення проблеми зворотніх відображень необхідно підбирати оптичні модулі залежно від конкретних умов мережі. На коротких відстанях є оптимальним використання менш потужних приймачів (наприклад, класу C+), що зменшить кількість оптичних відображень, а великих відстанях, де відображення поступово стухають разом із сигналом, можливе застосування високопотужних приймачів (наприклад, класу C++ і вище), що підвищить загальну пропускну здатність мережі без негативного впливу оптичних зворотніх відображень.

У результаті математичного моделювання було зображено процес впливу зворотного відбиття на якість передачі даних в оптичному каналі GPON-мережі при наявності високочутливого приймача, який може помилково сприймати відбиття ORL як реальний сигнал і, відповідно, отримати збій часової синхронізації.

### Висновки за розділом

У третьому розділі було виконано моделювання впливу оптичних зворотніх відображень на надійність передавання даних в GPON-мережі. Для моделювання об'єкта ORL було обрано метод імітаційного моделювання та описано його особливості. Для створення математичної імітаційної моделі було використано середовище Mathcad. У результаті проведення моделювання було зроблено висновок, що для зменшення рівня ORL ключовим аспектом є підбір оптичних трансиверів в залежності від характеристик мережі, зокрема довжини лінії. На коротких лініях є оптимальним використання менш потужних трансиверів, що зменшить кількість ORL. Через те, що на великих відстанях зворотні відображення поступово стухають разом із сигналом, можливе застосування високопотужних приймачів класу C++ і вище. Це підвищить надійність і загальну пропускну здатність мережі без негативного впливу ORL.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи магістра, було досліджено вплив оптичних зворотних втрат на надійність передавання даних в GPON-мережі.

У першому розділі було проведено аналіз фізичного рівня технології PON на основі ВОЛЗ, основні принципи її роботи, а також проблеми передавання даних через оптичне волокно. Було наведено теоретичні аспекти наявності оптичних зворотних втрат в оптоволоконних системах, а також проблеми, які можуть виникнути при релєївському розсіюванні та френелівському відбитті.

Ключовою перевагою використання PON-технології є її енергонезалежність, яку забезпечує її пасивна частина. У порівнянні з традиційними системами на основі міді, мережі PON також забезпечують більшу пропускну здатність, менші втрати сигналу, електромагнітну стійкість та довговічність волоконно-оптичної кабельної системи. Було розглянуто та порівняно різні типи мережевих інфраструктур відповідно до концепції FTTx, а також визначено, що інфраструктура FTTH (PON) є найбільш затребуваною на сьогоднішній день, в тому числі завдяки її енергонезалежності.

Саме тому у кваліфікаційній роботі було детально описано компоненти пасивних оптичних мереж. Наведено структуру PON-мережі і обладнання, яке входить до її складу. Було описано процес передачі даних, зокрема принципи технології мультиплексування з розділенням часу та мультиплексування за довжиною хвилі. У роботі було приділено увагу порівнянню фізичних та логічних рівнів технології GPON із її альтернативою – GEPON (EPON). Технологія GPON є більш перспективною для побудови сучасних мереж завдяки вищій пропускній здатності, ефективності передачі даних завдяки використанню GEM-кадрів, підтримці більшого коефіцієнту поділу та кращій енергоефективності.

У цій роботі було обґрунтовано важливість оптичного бюджету в мережах PON і необхідність його перерахунку при побудові нових або модернізації існуючих PON-ліній. Було описано критичну необхідність запасу оптичної потужності для обслуговування більшої кількості абонентів і забезпечення стабільності PON-мережі. Наведені фактори, що впливають на загальний оптичний бюджет, де окремо було виділено важливість врахування факторів монтажних робіт. Це пов'язано з тим, що помилки під час прокладання та з'єднання кабелів можуть суттєво вплинути на оптичний бюджет, а в подальшому і на кількість абонентів, яких можна підключити.

У ході виконання кваліфікаційної роботи магістра було розглянуто існуючі технічні рішення мереж GPON, реалізовані на основі двох ліній різної протяжності від інтернет-провайдера «Претчер». Було описано структуру реальних ліній, а також виконано огляд задіяного активного мережевого обладнання. Таким чином, в першому розділі було окреслено основи функціонування сучасних оптичних

|            |           |             |        |      |                    |        |       |         |
|------------|-----------|-------------|--------|------|--------------------|--------|-------|---------|
|            |           |             |        |      | КНУ.РМ.123.24.06.В |        |       |         |
| Змн.       | Арк.      | № документа | Підпис | Дата |                    |        |       |         |
| Розробив   | Кондрашов |             |        |      | ВИСНОВКИ           | Літера | Аркуш | Аркушів |
| Перевірив  | Чубаров   |             |        |      |                    |        |       |         |
| Н.контроль | Кузнецов  |             |        |      | ВИСНОВКИ           | КІ-23м |       |         |
| Затвердив  | Купін     |             |        |      |                    |        |       |         |



систем, їхні переваги, складнощі в експлуатації та ключові фактори, що впливають на якість зв'язку. Отримані висновки створили базу для проведення подальших досліджень, зокрема для вирішення задачі забезпечення надійності в GPON-мережі та збільшення кількості абонентів із збереженням якості послуг.

Діагностика і контроль стану ліній GPON є ключовим аспектом у забезпеченні стабільної роботи мережі. Саме тому, у другому розділі випускної роботи магістра було описано способи тестування якості GPON-лінії зовнішніми вимірювальними приладами методами OCWR та OTDR. Було описано алгоритми, переваги обох методів і наведено варіанти використання кожного з них. Було також описано способи діагностики активного GPON-обладнання за допомогою вбудованих апаратних засобів. Технологія DDM дозволяє мережевому адміністратору контролювати ключові параметри оптичних трансиверів. Для контролю стану, виявлення проблем та конфігурації GPON-обладнання використовується протокол OMCI. Було розглянуто спосіб взаємодії мережевого адміністратора з обладнанням у GPON-мережі за допомогою протоколу SNMP.

Однією з основних задач інтернет-провайдерів є розширення абонентської бази на існуючих мережевих лініях. У роботі наведено приклади розрахунку оптичного бюджету в PON-лініях, що є необхідним при їх побудові або реконфігурації. В GPON-лініях, що були описані в першому розділі, після перерахунку оптичної потужності було використано більш потужні оптичні трансивери, що теоретично мали задовольнити вирішення проблеми збільшення кількості абонентів. На практиці ж виникла проблема відсутності підключення абонентів на коротких GPON-лініях. Методом експериментальних досліджень було з'ясовано, що на більш протяжних лініях ця проблема не спостерігається. Для аналізу цього явища було знято рефлектограми існуючих GPON-гілок. У результаті аналізу рефлектограм було зроблено висновок, що причиною відсутності з'єднання на «короткій» гілці була наявність великої кількості оптичних відображень. На «довгій» GPON-лінії проблема була відсутня через те, що оптичні відображення виникали далеко від оптичного терміналу і загасали разом із корисним сигналом, а тому не впливали на якість з'єднання.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи магістра було виконано моделювання впливу оптичних зворотних відображень на надійність передавання даних в GPON-мережі. Для моделювання ORL було створено математичну імітаційну модель в середовищі Mathcad. У результаті проведення моделювання було зроблено висновок, що для зменшення рівня оптичних зворотних відображень ключовим аспектом є правильний підбір оптичних трансиверів в залежності від характеристик мережі, зокрема довжини лінії. На коротких лініях є оптимальним використання менш потужних трансиверів, що зменшить кількість оптичних відображень. Відповідно, завдяки затуханню оптичних відображень разом із реальним сигналом, на великих відстанях рекомендується застосовувати трансивери зі збільшеними показниками потужності і чутливості, що підвищить надійність і загальну пропускну здатність мережі без негативного впливу оптичних зворотних відображень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) A Brief Introduction to GPON SFP Modules. URL: <https://community.fs.com/article/a-brief-introduction-to-gpon-sfp-modules.html> (дата звернення 28.10.2024).
- 2) AON vs. PON: Which is Better for FTTH Network. URL: <https://www.vcelink.com/blogs/focus/aon-vs-pon> (дата звернення 03.10.2024).
- 3) Basic Knowledge About Optical Line Terminal (OLT). URL: <https://www.fiberopticsshare.com/basic-knowledge-optical-line-terminal-olt.html> (дата звернення 27.10.2024).
- 4) Calculating Fiber Loss and Distance Estimates. URL: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95049798-calculating-fiber-loss-and-distance-estimates> (дата звернення 01.11.2024).
- 5) Degradation and Reliability of Semiconductor Lasers. URL: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/degradation-and-reliability-of-semiconductor-lasers> (дата звернення 07.11.2024).
- 6) Digital Diagnostic Monitor. URL: [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/catalyst\\_pon/software/configuration\\_guide/olt\\_port/b-gpon-config-olt-port/digital\\_diagnostic\\_monitor.pdf](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/catalyst_pon/software/configuration_guide/olt_port/b-gpon-config-olt-port/digital_diagnostic_monitor.pdf) (дата звернення 04.11.2024).
- 7) Fiber to the Home (FTTH): A Comprehensive Guide. URL: <https://dgtlinfra.com/fiber-to-the-home-ftth/> (дата звернення 05.10.2024).
- 8) FTTx & FTTH: An Encyclopedic Breakdown from the Experts. URL: <https://stl.tech/blog/fttx-ftth-an-encyclopedic-breakdown-from-the-experts-in-the-realm/> (дата звернення 15.10.2024).
- 9) GPON Explained and Definition. URL: <https://www.gpon.com/definition-of-gpon> (дата звернення 04.10.2024).
- 10) Gpon Ont Sfp OLT Class C++ C+++ Gpon-OLT-20 SFP Transceiver Module. URL: [https://www.alibaba.com/product-detail/Gpon-Ont-Sfp-OLT-Class-C\\_62389404286.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Gpon-Ont-Sfp-OLT-Class-C_62389404286.html) (дата звернення 14.11.2024).
- 11) ITU-T Recommendations –G series: Transmission systems and media, digital systems and networks. URL: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index.aspx?ser=G> (дата звернення 05.11.2024).
- 12) Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE Journal on Quantum Electronics. – 1980. – Vol. QE-16. – P. 347–352. URL: <https://zero.sci-hub.se/1119/b724b40a8ecd6f5cf189258c5009df98/lang1980.pdf> (дата звернення 21.10.2024).
- 13) Lietaert G. Optical return loss measurement, White Paper JDSU, 2006. URL: [www.jdsu.com](http://www.jdsu.com) (дата звернення 02.10.2024).

|            |           |             |        |      |                                  |  |  |
|------------|-----------|-------------|--------|------|----------------------------------|--|--|
|            |           |             |        |      | КНУ.РМ.123.24.06.СВД             |  |  |
| Змн.       | Арк.      | № документа | Підпис | Дата | СПИСОК<br>ВИКОРИСТАНИХ<br>ДЖЕРЕЛ |  |  |
| Розробив   | Кондрашов |             |        |      |                                  |  |  |
| Перевірив  | Чубаров   |             |        |      |                                  |  |  |
| Н.контроль | Кузнецов  |             |        |      | КІ-23М                           |  |  |
| Затвердив  | Купін     |             |        |      |                                  |  |  |

14) Loss Budget. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/loss-budget> (дата звернення 10.10.2024).

15) Measuring Reflectance or Return Loss. URL: <https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/reflectance.html> (дата звернення 19.10.2024).

16) MIB Browser. URL: <https://www.ireasoning.com/mibbrowser.shtml> (дата звернення 16.11.2024).

17) OMCI of GPON Network Introduction Guide. URL: <https://community.fs.com/article/omci-of-gpon-network-introduction-guide.html> (дата звернення 05.11.2024).

18) Optical Budget & Split Ratios in Fiber Network Monitoring. URL: <https://insights.profitap.com/optical-budget-split-ratios-in-fiber-network-monitoring> (дата звернення 12.10.2024).

19) Optical Power Budget Calculation: A Comprehensive Guide. URL: [https://es.opelink.com/blog/optical-power-budget-calculation-a-comprehensive-guide\\_b0103.html](https://es.opelink.com/blog/optical-power-budget-calculation-a-comprehensive-guide_b0103.html) (дата звернення 01.11.2024).

20) Optical Power Budgets. URL: <https://community.cisco.com/kxiwq67737/attachments/kxiwq67737/5486-discussions-optical-networking/1902/1/15404-power-budgets.pdf> (дата звернення 01.11.2024).

21) PLC Splitter (Спліттер) 1x4, SC/UPC, 900 um, G657A FiberField. URL: <https://lanmarket.ua/ua/plc-splitters-deliteli-planarnye/fiberfield-plc-splitter-1x4-2649/> (дата звернення 28.10.2024).

22) PON – оптичні мережі з пасивною оптичною магістраллю. URL: <https://deps.ua/knowegable-base-ru/articles/472-pon-opticheskie-seti-s-passivnoj-opticheskoj-magistralju.html> (дата звернення 09.10.2024).

23) PON Network: Understanding OLT, ONU, ONT and ODN. URL: <https://www.lightoptics.co.uk/blogs/news/pon-network-understanding-olt-onu-ont-and-odn> (дата звернення 15.10.2024).

24) Quickly understand FTTx FTTC FTTB FTTH. URL: <https://www.hdv-fiber.com/news/quickly-understand-fttx-fttc-fttb-ftth/> (дата звернення 19.10.2024).

25) SFP OLT LTE3680P-BC-2DM CLASS C++ (-32dBm) GPON ZTE. URL: <https://lanmarket.ua/ua/gpon-sfp/sfp-olt-lte3680p-bc-2dm-class-c-32dbm-gpon/> (дата звернення 14.11.2024).

26) Simple Network Management Protocol (SNMP) Configuration on RV215W. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/smb/routers/cisco-rv-series-small-business-routers/smb3705-simple-network-management-protocol-snmp-configuration-on-rv2.html> (дата звернення 12.11.2024).

27) Singlemode vs. Multimode Fiber Optics: Which is Better for You. URL: <https://www.lindenphotonics.com/singlemode-vs-multimode-fiber-optics-which-is-better-for-you> (дата звернення 05.10.2024).

28) SNMP (Simple Network Management Protocol). URL: <https://networkwalks.com/snmp-simple-network-management-protocol/> (дата звернення 13.11.2024).

29) SNMP, MIBs and OIDs – an overview. URL: [https://www.paessler.com/info/snmp\\_mibs\\_and\\_oids\\_an\\_overview](https://www.paessler.com/info/snmp_mibs_and_oids_an_overview) (дата звернення 13.11.2024).

30) TECHNICAL NOTE: Measuring OTDR Reflectance and ORL. URL: [https://download1.veexinc.com/RXT-4100/Technical-Notes/10014/Measuring\\_OTDR\\_Reflectance\\_and\\_ORL\\_D08-00-088\\_A00.pdf](https://download1.veexinc.com/RXT-4100/Technical-Notes/10014/Measuring_OTDR_Reflectance_and_ORL_D08-00-088_A00.pdf) (дата звернення 16.10.2024).

31) Testing Optical Splitters Loss with Optical Power Meter and Light Source. URL: <https://community.fs.com/article/test-optical-splitters-loss-with-optical-power-meter-light-source.html> (дата звернення 03.11.2024).

32) TIA-455 SERIES. URL: <https://tiaonline.org/standard/tia-455-series/> (дата звернення 05.11.2024).

33) Time-division multiplexing (TDM). URL: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/time-division-multiplexing-TDM> (дата звернення 15.10.2024).

34) Understand GPON Technology. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/switches/catalyst-pon-series/216230-understand-gpon-technology.html> (дата звернення 04.10.2024).

35) Understand GPON Technology. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/switches/catalyst-pon-series/216230-understand-gpon-technology.html> (дата звернення 05.10.2024).

36) UPC or APC – Which One to Choose. URL: <https://www.baudcom.com.cn/blog/upc-or-apc-which-one-to-choose> (дата звернення 27.10.2024).

37) What is DDM Function for Fiber Optic Transceiver. URL: [https://www.sopto.com.cn/sp\\_news/show-432.html](https://www.sopto.com.cn/sp_news/show-432.html) (дата звернення 03.11.2024).

38) What is Digital Diagnostic Monitoring (DDM). URL: <https://vitextech.com/what-is-ddm/> (дата звернення 03.11.2024).

39) What is FTTx. URL: <https://www.viavisolutions.com/en-us/what-fttx> (дата звернення 19.10.2024).

40) What is Optical Return Loss. URL: [https://www.fiberinstrumentsales.com/blogs/what-is-optical-return-loss.html?srsId=AfmBOoonOSpb249P9D4C5wzPnRfuqpyM6TKgza0DyxSLkoGrsHе6RO\\_E](https://www.fiberinstrumentsales.com/blogs/what-is-optical-return-loss.html?srsId=AfmBOoonOSpb249P9D4C5wzPnRfuqpyM6TKgza0DyxSLkoGrsHе6RO_E) (дата звернення 30.10.2024).

41) What Is Passive Optical Networking (PON). URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/switches/what-is-passive-optical-networking.html> (дата звернення 01.10.2024).

42) What is SNMP, and How Does It Work. URL: <https://www.fortra.com/resources/articles/snmp-basics-what-it-and-how-it-works> (дата звернення 12.11.2024).

43) What is the difference between OLT, ONU/ONT and ODN. URL: <https://www.fctele.com/news/what-is-the-difference-between-olt-onu-ont-and-odn/> (дата звернення 27.10.2024).

44) What is the difference between SFP, RJ45 Copper SFP and OLT SFP. URL: [https://www.sopto.com.cn/sp\\_news/show-27561.html](https://www.sopto.com.cn/sp_news/show-27561.html) (дата звернення 28.10.2024).

|      |             |        |      |  |                      |      |
|------|-------------|--------|------|--|----------------------|------|
|      |             |        |      |  | КНУ.РМ.123.24.06.СВД | Арк. |
| Арк. | № документа | Підпис | Дата |  |                      |      |

45) What's GEM Frame and T-CONT of GPON. URL: <https://opticalnetworkequipment.huawei.blogspot.com/2016/03/whats-gem-frame-and-t-cont-of-gpon.html> (дата звернення 06.10.2024).

46) Where does optical return loss matter. URL: <https://www.cablinginstall.com/data-center/article/14210663/where-does-optical-return-loss-matter> (дата звернення 11.10.2024).

47) ZXA10 C300C320V2.x C300MC350MV4.x MIB Specifications. URL: <https://pdfcoffee.com/zxa10-c300c320v2x-mib-specificationsdocx-pdf-free.html> (дата звернення 16.11.2024).

48) Абонентський термінал ONU Huawei EchoLife HG8310M. URL: <https://deps.ua/ua/katalog/subscriber-terminals-onu/huawei-echolife-hg8310m.html> (дата звернення 22.10.2024).

49) Абонентський термінал ONU Picotel PU-X910. URL: <https://f.ua/ua/picotel/pu-x910-epon-gpon-1xsc-upc-1x10-100-1000base-t-12v-dc-cdata-f501-chipset.html?srsId=AfmBOopMVg3uyOstdF8EquvXL9hEUjfl0pSLOqBMUAk32AiIy15gQNVk> (дата звернення 22.10.2024).

50) Абонентський термінал TENDA HG1. URL: <https://cutt.ly/xelBx52k> (дата звернення 22.10.2024).

51) Вимірювання на ВОЛЗ за допомогою рефлектометра AQ7210 (с. 19). URL: <https://cutt.ly/teLB5qkP> (дата звернення 19.10.2024).

52) Візуальний детектор несправностей, VFL-205-1mW. URL: <https://dtegroup.com.ua/ua/products/microscopes/VFL-205> (дата звернення 23.10.2024).

53) Все про зварювання оптичного волокна. URL: <https://cutt.ly/heLBNh2G> (дата звернення 23.10.2024).

54) Дільник оптичний IPCOM COUPLER FBT 1x2 1310/1550-25/75-0-SC/APC-0.9mm cord-1.0m. URL: <https://ipcom.ua/uk/delytel-optycheskyj-coupler-fbt-1x2-13101550-2575-0-scapc-09mm-cord-10m> (дата звернення 28.10.2024).

55) Зварювання оптичних волокон. Частина 4: вимірювання на оптиці, зняття та аналіз рефлектограми. URL: <https://habr.com/ru/articles/227647/> (дата звернення 23.10.2024).

56) Імпульсний оптичний рефлектометр. Частина 1. URL: <http://www.stroi-tk.ru/info/articles/vols-stat1/imprefl/imprefl1/> (дата звернення 19.10.2024).

57) Модуль оптичний Picotel GPON OLT SFP C++. URL: <https://e-server.com.ua/opticheskie-komponenty/oborudovanie-pon/sfp-pon-gepon-moduli/modul-optichnij-picotel-gpon-olt-sfp-c-detail> (дата звернення 14.11.2024).

58) Модульний, оптичний лінійний термінал агрегації ZTE ZXA10 C320. URL: <https://deps.ua/ua/katalog/concentrators-olt/zte-zxa10-c320.html> (дата звернення 20.10.2024).

59) Нестандартні оптичні дільники PLC (1x6, 1x12). URL: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/articles/10311.html> (дата звернення 18.10.2024).

60) Оптичний рефлектометр Гамма Лайт Связьприбор. URL: <https://lanmarket.ua/ua/opticheskie-reflektometry-otdr/opticheskiy-reflektometr-gamma-layt/> (дата звернення 10.11.2024).

|      |             |        |      |  |                      |      |
|------|-------------|--------|------|--|----------------------|------|
|      |             |        |      |  | КНУ.РМ.123.24.06.СВД | Арк. |
| Арк. | № документа | Підпис | Дата |  |                      |      |

61) Оптичні розгалужувачі в мережах доступу. URL: <https://deps.ua/knowegable-base-ru/articles/467-opticheskie-razvetviteli-v-setjah-dostupa.html> (дата звернення 18.10.2024).

62) Особливості побудови FTTH на базі PON. URL: <https://ic-line.ua/wiki/pon-glava2> (дата звернення 15.10.2024).

63) Порівняльна таблиця GPON OLT модулів (GPON transceiver). URL: <https://easy-adminko.livejournal.com/8460.html> (дата звернення 06.10.2024).

64) Про принципи роботи апаратів для зварювання волокон (частина 1). URL: <https://cutt.ly/xeLBN5uZ> (дата звернення 23.10.2024).

65) Про принципи роботи апаратів для зварювання волокон (частина 2). URL: <https://cutt.ly/qeLBMX8T> (дата звернення 23.10.2024).

66) Технологія GPON, GEPON або EPON: чи очевидний вибір. URL: [https://e-server.com.ua/uk/poradi/tehnologija-gpon-gepon-abo-epon-chi-ochevidnij-vibir?srsltid=AfmBOo0jco6M9c1AIl58rWPvMMckbb0fsZ\\_RocY29FDGCmW-loVkJ6uc](https://e-server.com.ua/uk/poradi/tehnologija-gpon-gepon-abo-epon-chi-ochevidnij-vibir?srsltid=AfmBOo0jco6M9c1AIl58rWPvMMckbb0fsZ_RocY29FDGCmW-loVkJ6uc) (дата звернення 04.10.2024).

67) Функції управляючого інтерфейсу OMCI. URL: <https://cutt.ly/OeLBS9Ll> (дата звернення 05.11.2024).

|      |             |        |      |  |                      |      |
|------|-------------|--------|------|--|----------------------|------|
|      |             |        |      |  | КНУ.РМ.123.24.06.СВД | Арк. |
| Арк. | № документа | Підпис | Дата |  |                      |      |