

**SECTION 4. INFORMATICS AND CYBERNETICS**

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.4.1

**4.1 Метод передачі даних у кабельній волоконно-оптичній лінії зв'язку для технології FTTx на основі лазерного випромінювання**

**Вступ.** На даний час технологія Fiber to the X (FTTx) має безліч переваг, які пов'язані зі швидкістю і пропускнуою здатністю передачі даних та нижчим споживанням енергії. Тому, застарілі дротяні лінії зв'язку (мідні мережі) замінюються FTTx. Така архітектура надає доступ до мережі Інтернет через волоконно-оптичну лінію зв'язку (ВОЛЗ) та забезпечує швидкість передачі даних 1000 Мбіт/с. Тому, одним із найбільш перспективних напрямків мережевого зв'язку як у провідних країнах світу, так і в Україні є ВОЛЗ, що дозволяють передавати дані з великою інформаційною ємністю і підвищеною скритністю та мають високу надійність роботи. Вони значно перевершують відомі дротяні лінії зв'язку за такими показниками, як пропускна здатність, довжина регенераційної ділянки, а також перешкодозахищеність. При цьому, стабільна якість з'єднання зберігається при під'єднанні декілька пристроїв одночасно, що робить ВОЛЗ зручною альтернативою сервісам локальних провайдерів.

Однак, при використанні у ВОЛЗ лазерного випромінювання (ЛВ) у якості носія даних (інформації) не враховуються його особливості – багатомодова структура та можливість передачі даних на поздовжніх модах (несучих частотах).

Таким чином, розробка методу передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології FTTx на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ є актуальною науковою задачею.

**Виклад основного матеріалу.** Актуальність використання технології FTTx обумовлена сучасними вимогами до високошвидкісного, надійного та масштабованого доступу до мережі Інтернет як для побутових (приватних), так і для бізнес-користувачів (компаній, підприємств тощо). До ключових аспектів, які обґрунтовують актуальність її використання можливо віднести наступні.

1. Постійне збільшення об'ємів трафіку:

- збільшення використання потокового відео (YouTube, Netflix, IPTV тощо), онлайн-ігор, хмарних сервісів, відеоконференцій (Zoom, Teams тощо) вимагає стабільного та швидкого з'єднання з Інтернет ресурсами;
- FTTx забезпечує гігабітну пропускну здатність, яка стає критично важливою у цифровому середовищі.

2. Розвиток цифрової економіки та Smart-технологій:

- розгортання «розумних міст» і «розумних будинків», Інтернету речей (IoT), дистанційної освіти та електронного урядування вимагає надійної інфраструктури з низькими затримками даних у часі;
- FTTx служить основою для реалізації таких рішень, завдяки високій пропускній здатності та мінімальним затримкам даних.

3. Масштабованість та довгострокова інвестиція:

- на відміну від мідних ліній, ВОЛЗ не вимагають повної модернізації при зростанні потреб користувачів – достатньо оновити термінальне обладнання;
- такі мінімальні фінансові витрати робить FTTx економічно доцільною інвестицією на десятки років уперед.

4. Енергозбереження та екологічність:

- ВОЛЗ споживають менше електроенергії на одиницю переданих даних, що важливо в умовах енергетичних викликів та екологічної відповідальності.

5. Надійність та стабільність зв'язку:

- ВОЛЗ нечутливі до електромагнітних завад, дощу, гроз тощо, що забезпечує вищу стабільність зв'язку у порівнянні з мідними технологіями (ADSL та VDSL).

6. Зростання вимог до телеком-інфраструктури після пандемії COVID-19:

- пандемія показала важливість надійного доступу до мережі Інтернет для дистанційної роботи, навчання, медицини тощо;
- FTTx дозволяє ефективно масштабувати інфраструктуру під такі різнотипні навантаження.

7. Підтримка новітніх технологій та 5G:

– ВОЛЗ є основою для backhaul-інфраструктури 5G, що дозволяє забезпечити передачу великих об'ємів даних між базовими станціями та ядром мережі.

Таким чином, технологія FTTx є ключовим елементом сучасної інформаційної інфраструктури, яка здатна задовольнити не лише поточні, а й перспективні потреби суспільства, бізнесу та держави. Її використання забезпечує якісний прорив у сфері цифрових послуг, роблячи її надзвичайно актуальною у епоху цифрової трансформації та швидко зростаючих інформаційних технологій.

Отже, FTTx – це загальна назва технологій побудови широкосмугового доступу до мережі інтернет з використанням волоконно-оптичного кабелю, де "X" позначає точку завершення кабелю у мережі. Такі технології відрізняються одна від іншої саме місцем, до якого доводиться ВОЛЗ.

До основних особливостей технології FTTx можливо віднести наступні:

1. Висока швидкість передачі даних – завдяки ВОЛЗ забезпечується набагато більша пропускна здатність у порівнянні з мідними лініями; підтримка швидкостей до гігабітів за секунду; низький рівень затримок та висока надійність: оптика не піддається електромагнітним завадам, що робить з'єднання стабільним та надійним.

2. Масштабованість – FTTx дозволяє з легкістю збільшувати пропускну здатність у майбутньому без необхідності прокладання нового кабелю – достатньо оновити обладнання.

3. Різні варіанти архітектури FTTx: FTTH (Fiber to the Home) – оптоволокло до самого житлового приміщення; FTTB (Fiber to the Building) – до під'їзду або будівлі, далі сигнал передається по мідному кабелю; FTTC (Fiber to the Curb/Cabinet) – до розподільчої шафи поруч із будинком; FTTN (Fiber to the Node) – до мережевого вузла, який обслуговує декілька будівель; FTTD (Fiber to the Desk) – у корпоративних мережах – ВОЛЗ аж до робочого місця.

4. Підтримка «Triple Play» – одночасна передача даних за Інтернетом, телебаченням (IPTV) та телефонією (VoIP) через єдину мережу.

5. Складність та вартість впровадження – початкове розгортання FTTx є дорожчим, особливо у варіантах FTTH, однак, воно забезпечує довгострокову економію за рахунок меншої потреби під час обслуговування.

6. Перспективність – вважається основою для Smart City, IoT, 5G backhaul та інших передових технологій, які потребують надвисокої пропускної здатності.

До основних переваг FTTx можливо віднести наступні.

1. Висока швидкість передачі даних:

– забезпечує гігабітні швидкості (від  $1^{-10}$  Гбіт/с), що набагато перевищує можливості мідних ліній.

2. Мінімальні затримки (латентність):

– ідеально підходить для онлайн-ігор, відеоконференцій, дистанційного керування тощо.

3. Висока надійність:

– волоконно-оптичні кабелі нечутливі до електромагнітних завад, грозових розрядів та погодних умов.

4. Масштабованість:

– легко нарощується пропускна здатність без заміни кабельної інфраструктури – лише заміна активного обладнання.

5. Енергоефективність:

– порівняно з міддю, волоконно-оптичні кабелі споживають менше енергії для передачі даних.

6. Довговічність:

– термін експлуатації ВОЛЗ складає 25–30 років, що знижує витрати на обслуговування.

7. Підтримка сучасних технологій:

– сумісна з хмарними сервісами, 5G, IP-телебаченням, IoT тощо.

До основних недоліків FTTx можливо віднести наступні.

1. Висока вартість впровадження

– початкові інвестиції у прокладання волоконно-оптичного кабелю, особливо у існуючу міську (сільську) забудову, можуть бути значними.

2. Складність монтажу:

- необхідні спеціалізовані знання та обладнання для зварювання та прокладки волоконно-оптичного кабелю.

3. Крихкість волоконно-оптичного кабелю.

- скляне волокно може пошкодитись при недбалому монтажі або під час експлуатації.

4. Труднощі у модернізації в густозабудованих районах:

- прокладка у історичних (щільно забудованих) районах міста може потребувати координації з місцевою владою або ж викликати незручності у мешканців.

5. Низька окупність у малонаселених районах міста, села тощо:

- витрати на одного абонента значно зростають при низькій щільності населення, що ускладнює впровадження у сільській місцевості.

Таким чином, технологія FTTx забезпечує високу якість зв'язку, необхідну для сучасних цифрових сервісів та вважається найперспективнішою для побудови мереж майбутнього. Попри високу початкову вартість, її переваги у довгостроковій перспективі значно переважають недоліки.

Отже, для технології FTTx використовується інтеграція (суміш) волоконно-оптичних та мідних кабелів, залежно від типу технології. При цьому, до певної точки дотягується волоконно-оптичний кабель, а «остання миля» – вже мідна, як представлено на рис. 1, де:

- за технологією FTTN – волоконно-оптичні кабелі дотягують до мережевого вузла;
- за технологією FTTC – до мікрорайону або кварталу;
- за технологією FTTB – до будівлі;
- за технологією FTTH – до квартири або приватного будинку.

### FTTx - Fiber to the X

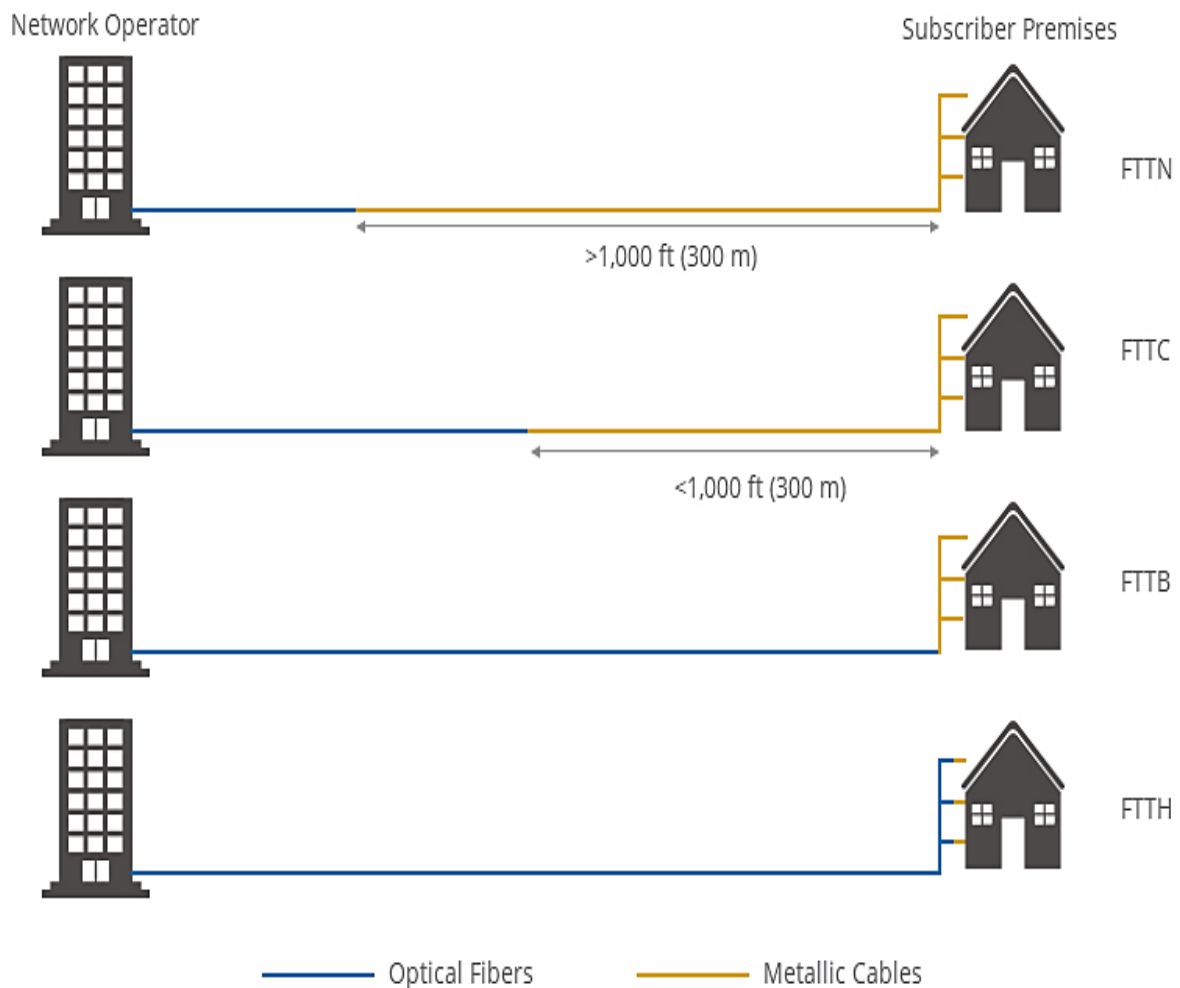


Рисунок 1. Типи технологій FTTx

Відомо, що структурована кабельна мережа (СКМ) – це фізична основа інфраструктури будівлі, яка зводить у єдину систему безліч мережевих інформаційних сервісів різного призначення: локальні обчислювальні мережі (ЛОМ) і телефонні, системи безпеки і відеоспостереження тощо. При цьому, структурована кабельна система (СКС) представляє собою ієрархічну кабельну систему, яка змонтована у будівлі (у групі будівель) та складається зі структурних підсистем.

До складу обладнання СКС входить набір мідних та оптичних кабелів, крос-панелей, з'єднувальних шнурів, кабельних роз'ємів, модульних гнізд,

інформаційних розеток, а також допоміжне обладнання. Усі елементи СКС інтегруються у єдиний комплекс (систему) та експлуатуються відповідно до певних правил.

Кабельна система – це система, до елементів якої належать кабелі та компоненти, що пов'язані з кабелем. До кабельних компонентів належить усе пасивне комутаційне обладнання, що необхідне для з'єднання (фізичного закінчення або термінування) кабелю – телекомунікаційні розетки на робочих місцях, кросові та комутаційні панелі («патч-панелі») у телекомунікаційних приміщеннях, муфти та сплайси.

Структуру кабельної системи визначає інфраструктура інформаційних технологій (ІТ, Information Technology), за якою організується проект кабельної системи відповідно до вимог кінцевого користувача, незалежно від активного обладнання, що може бути застосоване згодом. Побудова СКС основана на використанні кабелів 5 та 6 категорій, багатопарних, волоконно-оптичних та змішаних. До складу елементів та пристроїв для СКС входять різноманітні типи стійок і комутаційних шаф, що також діляться за типом форми і конструкції, підлогового або настінного виконання.

Таким чином, кабельна мережа має велике значення для роботи великого підприємства, що займається виробництвом будь-якої продукції тощо. Вона будується з урахуванням перспективи розвитку підприємства.

Волоконно-оптична лінія зв'язку – технологія передачі даних на великі відстані за допомогою тонких волокон, зроблених зі скла (пластику), що передають світлові сигнали (лазерного випромінювання, ЛВ), які промодульовані з електричними інформаційними сигналами. Такі інформаційні сигнали передаються по волоконно-оптичним каналам у вигляді масиву світлових імпульсів (ЛВ), що дозволяє передавати великі об'єми даних на великі відстані з високою швидкістю та мінімальними втратами сигналу за потужністю. Тому, сучасні ВОЛЗ знайшли широке використання у всесвіті.

Україна має кільцеві системи зв'язку на основі ВОЛЗ, що охоплюють основні регіони, та включена до системи Європейських проектів по

розповсюдженню і підключенню ВОЛЗ за організацією «Укртелеком».

Отже, передача даних (інформації) у ВОЛЗ здійснюється за допомогою світлових хвиль [150]. Світлові хвилі – це електромагнітні хвилі, які поширюються у вакуумі (у різних середовищах) з різною швидкістю. Вони мають довжину хвилі та частоту, які визначаються їх енергією. У залежності від довжини хвилі, світлові хвилі можуть бути видимими для людського ока, такі як кольори від червоного до фіолетового, або невидимими, такі як інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Тому, до складу світлових хвиль входять наступні:

- інфрачервоне випромінювання –  $\lambda = 0,78 \dots 1000$  мкм;
- видиме світло –  $\lambda = 0,38 \dots 0,78$  мкм;
- ультрафіолетове випромінювання –  $\lambda = 0,0001 \dots 0,38$  мкм.

ВОЛЗ використовуються при об'єднанні ЛОМ у різних будівлях, у багатоповерхових та протяжних будівлях, а також у мережах, де пред'являються особливо високі вимоги до інформаційної безпеки та захисту від електромагнітних завад. Волоконно-оптичні кабелі забезпечують більш високу швидкість передачі даних (інформації) і низький рівень шумів, мають невелику вагу і діаметр при більшій можливості передачі даних на великі відстані, а також більш довгий термін служби, ніж дротяні.

Волоконно-оптичний кабель (Optical cable) – це кабель з волоконними світловодами для спрямованої передачі оптичного сигналу (ЛВ). Конструкція світловода – це тонка кварцова нитка, що оточена спеціальною захисною опліткою зі значно меншим коефіцієнтом заломлення, ніж серцевина (рис. 2). Поширення світла у світловоді відбувається за рахунок багаторазового відбиття випромінювання від його бічної поверхні.

Волоконно-оптичний кабель здійснюють передачу даних (голосових сигналів), які генеруються за допомогою імпульсів лазера (світлодіода). Вони можуть бути за типами як одномодові (SM Fiber, вища швидкість передачі даних та більша відстань), так і багатомодові (ММ-волокно, висока пропускна здатність при високих швидкостях на середні відстані) (рис. 3).





Рисунок 2. Волоконно-оптичний кабель

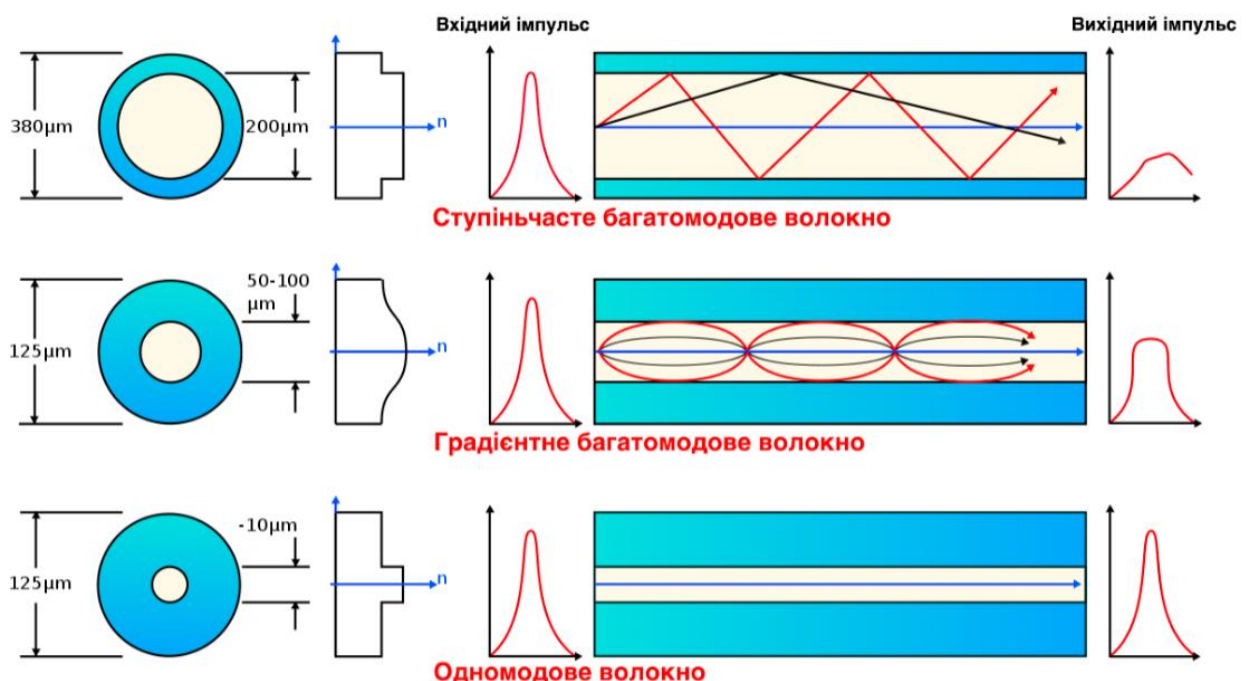


Рисунок 3. – Структура одномодових та багатомодових  
волоконно-оптичних кабелів

Волоконно-оптичні кабелі одномодового та багатомодового типу мають відмінні переваги залежно від діаметру сердечника, відстані передачі, пропускної здатності та вартості.

До основних відмінностей одномодових від багатомодовим волоконно-оптичних кабелів можливо віднести наступні:

- ядро – одномодовий кабель має менший діаметр сердечника (близько 9

мікрон), а багатомодовий – має більший (від 50 до 62,5 мікрон);

- відстань передачі – одномодовий кабель може передавати сигнали на великі відстані з мінімальними втратами сигналу, що робить його підходящим для великих відстаней, а багатомодовий – підходить для коротких відстаней у межах кількох сотень метрів;

- пропускна здатність та швидкість передачі даних – одномодовий має вищу пропускну здатність та підтримує швидші швидкості передачі даних порівняно з багатомодовим;

- джерело світла – одномодовий використовує лазерний діод, а багатомодовий – світлодіоди (лазери) як джерела світла;

- вартість – багатомодовий є більш вигідним з фінансової точки зору, ніж одномодовий;

- застосування – одномодовий ідеально підходить для ЛОМ, центрів обробки даних та телекомунікаційних мереж, які вимагають передачі даних на великі відстані, а багатомодовий – підходить для передачі даних високої швидкості у ЛОМ.

Організація комунікацій у ВОЛЗ на основі ЛВ має велику пропускну здатність, яка обумовлена високим значенням несучої частоти та можливістю передачі великих об'ємів даних з великою швидкістю. При цьому, невелика кутова розбіжність ЛВ забезпечує як високу енергетичну стійкість передачі даних по волоконно-оптичному каналу зв'язку при відносно малих габаритах приймально-передавальних пристроїв, так і високу прихованість.

Сутність розробки методу передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології FTTx на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ полягає у наступному. Необхідно передати дані у вигляді декілька електричних інформаційних сигналів, які у кодуєчому пристрої перетворюються до вигляду, зручному для модуляції, після чого надходять у модулятор-підсилювач і, далі, у ланцюг збудження модулятора.

Пристрій формування каналів передачі даних (пристрій) виділяє обрані поздовжні моди (несучі частоти) або комбінації поздовжніх мод (частоти

міжмодових биттів) зі спектра одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ для подальшої модуляції з електричними інформаційними сигналами та формує  $N$  каналів передачі даних.

У внутрішньому модуляторі здійснюється обрана модуляція за амплітудою, інтенсивністю, частотою, фазою або поляризацією сигналу несучої частоти або частот міжмодових биттів ЛВ відповідно до електричного інформаційного сигналу.

Модульовані несучі частоти або частоти міжмодових биттів у вигляді сумарного комбінованого сигналу ЛВ обробляються оптичною системою передавача та надсилаються по волоконно-оптичному каналу зв'язку до приймача. Приймальна оптична система фокусує прийнятий сигнал ЛВ на фотоприймач, вихідний електричний сигнал якого обробляється далі для виділення електричного інформаційного сигналу та передачі даних до споживачів.

Використання ЛВ у волоконно-оптичному каналі зв'язку вимагає накладення на несучу частоту сигналу, який містить дані (інформацію, яку необхідно передати). Модуляція ЛВ – це зміна одного або декількох параметрів випромінювання за заданим законом у просторі та/або у часі. Закон зміни модульованого параметра відповідає даним, що передаються (інформації).

Введення даних у ЛВ можливе різними способами. Можливо модулювати сигналом даних (інформаційним) інтенсивність ЛВ (амплітуду), частоту, фазу та поляризацію (рис. 4). Найбільше застосування має амплітудна модуляція через простоту конструкції відповідних пристроїв.



Рисунок 4. Можливі основні види модуляції електричного  
інформаційного сигналу у ВОЛЗ

Одним із важливих параметрів модулятора є глибина модуляції, яку  
можливо визначити за амплітудним значенням вихідного сигналу:

$$m = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}).$$

До модулюючих пристроїв можливо виділити наступні:

- модулятори – пристрої для зміни за заданим законом у часі одного (декількох) параметрів ЛВ;
- дефлектори – пристрої для зміни у часі положення пучка ЛВ;
- просторово-часові модулятори – пристрої для зміни у часі просторового розподілу інтенсивності, фази або поляризації пучка ЛВ.

Таким чином, формується вихідний комбінований інформаційний сигнал із заданими параметрами модуляції та вихідною потужністю.

За допомогою використання відомих методів активної синхронізації поздовжніх мод одномодового багаточастотного ЛВ можливо досягти високих характеристик вихідного ЛВ та виділити необхідні комбінації несучих частот для подальшої їх модуляції з електричними інформаційними сигналами, тим самим сформуванні декілька каналів передачі даних для технології FTTx.

Отже, для побудови ВОЛЗ перспективним є використання одномодового багаточастотного випромінювання твердотілого (напівпровідникового) лазера, працюючого на основній частоті  $TEM_{00q}$ , з синхронізацією поздовжніх мод та стабілізацією частот міжмодових биттів (рис. 5).

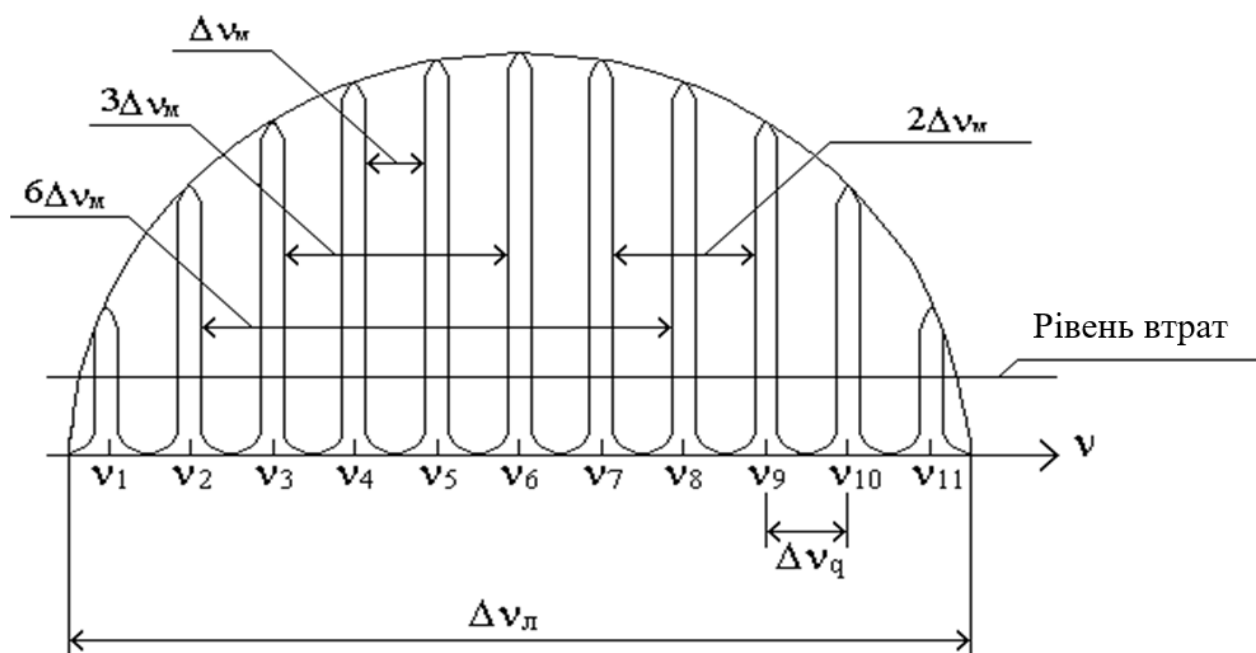


Рисунок 5. Спектр одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ

Самоузгоджені рівняння для частот, фаз та амплітуд багатомодової структури сигналу ЛВ можливо представити у наступному вигляді [158]:

$$A_n + \frac{1}{2} \cdot \frac{\nu}{Q_n} A_n = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\nu}{\varepsilon_0} S_n(t); \quad (1)$$

$$(\nu_n + \phi_n + \Omega_n) A_n = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\nu}{\varepsilon_0} C_n(t), \quad (2)$$

де  $A_n$  – амплітуда  $n$ -ої моди;  $\Omega_n$  – частота  $n$ -ої моди;  $\phi_n$  – фаза  $n$ -ої моди;  $Q_n$  – добротність резонатора;  $C_n$  – синфазний коефіцієнт поляризації середовища;  $S_n$  – квадратурний коефіцієнт поляризації середовища;  $\nu_n$  – частота міжмодових биттів;  $\varepsilon_0$  – напруженість електричного поля.

Пропонується передачу даних у ВОЛЗ для технології FTTx здійснювати як на несучих частотах (поздовжніх модах) [158], так і на частотах міжмодових биттів (комбінаціях поздовжніх мод), які виділяються пристроєм передачі даних (формування каналів передачі даних) зі спектру одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ (рис. 5).

Отже, за умови, коли  $S_n(t) = 0$ , за виразами (1) та (2) можливо отримати систему виразів для частот  $\nu_n$  ЛВ багаточастотного лазера, а потім, шляхом попарного віднімання з подальшого попередній вираз, відповідно і для частот міжмодових биттів, які потрібні, надалі, для формування, наприклад, 4-х перших каналів передачі даних:

$$\dot{\psi}_1 = \Delta\nu_{54} = \nu_5 - \nu_4 = \Delta\nu_M, \quad \dot{\psi}_3 = \Delta\nu_{63} = \nu_6 - \nu_3 = 3\Delta\nu_M, \quad (3)$$

$$\dot{\psi}_2 = \Delta\nu_{97} = \nu_9 - \nu_7 = 2\Delta\nu_M, \quad \dot{\psi}_4 = \Delta\nu_{82} = \nu_8 - \nu_2 = 6\Delta\nu_M.$$

де  $\dot{\psi}_n$  – частота міжмодових биттів для  $N$  вибраних поздовжніх мод.

Рівняння (3) можливо представити у вигляді суми необурених складових,

які залежні від частот міжмодових биттів  $\Delta\nu_1, \Delta\nu_2, \Delta\nu_3, \Delta\nu_4$  та обурених малих складових, які обумовлені наявністю сусідніх частот міжмодових биттів та близьких до них комбінаційних частот:

$$\Delta\nu_1 = \Delta\nu_M = \dot{\psi}_1 = A_{10} + \Delta A_{10}(t) + [B_1 + \Delta B_1(t)] \sin(\psi_1 + \Delta\dot{\phi}_1 t + \phi_1),$$

$$\Delta\nu_2 = 2\Delta\nu_M = \dot{\psi}_2 = A_{20} + \Delta A_{20}(t) + [B_2 + \Delta B_2(t)] \sin(\psi_2 + \Delta\dot{\phi}_2 t + \phi_2),$$

$$\Delta\nu_3 = 3\Delta\nu_M = \dot{\psi}_3 = A_{30} + \Delta A_{30}(t) + [B_3 + \Delta B_3(t)] \sin(\psi_3 + \Delta\dot{\phi}_3 t + \phi_3),$$

$$\Delta\nu_4 = 6\Delta\nu_M = \dot{\psi}_4 = A_{40} + \Delta A_{40}(t) + [B_4 + \Delta B_4(t)] \sin(\psi_4 + \Delta\dot{\phi}_4 t + \phi_4),$$

.....

$$\Delta\nu_m = \dot{\psi}_m = A_{m0} + \Delta A_{m0}(t) + [B_m + \Delta B_m(t)] \sin(\psi_m + \Delta\dot{\phi}_m t + \phi_m);$$

$$\Delta\nu_n = \dot{\psi}_n = A_{n0} + \Delta A_{n0}(t) + [B_n + \Delta B_n(t)] \sin(\psi_n + \Delta\dot{\phi}_n t + \phi_n), \quad (4)$$

де  $\Delta A_{m0} \ll A_{m0}$ ;  $\Delta B_m \ll B_m$ ;  $\Delta\dot{\phi}_m \ll \dot{\psi}_m$ ;  $m = 1, 2, \dots, n$  – комплексні числа ( $\Delta A_m$ ,  $\Delta\dot{\phi}_m$  та  $\Delta B_m$ ).

Спектр одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ містить комбінаційні частоти, близькі до частот  $\Delta\nu_1, \Delta\nu_2, \dots, \Delta\nu_n$ . З їх частотою змінюються інверсія населеності та амплітуда коливань. Тобто, змінюються коефіцієнти рівнянь системи виразів (4). При переважанні комбінаційної частоти  $\Omega_0$ , близькою до частоти міжмодових биттів  $\Delta\nu_l$ , малі складові першого рівняння (4) можливо розкласти у ряд Фур'є (у комплексній формі) наступним чином:

$$\{\Delta A_{10}; \Delta B_1; \Delta \phi_1\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \{\Delta A_{10}; \Delta B_1; \Delta \phi_1\} e^{ik\Omega_0 t}. \quad (5)$$

Отже, коефіцієнти першого рівняння системи виразів (4) є періодичними функціями часу з періодом:

$$T_0 = 2\pi/\Omega_0.$$

Для першої пари поздовжніх мод:

$$\nu_5 - \nu_4 = \Delta\nu_{54} = \Delta\nu_M,$$

яка виділяється для формування 1-го каналу передачі даних  $\Delta\nu_l$ , якщо  $\psi_1(t)$  є деяке рішення першого рівняння системи (4), то  $\psi_1(t + T_0)$ , також, буде рішенням такого рівняння, причому:

$$\psi_1(t) - \psi_1(t + T_0) = B_1 \{\sin[\psi_1(t) + \phi_1] - \sin[\psi_1(t + T_0) + \phi_1]\}. \quad (6)$$

Вираз (6) можливо привести до наступного вигляду:

$$\psi_1(t + T_0) - \psi_1(t) = 2\pi k, \quad (7)$$

де  $k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm \dots$

З виразу (7), функцію  $\psi_1(t)$  можливо представити у вигляді суми двох частин: лінійною за часом функцією та періодичною з періодом  $T$  наступним чином:

$$\psi_1(t) = n\Omega_0 t + \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} R_k e^{jk\Omega_0 t}. \quad (8)$$

де  $R_k$  – коефіцієнт розкладання, який задовольняє наступній умові:



$$|R_k| \ll 1; k = \pm 1; \pm 2; \pm \dots \quad (9)$$

Наведене вище вказує на те, що нерівність у рівнянні (4) справедлива, якщо виконується наступна умова:

$$B_1; |\Delta B_1|; |\Delta A_1|; |\Delta \dot{\phi}_1| \ll n\Omega_0. \quad (10)$$

Вираз (4) буде стійким за умови, коли він стійкий в усій області існування. Така область може бути визначена, наступним чином:

$$\left| m\Omega_0 - \left( A_{10} - \frac{B_{10}^2}{A_{10}^2} \right) \right| \leq \left[ |\Delta B_{1m}|^2 + \left( \frac{B_1}{m\Omega_0} \right)^2 |\Delta A_{1m} + \Delta \dot{\phi}_{1m}|^2 - \right. \\ \left. - 2 \frac{B_{10}}{m\Omega_0} |\Delta B_{1m}| |\Delta A_{1m} + \Delta \dot{\phi}_{1m}| \cos(\chi_m - \chi_{mB}) \right]^{1/2}; \quad (11)$$

де  $m=1, 2, \dots, 12$ ;  $\chi_m$  та  $\chi_{mB}$  – фази комплексних чисел  $\Delta A_{1m} + \Delta \dot{\phi}_{1m}$  та  $\Delta B_{1m}$ ;

$$\{\Delta A; \Delta B; \Delta \dot{\phi}\}_m = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \{\Delta A; \Delta B; \Delta \dot{\phi}\}_m e^{-jm\Omega_0 t} dt. \quad (12)$$

Отже, в області частот, що задовольняє співвідношенню (4), існує стійке рішення (11) для усіх рівнянь, що описують режим биття з комбінаційними частотами  $n\Omega_0$ . Це означає, що поздовжні моди синхронізовані, а частоти міжмодових биттів стабілізовані.

Комбінаційні частоти  $n\Omega_0$  близькі до частот  $\Delta \nu_1, \Delta \nu_2, \dots, \Delta \nu_n$ . При налаштуванні центральної моди поблизу центру спектральної лінії, частоти потрапляють у смугу захоплення та стають синхронізованими. Отже, відбувається стабілізація частот міжмодових биттів.

Отже, виділення з одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ комбінацій поздовжніх мод, необхідних для формування

каналів передачі даних можливо за умови використання різницевих частот міжмодових биттів:

$$\Delta v_{54}=v_5-v_4=\Delta v_m; \quad \Delta v_{97}=v_9-v_7=2\Delta v_m; \quad \Delta v_{63}=v_6-v_3=3\Delta v_m; \quad \Delta v_{82}=v_8-v_2=6\Delta v_m.$$

Таким чином, можливо записати структуру сигналів, що виділяються на виході пристрою передачі даних на частотах міжмодових биттів.

Визначити електричні поля кожної з частот, що виділені першої пари частот міжмодових биттів  $\Delta v_{54}=v_5-v_4=\Delta v_m$  можливо за наступною системою рівнянь:

$$E_5(t) = A_5 \sin[2\pi(v_L + 5\Delta v_m)t + \phi_5],$$

$$E_4(t) = A_4 \sin[2\pi(v_L + 4\Delta v_m)t + \phi_4].$$

Результуюче електричне поле сумарної електромагнітної хвилі ЛВ на виході пристрою для першої пари частот міжмодових биттів, що виділена можливо визначити за виразом:

$$\begin{aligned} E_5(t) + E_4(t) = 2A_{54} \sin \frac{2\pi(v_L + 5\Delta v_m)t + \phi_5 + 2\pi(v_L + 4\Delta v_m)t + \phi_4}{2} \times \\ \times \cos \frac{2\pi(v_L + 5\Delta v_m)t + \phi_5 - 2\pi(v_L + 4\Delta v_m)t - \phi_4}{2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Електричне поле різницевої частоти міжмодових биттів першої пари, що виділяється пристроєм, можливо визначити за наступним виразом:

$$E_{54}(t) = 2A_{54} \cos \frac{2\pi\Delta v_m t + \phi_5 - \phi_4}{2} = A_{54} \cos(2\pi\Delta v_m t + \phi_5 - \phi_4). \quad (14)$$

Електричні поля для кожної з частот, що виділені другої пари частот

міжмодових биттів  $\Delta v_{97}=v_9-v_7=2\Delta v_M$  можливо визначити за наступним виразом:

$$E_9(t) = A_9 \sin[2\pi(v_L + 9\Delta v_M)t + \phi_9],$$

$$E_7(t) = A_7 \sin[2\pi(v_L + 7\Delta v_M)t + \phi_7].$$

Результуюче електричне поле сумарної електромагнітної хвилі ЛВ на виході пристрою для другої пари поздовжніх мод, що виділена можливо визначити за виразом:

$$\begin{aligned} E_9(t) + E_7(t) = 2A_{97} \sin \frac{2\pi(v_L + 9\Delta v_M)t + \phi_9 + 2\pi(v_L + 7\Delta v_M)t + \phi_7}{2} \times \\ \times \cos \frac{2\pi(v_L + 9\Delta v_M)t + \phi_9 - 2\pi(v_L + 7\Delta v_M)t - \phi_7}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Електричне поле різницевої частоти міжмодових биттів другої пари, що виділяється пристроєм, можливо визначити за виразом:

$$E_{97}(t) = 2A_{97} \cos \frac{2\pi 2\Delta v_M t + \phi_9 - \phi_7}{2} = A_{97} \cos(2\pi 2\Delta v_M t + \phi_9 - \phi_7). \quad (16)$$

Електричні поля для кожної з частот, що виділені третьої пари частот міжмодових биттів  $\Delta v_{63}=v_6-v_3=3\Delta v_M$  можливо визначити за наступним виразом:

$$E_6(t) = A_6 \sin[2\pi(v_L + 6\Delta v_M)t + \phi_6],$$

$$E_3(t) = A_3 \sin[2\pi(v_L + 3\Delta v_M)t + \phi_3].$$

Результуюче електричне поле сумарної електромагнітної хвилі ЛВ на виході пристрою для третьої виділеної пари поздовжніх мод можливо визначити за виразом:

$$E_6(t) + E_3(t) = 2A_{63} \sin \frac{2\pi(\nu_L + 6\Delta\nu_M)t + \phi_6 + 2\pi(\nu_L + 3\Delta\nu_M)t + \phi_3}{2} \times$$

$$\times \cos \frac{2\pi(\nu_L + 6\Delta\nu_M)t + \phi_6 - 2\pi(\nu_L + 3\Delta\nu_M)t - \phi_3}{2}. \quad (17)$$

Електричне поле різницевої частоти міжмодових биттів третьої пари, що виділяється пристроєм, можливо визначити за наступним виразом:

$$E_{63}(t) = 2A_{63} \cos \frac{2\pi 3\Delta\nu_M t + \phi_6 - \phi_3}{2} = A_{63} \cos(2\pi 3\Delta\nu_M t + \phi_6 - \phi_3). \quad (18)$$

Електричні поля для кожної з частот, що виділені четвертої пари частот міжмодових биттів  $\Delta\nu_{82} = \nu_8 - \nu_2 = 6\Delta\nu_M$  можливо визначити за виразом:

$$E_8(t) = A_8 \sin[2\pi(\nu_L + 8\Delta\nu_M)t + \phi_8],$$

$$E_2(t) = A_2 \sin[2\pi(\nu_L + 2\Delta\nu_M)t + \phi_2].$$

Результуюче електричне поле сумарної електромагнітної хвилі ЛВ на виході пристрою для 4-ої виділеної пари поздовжніх мод можливо визначити за виразом:

$$E_8(t) + E_2(t) = 2A_{82} \sin \frac{2\pi(\nu_L + 8\Delta\nu_M)t + \phi_8 + 2\pi(\nu_L + 2\Delta\nu_M)t + \phi_2}{2} \times$$

$$\times \cos \frac{2\pi(\nu_L + 8\Delta\nu_M)t + \phi_8 - 2\pi(\nu_L + 2\Delta\nu_M)t - \phi_2}{2}. \quad (19)$$

Електричне поле різницевої частоти міжмодових биттів 4-ої пари, що виділяється пристроєм, можливо визначити за виразом:

$$E_{82}(t) = 2A_{82} \cos \frac{2\pi 6\Delta\nu_M t + \phi_8 - \phi_2}{2} = A_{82} \cos(2\pi 6\Delta\nu_M t + \phi_8 - \phi_2). \quad (20)$$

Запропоновано пристрій формування каналів передачі даних на частотах міжмодових биттів, що складається з перших 4-х каналів, кожен з яких, також, містить (рис. 6):

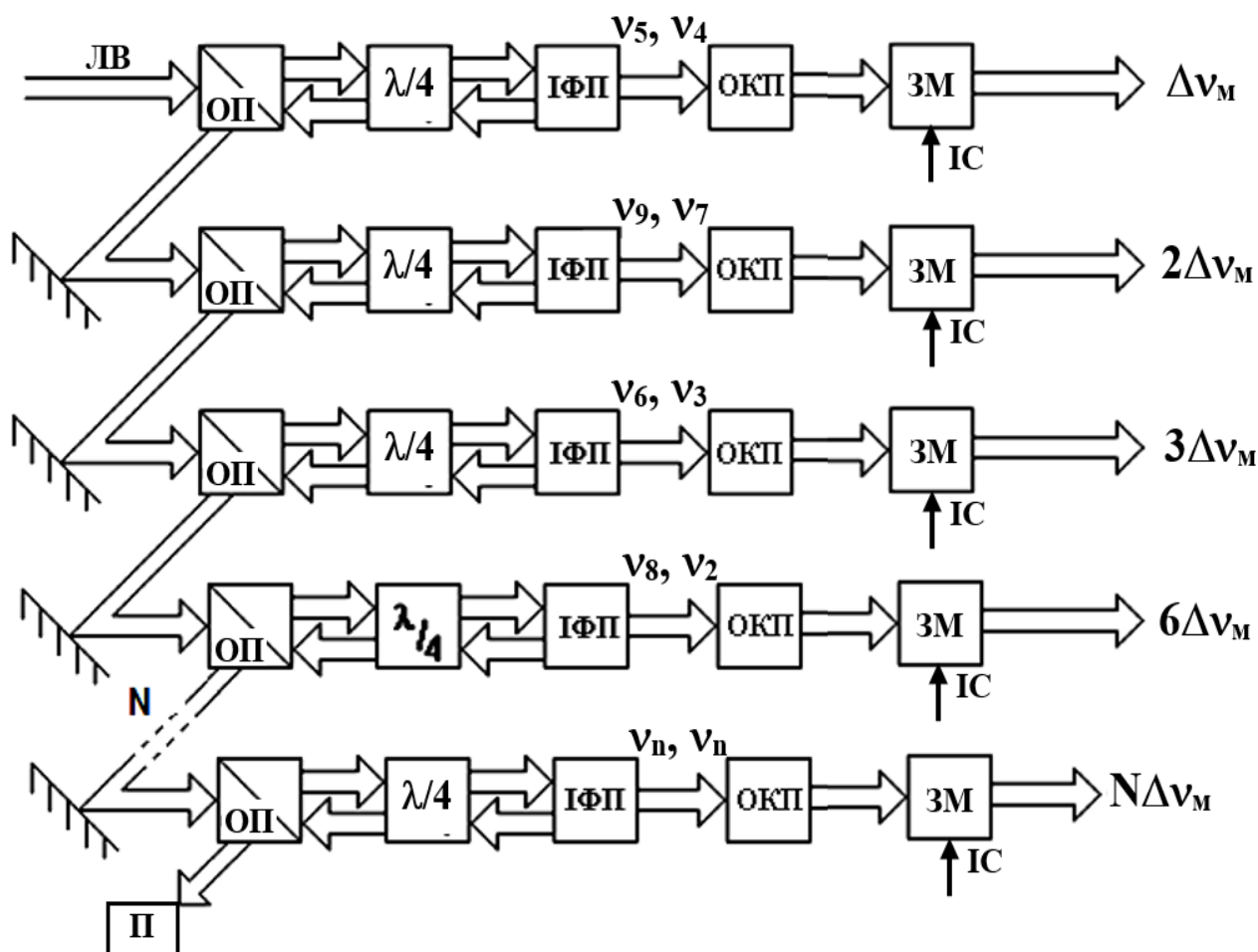


Рисунок 6. Функціональна блок-схема пристрою формування каналів передачі даних на великі відстані на частотах міжмодових биттів ЛВ

- оптичний поляризатор випромінювання (Оп), що призначений для пропускання певної поляризації поздовжніх мод;
- пасивну фазову пластинку ( $\lambda/4$ ), що призначена для повороту вектору  $E$  ЛВ, що проходить, на кут  $45^\circ$  за один прохід (у прямому або зворотному напрямках руху);
- вузькосмуговий ІФП, що налаштований на сигнал конкретної комбінації поздовжніх мод (несучих частот) та призначений тільки для її пропуску та відбиття поздовжніх мод, що залишились;

- змішувач (ЗМ), що призначений для модуляції виділеної поздовжньої моди (несучої частоти) з електричним інформаційним сигналом (даними), який надходить через введення ІС;
- оптичний квантовий підсилювач (ОКП), що призначений для підсилення виділеної комбінації поздовжніх мод (несучих частот);
- допоміжні дзеркала, що призначені для каналізації поздовжніх мод ЛВ;
- пастки (П), що призначена для гасіння поздовжніх мод, що залишилися та за своїми вихідними характеристиками непотрібні.

Після Оп виділеної пари поздовжніх мод (несучих частот)  $\nu_8, \nu_2$ , послідовно підключена решта  $N$  каналів передачі даних, кожен з яких складається аналогічним чином, як і попередні.

Робота пристрою формування каналів передачі даних на частотах міжмодових биттів ЛВ полягає у наступному. На вхід пристрою поступає одномодове багаточастотне з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ. Проходячи перший канал через Оп та  $\lambda/4$ , яка повертає вектор  $E$  ЛВ, що проходить, на кут  $45^\circ$  за один прохід, груповий сигнал поздовжніх мод поступає на ІФП.

ІФП пропускає першу пару частот  $\nu_5, \nu_4$  (рис. 5, 6), яка підсилюється ОКП, змішується з інформаційним сигналом у ЗМ та формує 1-й канал передачі даних.

Частина групового сигналу, що залишилася, яка була відбита дзеркалом ІФП, повертається та обертається фазовою пластиною ще на кут  $45^\circ$ . Виходячи через бічну грань Оп частина групового сигналу спрямовується допоміжним дзеркалом у наступний канал, де відбувається аналогічним чином виділення другої пари поздовжніх мод (несучих частот), необхідних для формування 2-го каналу передачі даних.

Аналогічним чином відбувається виділення і пар поздовжніх мод (несучих частот  $\nu_6, \nu_3=3\Delta\nu_m$  та  $\nu_8, \nu_2=6\Delta\nu_m$ ), що залишилися, які необхідні для формування 3-го та 4-го каналів передачі даних.

Виділення поздовжніх мод, необхідних для формування  $N$  каналів передачі даних здійснюється наступним чином. Сигнали усіх несучих частот, що

залишилися після виділеної пари поздовжніх мод (несучих частот  $\nu_8, \nu_2$ ) спрямовуються допоміжним дзеркалом у наступний канал пристрою, де відбувається виділення двох поздовжніх мод (несучих частот  $\nu_{n1}, \nu_{n2}$ ) аналогічним чином, як і для попередніх виділених пар поздовжніх мод.

Кількість каналів передачі даних залежить від попереднього розрахунку кількості поздовжніх мод (несучих частот  $\nu_n$ ), які мають необхідні вихідні характеристики для використання.

Частина сигналу, що залишився, спектр якого розташований нижче рівня втрат, через допоміжне дзеркало спрямовується у «пастку». Тобто, поздовжні моди, випромінювання яких дорівнює рівню втрат спектру ЛВ та невелике за потужністю, – не використовується.

На приклад, удосконалення методу передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології Fiber to the Home (FTTH) полягає у наступному. У відому технологію побудови мережі FTTH, за якої волоконно-оптичний кабель використовується для з'єднання центральної точки з окремими будівлями, введено розроблений пристрій формування каналів передачі даних, що дозволяє, завдяки використанню  $N$  несучих частот (багатомодового або багаточастотного) ЛВ збільшити об'єм та підвищити швидкість передачі даних. При цьому, у залежності від відстані між ППМ, можливо обрати варіанти пристрою – або з ОКП для великих відстаней (до 150 км), або без ОКП для відстаней, що складають декілька десятків кілометрів.

До основних варіантів розгортання удосконаленої мережі FTTH можливо віднести наступні: активна оптична мережа (AON, рис. 7), пасивна оптична мережа (PON, рис. 8) та з'єднання «точка-точка» (PTR).

Удосконалена активна оптична мережа – це мережа, яка заснована на архітектурі (структурі) мережі «точка-точка», при якій кожен користувач має спеціальну багатомодову волоконно-оптичну лінію.

За такою мережею у процесі передачі інформаційного сигналу, комутаційні пристрої, такі як маршрутизатори і комутаційні агрегатори, активні оптичні прилади тощо розгорнуті з офісної техніки до підрозділу розподілу

користувачів.

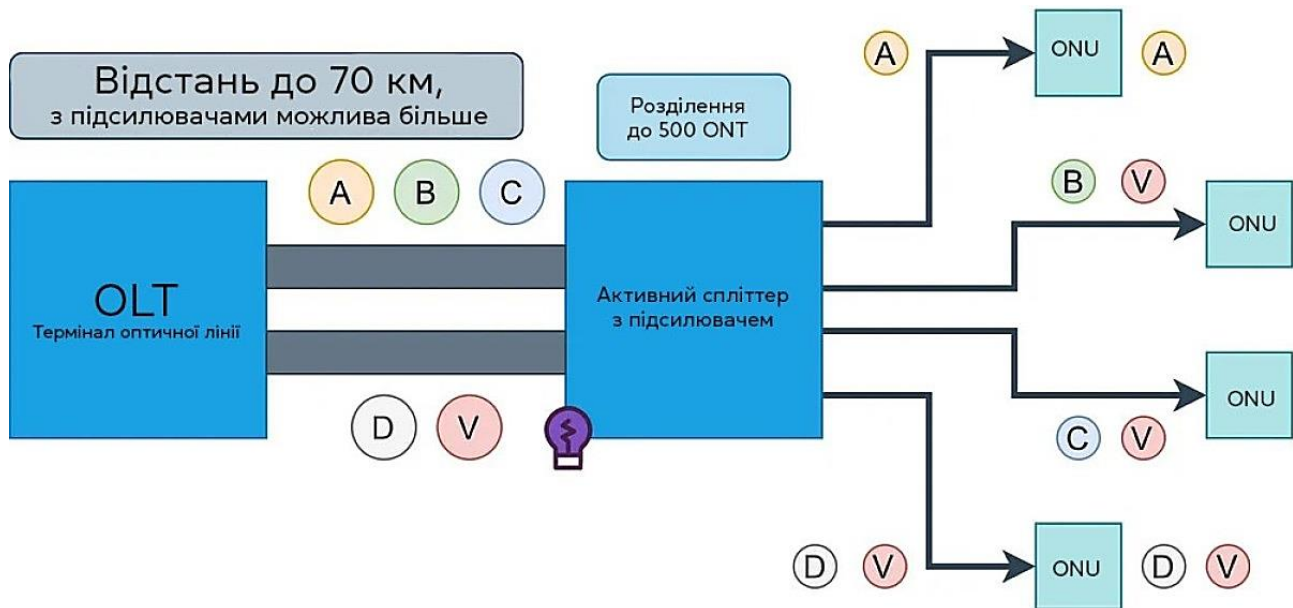


Рисунок 7. Структура активної оптичної мережі

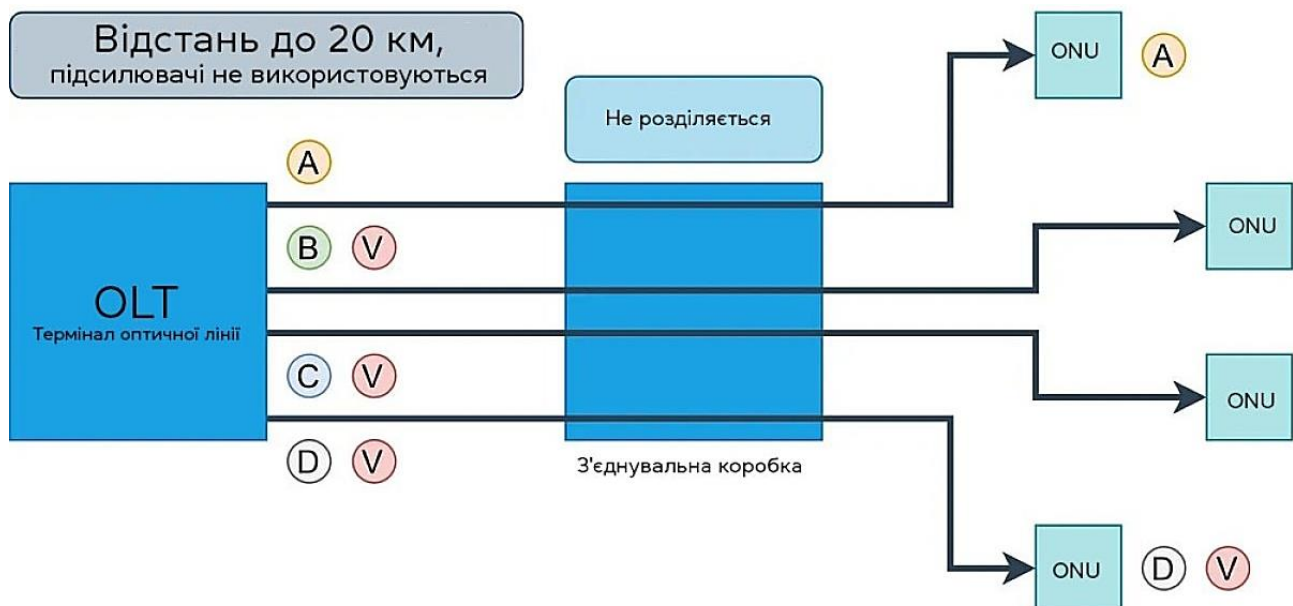


Рисунок 8. Структура пасивної оптичної мережі

Удосконалена пасивна оптична мережа – це мережа, яка заснована на архітектурі (структурі) мережі «точка-багатоточка» та є основною технологією реалізації FTTH. У PON використовується пасивні оптичні розгалужувачі



(оптична мережа розподілу, ODN), що дають змогу однієї магістральної багатомодової волоконно-оптичної лінії обслуговувати декілька кінцевих точок. При цьому, створення такої мережі пов'язане з низькими фінансовими витратами. Тому, для багатьох компаній PON є більш привабливою відносно AON. Максимальна відстань від передавача даних до приймача складатиме 20 км (рис. 8).

До основних компонентів удосконаленої PON можливо віднести наступні: лазер (одномодове багаточастотне з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ), пристрій формування каналів передачі даних, оптичні розгалужувачі та абонентські термінали, що забезпечують високошвидкісну передачу даних на великі відстані:

- термінал оптичної лінії (Optical Line Terminal, OLT) – це центральний вузол PON, який відповідає за управління мережею. Він як передає по N каналам передачі дані на Optical Network Unit (ONU), так і отримує від них у відповідь багаточастотні інформаційні сигнали;

- ONU – кінцева точка клієнта, яка відповідає за перетворення багатомодового ЛВ у електричний багаточастотний інформаційний сигнал, що використовується пристроями клієнта, виступаючи як шлюз;

- оптичний спліттер – це пасивний пристрій, що розділяє вхідне ЛВ на безліч вихідних променів. Тобто, перетворення у електричні багаточастотні інформаційні сигнали не потрібне. До коефіцієнтів поділу належать наступні: 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32 і 1:64, де перше число вказує на кількість вхідних променів, а друге – на кількість вихідних.

Сутність удосконаленої технології PON полягає у наступному. Клієнти підключаються до OLT через ONU, як описано вище. Перша частина з'єднання, від OLT до спліттера, є фідером, до складу якої входять багатомодові волоконно-оптичні нитки, що з'єднують OLT зі сплітером. Друга частина, що йде від спліттера до ONU та позначає кінець з'єднання є розподільчою мережею, до складу якої входять багатомодові волоконно-оптичні нитки, що з'єднують спліттер з ONU. Завдяки принципу роботи спліттера усі клієнти, під'єднані до

одного фідера та мають однакову пропускну здатність (отримують однакові дані). Призма, що знаходиться всередині ONT у поєднанні з криптографією фільтрує усю нерелевантну інформацію. Це суттєвою відмінністю удосконалених PON від AON, де кожен клієнт має свою власну виділену багатомодову волоконно-оптичну лінію від спліттера і далі.

Удосконалена AON є гнучким та високоефективним типом мережі, до основного складу якого входять компоненти (що дають змогу керувати маршрутизацією та підсиленням інформаційного сигналу):

- підсилювачі – це пристрої, що використовуються для підсилення інформаційного сигналу у аналоговому (цифровому) вигляді. За їх допомогою збільшується потужність (амплітуда) ЛВ, що проходять по багатомодовому волоконно-оптичному кабелю. Вони відіграють найважливішу роль у забезпеченні цілісності та якості сигналів на великих відстанях. Підсилювачі встановлюються у важливих місцях уздовж волоконно-оптичної мережі, щоб компенсувати втрати енергії та загасання сигналу, які відбуваються в міру проходження інформаційного сигналу по волоконно-оптичному кабелю;

- транспондери – це пристрої, що використовуються для перетворення багатомодового ЛВ (оптичних сигналів) у електричні інформаційні сигнали (дані) на приймальному боці та зворотно на передавальному боці – завдяки пристрою формування каналів передачі даних, що важливо для процесів маршрутизації, необхідних у AON. Вони забезпечують зв'язок між оптичними та електронними компонентами у мережі. При передачі даних транспондер, до складу якого входить пристрій формування каналів передачі даних, отримує електричний інформаційний сигнал, перетворює його на оптичний сигнал (багатомодове ЛВ) для передачі за багатомодовим волоконно-оптичним кабелем, а потім, на приймальному кінці, перетворює отриманий оптичний сигнал (багатомодове ЛВ) зворотно у електричний інформаційний сигнал для обробки електронним обладнанням та отримання даних;

- модулятори (ЗМ) – це ключові компоненти, що входять до складу пристрою формування каналів передачі даних та використовуються для

маніпулювання характеристиками оптичних сигналів (багатомодового ЛВ) за різними цілями. Вони модулюють інтенсивність, фазу та поляризацію (за вибором) оптичного сигналу (багатомодового ЛВ) у відповідь на електричний вхід.

Сутність удосконаленої технології AON ідентична PON: OLT є центральною точкою та відповідає за управління мережею та ONU є кінцевою точкою у будівлі (місці призначення), що перетворює оптичний сигнал (багатомодове ЛВ) у електричний інформаційний сигнал для подальшого отримання даних, а також використання пристроями клієнта та зворотно.

Відмінність AON від PON полягає у тому, що відбувається під час передачі даних (на етапі спліттера). У AON наявний пасивний спліттер PON замінюється активним компонентом (комутатором або маршрутизатором).

Комутатор (маршрутизатор) працює з електричними інформаційними сигналами, а не з багатомодовим ЛВ. Вхідне багатомодове ЛВ перетворюється після прийняття у електричний інформаційний сигнал. Пакет даних може бути перевірений та перетворений зворотно перед відправкою до приймача (споживача, клієнта).

Такий підхід дає змогу збільшити пропускну здатність «спліттерного» компонента за допомогою використання спеціальних протоколів (модуляцій) на стороні OLT, зверненої до клієнта, які видаляються перед надсиланням даних клієнту. До того ж, у удосконалених AON на відміну від PON, один OLT може обслуговувати понад 500 окремих ONT та, відповідно, будівель.

Удосконалені мережі AON та PON мають «фідерне» з'єднання, проміжний активний (пасивний) пристрій та кінцеві багатомодові волоконно-оптичні нитки до місця призначення. При цьому, РТР описує пряме з'єднання від аванпосту провайдера до клієнта без будь-яких перешкод на шляху (спліттер). Використовуються OLT та ONU. Жодних спеціальних активних пристроїв не задіяно.

Сутність удосконаленої технології мережі «точка-точка» полягає у наступному. OLT направляє багатомодове ЛВ на ONU, який перетворює його на

багаточастотний електричний інформаційний сигнал, що є відмінністю від удосконаленої PON, де сигнал розділяється на декілька променів та відправляється на ONU. При цьому, клієнт підключається виділеним багатомодовим волоконно-оптичним каналом та не ділить смугу пропускання з іншими сторонами. За таким підходом здійснюється поділ даних між клієнтами, що актуально у регіонах із жорсткими вимогами до конфіденційності даних.

До основних відмінностей даних трьох удосконалених технологій можливо віднести наступні:

- витрати у мережі – це витрати на живлення обладнання та його обслуговування. Удосконалена PON дешевше у експлуатації порівняно з удосконаленою AON, оскільки вимагає менше активних компонентів, меншого обслуговування та працює за загальною інфраструктурою. Вартість удосконаленої RTP дорівнює вартості удосконаленої AON через надлишкову кабельну інфраструктуру;

- покриття за дальністю. Удосконалена AON – є найкращим варіантом для покриття великих відстаней (понад 70 км для фідера та 20 км для розподільчої мережі). Удосконалена PON обмежено 20 км для фідера та розподільчої мережі, що еквівалентно і значенням для удосконаленої RTP;

- розділення багаточастотного інформаційного сигналу. Удосконалена PON – єдина технологія, яка оптично розділяє багатомодове ЛВ на декілька оптичних променів, а потім направляє їх до пристроїв ONU. У удосконаленої AON використовується загальний підхід щодо маршрутизації за допомогою комутаторів та маршрутизаторів, що є суттєвою відмінністю. Удосконалена RTP не передбачає поділу, оскільки багаточастотний сигнал відправляється на ONU;

- пропускна спроможність за високим навантаженням. Удосконалені AON та RTP (кращі варіанти) – надають виділені багатомодові волоконно-оптичні лінії кожному клієнту. Удосконалена PON обмежена загальною інфраструктурою, що знижує пропускну спроможність при високому навантаженні;

- безпека. Удосконалена AON забезпечує кращу безпеку, ніж

удосконалена PON, тому що забезпечує наскрізне шифрування та аутентифікацію, у той час як удосконалена PON забезпечує шифрування тільки у напрямку низхідного потоку. Удосконалена PTP є кращім варіантом. Однак, якщо враховувати той факт, що структура ЛВ, яка використовується є багатомодовою (багаточастотною), то завдяки використанню відомих методів шифрування за частотами можливо забезпечити потрібну безпеку передачі даних для удосконалених AON, PON та PTP.

Таким чином, до основних переваг використання удосконаленої кабельної ВОЛЗ для технології FTTx на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ відносяться наступні:

- висока швидкість передачі даних (висока пропускна здатність у одному каналі передачі даних із  $N$  каналів, що забезпечує декілька терабіт за секунду) на великі відстані (рис. 9);
- мінімальні втрати інформаційного сигналу на великі відстані;
- надійний захист від несанкціонованого доступу до даних, що передаються та перехоплення конфіденційної інформації та перешкодостійкість;
- мінімальне електроспоживання для передачі даних порівняно з традиційними методами передачі даних, такими як мідні кабелі;
- мінімальні втрати, так як ВОЛЗ не нагрівається при передачі даних;
- висока стійкість до зовнішніх впливів, таких як: електричні перешкоди, коливання температури та вологості, що дозволяє їм працювати надійно протягом довгого часу без необхідності у ремонті або заміні;
- висока стійкість до зношування, що забезпечує їх довговічність;
- універсальність у застосуванні при різних погодних умовах (висока та низька температура) тощо.



Рисунок 9. Пропускна здатність волоконно-оптичного кабелю з багатомодовою структурою ЛВ

За умови, якщо монтаж удосконаленої ВОЛЗ проведено відповідно до усіх технічних вимог, то вона забезпечить високі якості зв'язку та стійкість до електромагнітних перешкод, а також широку пропускну здатність (рис. 10). З точки зору фінансових витрат монтаж ВОЛЗ легко окупається за рахунок функціональних переваг даного типу телекомунікацій.

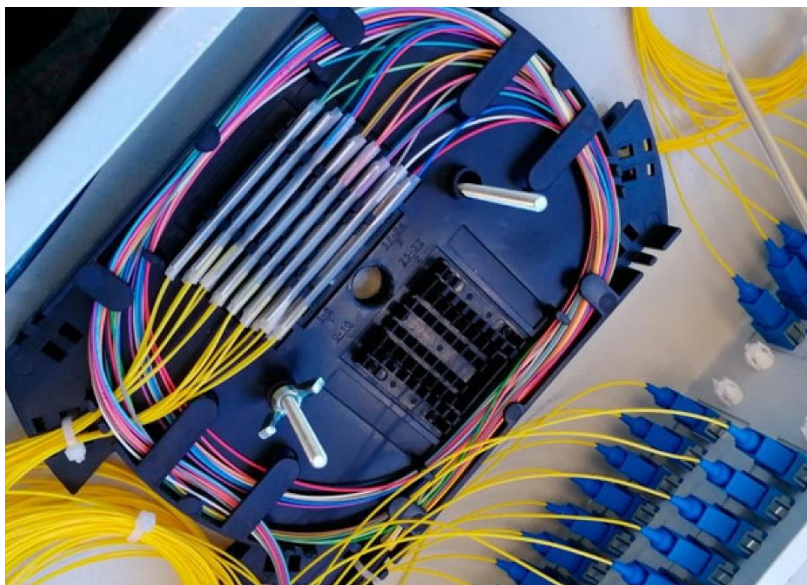


Рисунок 10. Монтаж ВОЛЗ

При цьому, волоконно-оптичному кабелю не загрожує окислення, він не

сприйнятливий до зовнішніх електромагнітних перешкод та не створює перешкод для сусідніх кабелів. Такий кабель має підвищений рівень захисту – його неможливо прослухати, а фізично підключитися до нього непомітно не вийде – одразу спостерігається погіршення якості сигналу, що буде відразу виявлено. Кабель не становить небезпеки при виникненні пожеж та у разі інших змін параметрів навколишнього середовища.

Однак, при монтажі ВОЛЗ слід враховувати й ряд її недоліків. Перш за все це крихкість самого волокна, яка при перегині може призвести як до погіршення якості їх передачі даних, так і поломки. При розриві відновити кабель «на ходу» не можливо – оптичне волокно потребує зварювання (наявність спеціальних пристроїв та досвідчених спеціалістів).

Коли монтується волоконно-оптичний кабель, прокладка впливає на силову конструкцію зі сталі, кевлару або укріпленого пластику. У разі перевищення допустимого рівня натягу кабелю може статися пошкодження волокна. Аналогічна ситуація з мінімальним радіусом вигину – щоб уникнути неполадок у роботі кабелю, необхідно робити плавні вигини та уникати гострих кутів.

Перш, ніж розпочати будь-які роботи з монтажу ВОЛЗ, необхідно візуально впевнитись у цілісності волоконно-оптичного кабелю та відсутності будь-яких зовнішніх пошкоджень. Для перевірки коротких відрізків кабелю на безперервність волокна можливо використовувати звичайні ліхтарики.

Також, слід вивчити лінію, якою здійснюватиметься прокладання ВОЛЗ, та виключити потенційно небезпечні елементи (гострі кути тощо). Після цього, монтажник ВОЛЗ повинен розподілити кабельну лінію з урахуванням того, щоб у місцях встановлення підсилювачів та у точках, де буде проводитися зварювання ВОЛЗ, був доступний запас волоконно-оптичного кабелю.

При цьому, на усіх відкритих кінцях кабелів мають бути надіті водонепроникні захисні ковпачки. За умови, якщо застосовується стандартне прокладання, то волоконно-оптичний кабель укладається безпосередньо у кабельний лоток з барабана.

При монтажі ВОЛЗ волоконно-оптичний кабель укладається у лоток. При цьому, головне дотримати параметри механічного навантаження та мінімального радіуса вигину. Також, важливо не допустити перетину з іншими кабельними лініями та тиску на кабель.

За умови, якщо проектування ВОЛЗ здійснюється з кабелями з кінцевим закладенням, то необхідно приділити особливу увагу акуратному поводженню з роз'ємами: не можна допустити їх забруднення, механічне пошкодження та надмірних навантажень у області з'єднання.

Коли волоконно-оптичний кабель укладено у лоток, то його слід закріпити за допомогою нейлонових стяжок, щоб уникнути його сповзання та провисання. У деяких випадках, неможливо використовувати спеціальні кріплення для кабелів. Тому, як альтернативу, можливо застосувати хомути із захисним пластиковим покриттям. При цьому, кожним хомутом можливо зафіксувати лише один кабель, а не стягувати кілька кабелів відразу.

У разі пошкодження волоконно-оптичного кабелю під час монтажу необхідно помітити цей відрізок та залишити запасне опто-волокно, зварювання якого допоможе виправити дефект.

Дотримання перелічених рекомендацій дозволить зробити якісний монтаж волоконно-оптичного кабелю та забезпечити стабільну та надійну роботу удосконаленої ВОЛЗ.

**Висновки.** Таким чином, розроблено метод передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології FTTx на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ.

Доведено структуру технології FTTx та розкрито особливості кабельної ВОЛЗ. Технологія FTTx забезпечує високу якість зв'язку, яка необхідна для сучасних цифрових сервісів. Вона вважається найперспективнішою для побудови мереж майбутнього. Попри високу початкову вартість, її переваги у довгостроковій перспективі значно переважають недоліки.

Волоконно-оптичний кабель відноситься до пасивних елементів ВОЛЗ. Головна функціональна частина кабелю – тонка скло-волоконна жила, покрита



захисним шаром зовнішньої оболонки. Кабель ВОЛЗ ділиться на два основні види – багатомодові кабелі, де світловий сигнал поширюється хвилеподібно зі стабільною швидкістю, що забезпечує відмінні властивості імпульсу та одномодові кабелі, де промені світла витягуються у пряму лінію, завдяки чому імпульс отримує практично ідеальні характеристики.

Розроблено пристрій передачі даних для технології FTTx. Пристрій виділяє подовжніх моди зі спектру одномодового багаточастотного з синхронізацією подовжніх мод ЛВ та модулює лазерні сигнали, що випромінюються на комбінаціях несучих частотах з електричними інформаційними сигналами, що дозволяє створити загальну систему збільшення об'єму та підвищення швидкості багатоканальної передачі даних до споживачів.

Отримані аналітичні вирази для розрахунку результуючих електричних полів частот міжмодових биттів (комбінацій подовжніх мод), а також їх амплітуди, які дозволяють врахувати виділені подовжні моди, їх глибину модуляції, частоту та фазу.

Розкрито сутність удосконалення методу передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології FTTH. При виборі типу удосконаленої мережі AON, PON та PTP, необхідно враховувати наступне: послуги мережі, загальну топологію та вимоги споживачів. Тому, для операторів можливо застосовувати поєднання одразу декількох мереж. При цьому, у мережевих архітектурах будь-яка багатомодова ВОЛЗ може бути використовуватися по черзі за різними типами удосконалених мереж. Використання в удосконаленій технології FTTH пристрою формування каналів передачі даних дозволяє також зробити виділені (приватні) канали.

Виділений канал Інтернету – це рішення для різного роду компаній (підприємств тощо), які потребують стабільного та безперебійного доступу до мережі. На відміну від широкосмугового зв'язку, який може пропонувати швидкість до 1 Гбіт/с, виділений канал гарантує постійну пропускну здатність, незалежно від завантаженості мережі та кількості підключених користувачів. Такий підхід може бути ключовою технологією для бізнесів, які працюють з великими об'ємами даних (критичними процесами для підприємств тощо).

Розкрито особливості монтажу удосконаленої ВОЛЗ. Надані рекомендації загального характеру по монтажу, що дозволить зробити якісний монтаж волоконно-оптичного кабелю та забезпечити стабільну та надійну роботу удосконаленої ВОЛЗ.