

**Міністерство освіти і науки України
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова**

Кафедра телекомунікаційних систем

Кись О.М., Корнійчук В.І.

**ПРОЕКТУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ
ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ**

Навчальний посібник

з курсового та дипломного проектування

для студентів, що навчаються за напрямом «Телекомунікації»

Одеса 2014

Рецензент: В.О. Брескін, проф. каф. ТКС ОНАЗ ім. О.С. Попова

Кись О.М., Корнійчук В.І. Проектування волоконно-оптичної транспортної мережі: Навчальний посібник з курсового та дипломного проектування. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. – 92 с.: іл.

В першій частині викладено методику дипломного (курсowego) проектування транспортної мережі з застосуванням цифрових систем передачі синхронної цифрової ієрархії.

У другій частині наведено матеріал з дослідження лінійних трактів оптичних мереж, що може бути корисним при виконанні дипломних та магістерських робіт. Подані приклади розрахунку тракту:

- за енергетичними (сигнальними та шумовими параметрами) – так званий «бюджет потужності системи»;
- за параметрами інерційності – «бюджет системи за часом наростання фронту імпульсу».

Студент в процесі проектування, після виконання розрахунку довжини ділянки підсилення (регенерації) за енергетичними показниками, має вибрати компоненти тракту зі значеннями часу наростання, які забезпечують необхідну швидкодію (ширину смуги пропускання) проектуємого лінійного тракту ВОСП.

Для студентів, що навчаються за напрямом «Телекомунікації»

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри
телекомунікаційних систем
і рекомендовано до друку.
Протокол № 6
від 09.03. 2013 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО
методичною радою
академії зв'язку.
Протокол №3/14 від 09.04.2013 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
В. 1 Системи передачі багатомодовими волокнами	4
В. 2 Системи передачі одномодовими волокнами	6
В. 3 Системи передачі зі спектральним мультиплексуванням сигналів	8
1 ПРОЕКТУВАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЦСП СИНХРОННОЇ ІЄРАРХІЇ	12
1. 1 Вибір траси ВОЛП	12
1. 2 Топологія та архітектура мереж зв'язку СЦІ	13
1. 3 Методи резервування у синхронних цифрових мережах	15
1. 4 Складання мультиплексного плану і визначення рівня ієрархії ЦСП СЦІ	22
1. 5 Вибір марки оптичного кабелю	25
1. 6 Технічні параметри апаратури СЦІ компанії ERICSSON	28
1. 7 Розрахунок довжини регенераційної ділянки	30
1. 8 Розміщення необслуговуваних регенераційних пунктів	32
1. 9 Розробка схеми організації зв'язку	33
1. 10 Розробка схеми синхронізації мережі	37
2 ПРОЕКТУВАННЯ ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ТА ЧАСОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ	40
2. 1 Проектування лінійного тракту за енергетичними параметрами	40
2. 1. 1 Основні компоненти лінійного тракту	40
2. 1. 2 Проектування лінійного тракту «точка-точка»	45
2. 1. 3 Проектування ретранслятора О-Е-О-типу	47
2. 1. 4 Проектування лінійного тракту з ретрансляторами	48
2. 1. 5 Розрахунок шумових параметрів лінійного тракту	49
2. 2 Проектування лінійного тракту за часовими параметрами	51
2. 2. 1 Швидкодія компонентів лінійного тракту	52
2. 2. 2 Алгоритм проектування інерційного лінійного тракту	55
2. 2. 3 Проектування цифрового тракту з багатомодовими ОВ	57
2. 2. 4 Проектування аналогового тракту з багатомодовими ОВ	59
2. 2. 5 Проектування цифрового тракту рівня STM-1 з одномодовими ОВ	61
2. 2. 6 Проектування WDM тракту рівня STM-16	62
2. 2. 6. 1 Розрахунок бюджету потужності	63
2. 2. 6. 2 Розрахунок бюджету часу наростання	63
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	68
ДОДАТКИ	69
Д.1 Оптичні кабелі виробництва ВАТ «Одескабель»	69
Д.2 Узагальнена функціональна схема мультиплексора	70
Д.3 Інтерфейс G.703	73
Д.4 Параметри ЕОП	80
Д.5 Параметри ОЕП	81
Д.6 Параметри ООП	81
Д.7 Ширина смуги пропускання електричного й оптичного сигналів ОВ	83
Д.8 Застосування логарифмічних одиниць у розрахунках	84
Д.8.1 Логарифмічна одиниця «дБ»	84
Д.8.2 Логарифмічна одиниця «дБм»	85
Д.8.3 «Електричні» й «оптичні» дБ	86
Д.8.4 Правила виконання розрахунків у логарифмічних одиницях	89

ВСТУП

Зв'язок по оптичному волокну (ОВ) є переважним для передавання великих обсягів інформації на значні відстані. ОВ є найбільш досконалим середовищем передавання, бо забезпечує малі втрати при дуже широкій смузі пропускання, низькі спотворення сигналу, хорошу електромагнітну сумісність, довговічність. Оптичні і бездротові комунікації зараз є найбільш важливими засобами зв'язку. Оптичні волокна не застосовуються скрізь, але там, де використовуються, вони забезпечують рекордні швидкості передавання (десятки Тбіт/с одним (або парою) ОВ). На противагу їм, радіозв'язок може застосовуватися практично скрізь, але при передаванні в широкій смузі частот має місце погіршення якості.

Нижче стисло розглянута історія розвитку оптичних систем передачі.

В.1 Системи передачі багатомодовими волокнами

На рис. В.1 показані структурні схеми, що ілюструють еволюцію волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП). Експерименти, виконані англійськими вченими Као і Хокхемом, у середині 1960-х років показали, що скляні хвилеводи підходять для передавання інформації. Виготовити ОВ з низьким загасанням вдалося тільки на початку 1970-х років дослідниками з лабораторій Корнінг і Белл Систем. Це оптичне волокно з кварцового скла має три «вікна прозорості» – 850; 1300 і 1550 нм в ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль. Найменший коефіцієнт загасання (приблизно 0,25 дБ/км) має місце у вікні 1550 нм і близько 0,5 дБ/км у вікні 1300 нм, рис. В.2. Перші волокна дозволили передавати оптичні сигнали на відстань у декілька десятків км без регенерації. При більшій віддаленості передавання необхідні оптоелектронні (О-Е-О) регенератори, які перетворюють спотворений оптичний (О) сигнал в електричний (Е), регенерують його і знов перетворюють в оптичний (О), який надходить на наступну ділянку регенерації.

Першими були створені *багатомодові* (multimode) БМ ОВ. Вони мають діаметр світлонесучої серцевини 50 мкм, що набагато перевищує значення робочої довжини хвилі оптичного сигналу. З цієї причини БМ ОВ підтримують передавання багатьох *мод розповсюдження* (propagation mode), що йдуть серцевиною волокна з різною фазовою швидкістю.

Іншими важливими компонентами, необхідними для ВОСП, є *джерела і приймачі випромінювання*. Напівпровідникові джерела випромінювання – світлодіоди (СД) і лазерні діоди (ЛД) – перетворюють електричний сигнал в оптичний (Е/О перетворення). У цифровій системі передавач (СД, ЛД) вмикається на інтервал часу передавання логічної "1" і вимикається на такий самий відрізок часу передавання логічного "0" при застосуванні лінійного коду без повернення до нуля (non-return-to zero – NRZ). Напівпровідникові приймачі випромінювання – фотодіоди (ФД) і лавинні ФД – в приймальному обладнанні – перетворюють прийнятий сигнал з оптичної до електричної області (О/Е перетворення).

Перші ВОСП (кінець 1970 – початок 1980-х років) застосовували БМ ОВ і СД або ЛД, що працювали на довжинах хвиль 850 або 1300 нм.

Передавальні пристрої на основі СД забезпечують невисоку, введену до ОВ, потужність випромінювання і мають широкий спектр випромінювання 20...120 нм. Від лазерного передавача в ОВ вводиться більша потужність світла, ніж від СД, чим забезпечується довша ділянка регенерації. Перші ЛД були *багатомодовими* (БМ) лазерами з резонатором Фабрі-Перро (ФП) і мали досить широкий спектр випромінювання 2...10 нм, що складається з ряду піків (спектральних ліній), які свідчать про багатомодовий характер випромінювання (звідси і термін БМ). Відзначимо, що *повздовжні моди* лазера відрізняються від мод, здатних розповсюджуватися оптичними волокнами! Обидва прилади (СД і БМ ЛД) випромінюють світло в широкому спектрі, проте СД має суцільний (неперервний) спектр, тоді як спектр світла від ЛД є дискретним.

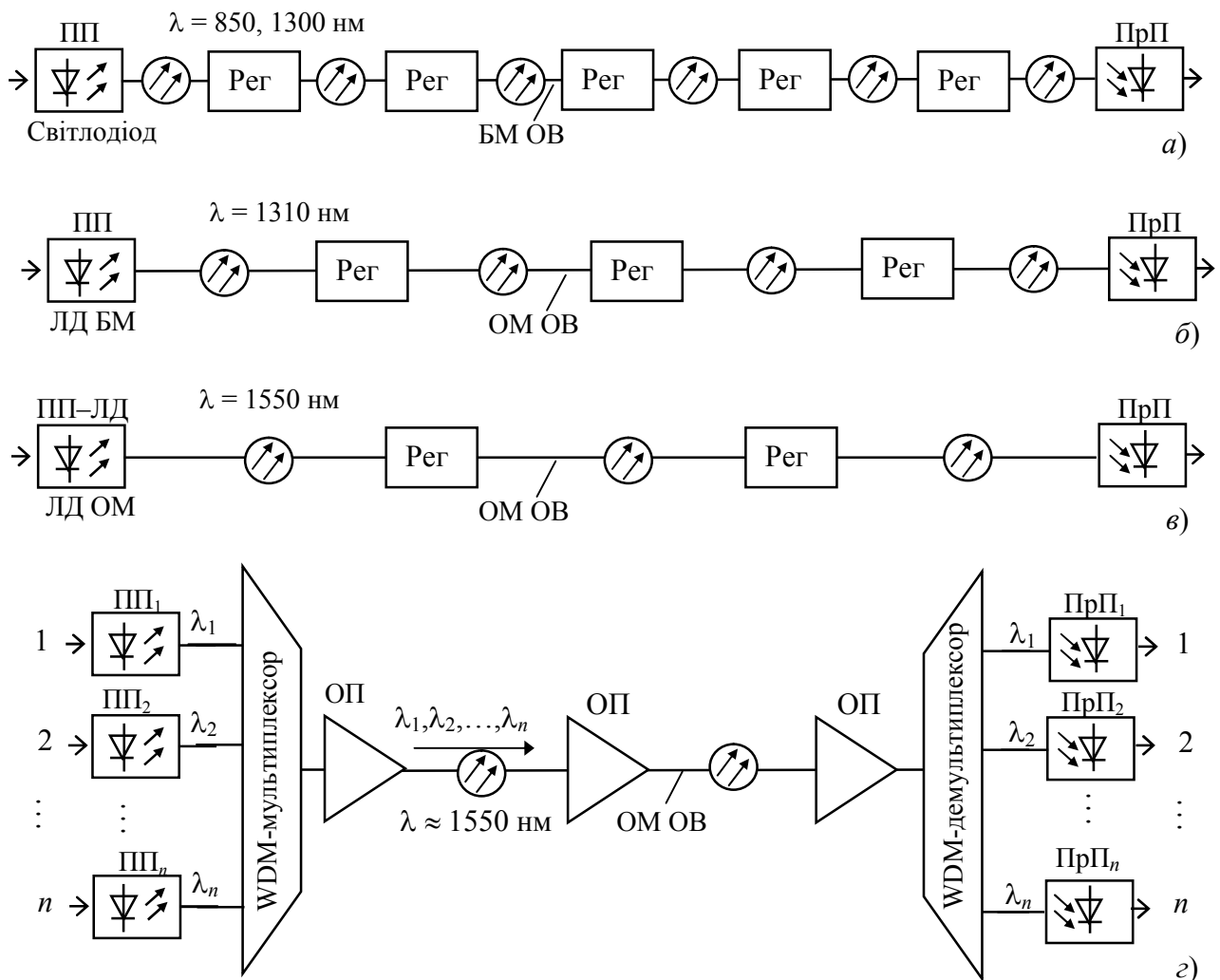


Рисунок В.1 – Структурні схеми ВОСП: а) багатомодова із застосуванням СД на $\lambda = 850 \text{ нм}$ або 1300 нм ; б) одномодова з БМ лазерами на $\lambda = 1310 \text{ нм}$; в) одномодова з ОМ лазерами на $\lambda = 1550 \text{ нм}$; г) WDM система на $\lambda = 1550 \text{ нм}$ з оптичними підсилювачами (ОП) замість регенераторів (Рег) О-Е-О типу

У перших ВОСП (рис. В.1, а) регенератори включалися в лінію через кожні декілька кілометрів. Регенератори були (і продовжують залишатися) досить дорогими пристроями, тому бажано максимізувати відстань між

регенераторами. Обмеження довжини ділянки регенерації було пов'язане з явищем, відомим як *модова (міжмодова) дисперсія* (intermodal dispersion). Енергія імпульсу у БМ ОВ розповсюджується багатьма порціями по різних траєкторіях з відмінною фазовою швидкістю. Різні моди досягають кінця волокна в відмінні моменти часу, що призводить до збільшення тривалості (розширення) імпульсу. Це є еквівалентним звуженню смуги пропускання середовища передавання. Розширення імпульсу у ВОСП назвали *дисперсією сигналу*, а цей конкретний вид дисперсії, що пов'язаний з багатопробієвим

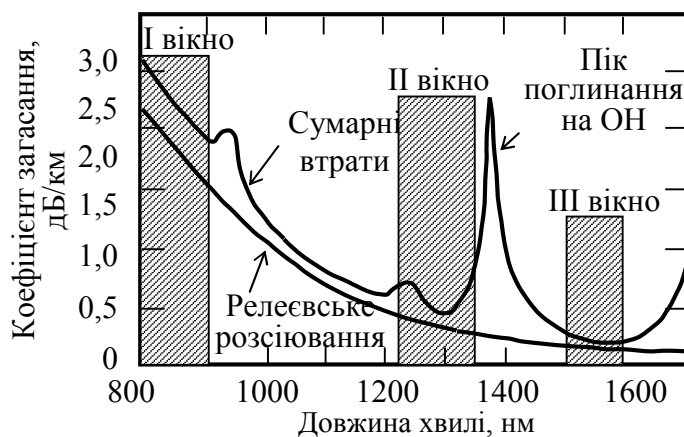


Рисунок В.2 – Залежність коефіцієнта загасання стандартного ОМ ОВ від довжини хвилі (старе трактування вікон прозорості ОВ)

характером розповсюдження сигналу, – модовою дисперсією. Перші системи працювали на швидкості 2...140 Мбіт/с (плезіохронна цифрова ієрархія). Регенератори встановлювалися приблизно через 10 км. Багатомодові ОВ і зараз застосовуються в локальних обчислювальних мережах (ЛОМ). При швидкості в декілька Мбіт/с вони забезпечують дальність передавання в декілька км, а при гігабітній швидкості – лише сотні метрів.

В.2 Системи передачі одномодовими волокнами

Приблизно з 1984 р. почалося створення другого покоління ВОСП. У них використовувалася довжина хвилі 1310 нм і одномодове ОВ, в якому усунена модова дисперсія. Одномодове оптичне волокно (ОМ ОВ) має порівняно малий діаметр світлонесучої серцевини (приблизно 8...10 мкм), який лише у декілька разів перевищує робочу довжину хвилі. Це забезпечує передавання усієї енергії оптичного сигналу у вигляді єдиної моди. Застосування ОМ ОВ нівівлювало модову дисперсію і дозволило збільшити і швидкість передавання, і відстань між регенераторами. Ці системи мали довжину ділянки регенерації приблизно 40 км при швидкості передавання 140 Мбіт/с. Максимальна відстань між регенераторами тут обмежувалася загасанням у волокні, а не дисперсією.

Наступним кроком було створення в кінці 1980-х років ВОСП з робочою довжиною хвилі 1550 нм, щоб скористатися перевагами малих втрат у ОВ в цьому вікні прозорості. Це забезпечувало подвоєння довжини ділянки регенерації.

В області довжин хвиль 1550 нм інше явище, а саме, *хроматична дисперсія* (chromatic dispersion), стає чинником, що обмежує швидкість передавання інформації (довжину ділянки регенерації). Хроматична дисперсія є другим видом дисперсії сигналів в ОВ, на відміну від раніше розглянутої модової дисперсії. Енергія оптичного сигналу (імпульсу) зосереджена в

спектральній смузі кінцевої ширини. Навіть у ОМ ОВ різні *спектральні компоненти імпульсу* розповсюджуються з відмінними швидкостями внаслідок фундаментальних фізичних властивостей скла. Цей ефект призводить до розширення імпульсу на виході, подібно тому, як це було при багатомодовому передаванні. Чим ширше спектр вхідного імпульсу, тим більше він розширюється внаслідок хроматичної дисперсії.

Хроматична дисперсія ОВ залежить від довжини хвилі світла. Стандартне кварцове одномодове волокно (*standard single-mode fiber – SSF*) має нульову хроматичну дисперсію у вікні прозорості 1300 нм, але вона є суттєвою на довжині хвилі 1550 нм. Хроматична дисперсія, яка не була проблемою на довжині хвилі 1300 нм, стала чинником, що обмежує швидкість/дальність передавання на довжині хвилі 1550 нм.

Високе значення хроматичної дисперсії сигналу на довжині хвилі 1550 нм мотивувало розробку ОВ зі зміщеною (у це вікно) нульовою дисперсією (*dispersion-shifted fiber – DSF*). Таке ОМ ОВ було розроблене для забезпечення мінімальної дисперсії сигналу в третьому вікні прозорості, щоб хроматична дисперсія в цьому вікні не обмежувала дальність передавання. Проте до цього часу було вже прокладено багато тисяч км стандартного ОМ ОВ (у світі обсяг прокладеного стандартного ОМ ОВ перевищує 90 %). ОВ DSF типу складає незначну частину від вже прокладеного на мережах ОВ. У порівняно великих кількостях ОВ такого типу було прокладено в США, Японії, Італії та Мексиці. Сьогодні нові ВОСП із волокном такого типу не будуються.

Дослідники почали шукати шляхи подолання хроматичної дисперсії, продовжуючи використовувати стандартне ОМ ОВ. Головним напрямом досліджень стало зменшення ширини спектра випромінювання ЛД. В кращому разі ширина спектра джерела випромінювання, повинна дорівнювати ширині смуги модулюючого сигналу. Більш того, ширина передаваного по ОВ спектра лінійного сигналу може повністю визначатися шириною спектра випромінювання застосованого передавача.

Відомо, що БМ лазери з резонатором ФП генерують випромінювання з шириною спектра 2...10 нм. Це еквівалентно смузі у сотні ГГц, що суттєво більше ширини смуги модулюючого сигналу (одиниці-десятки ГГц). Якщо зменшити ширину спектра ЛД до ширини смуги модулюючого сигналу, спотворення внаслідок хроматичної дисперсії значно зменшуються.

Це мотивувало розробку лазерного джерела з вузьким спектром. Лазер з розподіленим зворотним зв'язком (*distributed-feedback – DFB*) є прикладом одномодового лазера з однією поздовжньою модою (*single-longitudinal mode – SLM*). Одномодовий лазер генерує світло на одній довжині хвилі і це технологічне досягнення дозволило збільшити швидкість передавання до 1...10 Гбіт/с.

В.3 Системи зі спектральним мультиплексуванням сигналів

Наступною важливою віхою у розвитку ВОСП було створення *підсилювачів на основі легованого ербієм волокна (erbium-doped fiber amplifiers – EDFA)* в кінці 1980 та на початку 1990-х років. Основним компонентом EDFA є *активне* одномодове ОВ завдовжки в декілька десятків метрів, серцевина якого легована рідкоземельним елементом – ербієм (erbium – Er).

Атоми ербію в активному ОВ накачуються за допомогою зовнішнього потужного джерела світла і при цьому переходять зі стаціонарного (низькоенергетичного) до збудженого (високоенергетичного) стану. Фотон сигналу, що надходить в таке середовище, стимулює переходи збуджених атомів ербію до низькоенергетичного стану. При цьому кожен атом ербію випускає фотон, що є когерентним з сигнальним фотоном. Таким чином, фотони сигналу, що надходять з лінії, викликають *емісію* додаткових фотонів, тобто відбувається оптичне підсилення у 20...30 дБ.

Унаслідок унікальної різниці в значеннях енергетичних станів атомів ербію при переходах між рівнями створюється сигнал з довжиною хвилі близько 1550 нм (довжина хвилі мінімального загасання в ОВ!). Накачування здійснюється від лазера, що генерує світло на довжині хвилі меншій, ніж довжина хвилі сигналу (980 або 1480 нм). Перші придатні до застосування широкосмугові оптичні підсилювачі з великим коефіцієнтом підсилення були створені в 1987 р. і стали комерційно доступними на початку 1990-х років після розробки потужних, компактних і надійних напівпровідникових лазерів накачування.

Поява EDFA підштовхнула до створення третього покоління ВОСП. Головна перевага EDFA полягає в тому, що вони здатні одночасно підсилювати сигнали на багатьох довжинах хвиль в області 1550 нм. Ця властивість забезпечила принципово іншу стратегію нарощування пропускної здатності системи передачі. Замість того, щоб збільшувати швидкість передавання на єдиній довжині хвилі, по волокну одночасно передається декілька довжин хвиль, тобто використовується мультиплексування оптичних сигналів з розділенням за довжиною хвилі (*wavelength division multiplexing – WDM*).

Застосування технології WDM разом з EDFA дозволило суттєво збільшити пропускну здатність і знизити вартість системи передачі, приведеної до одного каналу ТЧ і 1 км лінії передачі. У WDM системах у проміжних пунктах один оптичний підсилювач замінив декілька дорогих регенераторів О-Е-О типу. Це виявилось вигідним, тому телекомунікаційні оператори стали широко запроваджувати WDM системи з оптичними підсилювачами. WDM системи виявилися такими, що швидко реалізуються і дозволяють динамічно нарощувати інформаційну ємність системи передачі.

У 1996 р. вдалося досягти швидкості передавання по оптичному волокну 1 Тбіт/с. WDM системи з EDFA почали застосовуватися у середині 90-х років і в цей час досягнуті швидкості, що перевищують 10 Тбіт/с в одному волокні. При цьому швидкість передавання в одному спектральному каналі збільшилася до 10 і навіть 40 Гбіт/с.

З появою систем з EDFA зменшення хроматичної дисперсії знову стало актуальним завданням. Замість того щоб відновлювати сигнал через кожні 40...80 км, сигнали в WDM системах передаються на значно більшу відстань завдяки посиленню в EDFA, що призводить до істотно більшого розширення імпульсу внаслідок хроматичної дисперсії сигналів в ОВ.

Спектр лінійного сигналу можна зменшити за допомогою зовнішнього оптичного модулятора. При безпосередній (більш простій і дешевій, ніж зовнішня) модуляції виникають перехідні процеси, що розширюють спектр лінійного оптичного сигналу. Це явище назвали *чирпом* (chirp) або *чирпінгом*. Використання зовнішніх модуляторів разом з ОМ лазерами (наприклад, DFB-лазерами) і підсилювачами EDFA дозволяє збільшити довжину ділянки регенерації приблизно до 600 км при швидкості передавання 2,5 Гбіт/с по стандартному ОМ ОВ на довжині хвилі 1550 нм. Для швидкості передавання 10 Гбіт/с довжина ділянки регенерації є меншою.

Наступним етапом став розвиток *методів компенсації хроматичної дисперсії*, щоб знизити дисперсію в ОВ до прийнятних значень на протяжній (сотні км) підсилювальній ділянці. Такі методи дозволили досягти відстаней між регенераторами в декілька тисяч кілометрів при швидкості передавання 10 Гбіт/с в одному спектральному каналі.

Однак, раніше незначні спотворення другого і навіть третього порядку, стали виявлятися в WDM системах як ефекти першого порядку значущості. Сьогодні список таких проблем включає наступні: нелінійні ефекти у волокні; нерівномірний спектр підсилення сигналів через нерівномірності АЧХ EDFA; спотворення, що пов'язані з поляризацією сигналу.

Існує декілька видів нелінійних ефектів в оптичному волокні при WDM передаванні внаслідок великої (≥ 100 мВт) введеної до ОВ оптичної потужності. При першому з них, званому *чотирьоххвильовим змішенням* (*four-wave mixing* – FWM), три оптичні сигнали з різними довжинами хвиль взаємодіють у нелінійному ОВ і створюють четвертий сигнал з довжиною хвилі, яка може співпадати з довжиною хвилі одного із спектральних каналів. Це викликає міжканальні переходи.

Виявилось, як це не парадоксально, що збільшення хроматичної дисперсії, знижує нелінійні ефекти у волокні. Пояснимо це. Хроматична дисперсія зумовлює різницю у швидкостях розповсюдження сигналів з різними довжинами хвиль. Це у свою чергу викликає менше переходів енергії між сигналами, оскільки тепер сигнали можуть складатися у протифазі, знижуючи нелінійний ефект FWM.

Одночасно дві причини призводять до різкого зростання нелінійних ефектів у *DSF* волокні: наявність точки нульової дисперсії в робочому діапазон довжин хвиль і мала ефективна площа поперечного перерізу серцевини ОМ ОВ. Зменшення площі ефективного поперечного перерізу пов'язане з тим, що зсув дисперсії досягається за рахунок: а) збільшення значення хвильоводної дисперсії шляхом зміни профілю показника заломлення; б) зменшення діаметра серцевини.

Така ситуація стимулювала створення нового типу одномодового ОВ – з ненульовою зміщеною дисперсією (*non-zero dispersion-shifted* – NZ-DSF), призначеного для керування взаємодією згаданих вище двох ефектів. Це волокно спроектоване так, щоб забезпечити менший рівень хроматичної дисперсії, ніж у звичайному ОМ ОВ, і одночасно знизити його нелінійність.

У 1998 р. було розроблено ще більш довершені волокна NZ-DSF зі збільшеною ефективною площею поперечного перетину. Оскільки проявлення нелінійних ефектів залежить від щільності світлової енергії у волокні, то збільшення ефективної площі зменшує нелінійні ефекти і збільшує дальність і швидкість передавання інформації.

Вже створені WDM системи з сотнею спектральних каналів, що передаються зі швидкістю 10 Гбіт/с, при міжканальному інтервалі 50 ГГц і відстані між О-Е-О регенераторами до декількох тисяч км.

У кінці 1990-х років перейшли від систем зі швидкістю 2,5 Гбіт/с до систем зі швидкістю передавання 10 Гбіт/с. Сьогодні є багато WDM систем, що працюють на швидкості 40 Гбіт/с в одному каналі.

Системи зі швидкістю 10 Гбіт/с стали ефективними при розгортанні мереж передавання по волокнах з ненульовою зміщеною дисперсією. Міські (Metro) WDM системи продовжують працювати на швидкості 2,5 Гбіт/с при меншій кількості довжин хвиль, ніж WDM транспортні системи. Останні розробки в цій області зосередилися на реалізації: а) терабітних швидкостей передавання на трансокеанські відстані зі швидкістю передавання в одному каналі від 10 до 40 Гбіт/с і сумарній швидкості передавання понад 10 Тбіт/с (при використанні швидкості передавання в одному каналі 40 Гбіт/с) на відстані, більші за декілька сотень кілометрів.

У табл. В.1 наведена сучасна класифікація діапазонів довжин хвиль, в яких працюють ВОСП. Перші WDM системи були створені в *C-діапазоні*, оскільки саме в цьому діапазоні функціонували розроблені у той час оптичні підсилювачі. Сьогодні розроблені EDFA-підсилювачі, що дозволяють WDM системам працювати в *L-діапазоні*. Використання розподіленого по довжині волокна підсилення дозволяє також працювати в діапазонах *S* і *U*. При виборі відповідної довжини хвилі накачування можна реалізувати *раманівське підсилення* на будь-якій бажаній довжині хвилі. Розвиток нових типів ОМ ОВ дає можливість працювати в *E-діапазоні*, який раніше не використовувався через високі втрати на іонах ОН-. Були розроблені нові волокна для зменшення втрат в області водяного піку (1383 нм), але поки що немає оптичних підсилювачів для цього діапазону, тому *E-діапазон* використовується головним чином для передавання на короткі відстані.

Таблиця В.1 – Класифікація робочих діапазонів ВОСП, що працюють по ОМ ОВ

Позначення діапазону	Назва діапазону	Інтервал довжин хвиль, нм
<i>O</i> (Original)	Первинний (оригінальний)	1260...1360
<i>E</i> (Extended)	Розширений (продовжений)	1360...1460
<i>S</i> (Short)	Короткохвильовий	1460...1530
<i>C</i> (Conventional)	Стандартний	1530...1565
<i>L</i> (Long)	Довгохвильовий	1565...1625
<i>U</i> (Ultra-long)	Ультрадовгохвильовий	1625...1675

Нижче стисло підсумовані основні етапи розвитку елементної бази і технологій ВОСП.

ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО:

градієнтне багатомодове волокно (MMF) → стандартне одномодове волокно (SSF) → волокно з нульовою зміщеною дисперсією (DSF) → волокно з ненульовою зміщеною дисперсією (NZ DSF).

ДЖЕРЕЛО ВИПРОМІНЮВАННЯ:

світлодіод → багатомодовий лазер Фабрі-Перро → одномодовий лазер з розподіленням брегговським відбиттям (DBR), одномодовий лазер з розподіленням зворотним зв'язком (DFB), лазер з вертикальним резонатором (VCSEL).

ДОВЖИНА ХВИЛІ:

850 нм → 1300 нм → 1550 нм → робота в *C*-діапазоні (1530...1565 нм) → використання *C*- і *L*-діапазонів (1530...1625 нм).

ЧИСЛО ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ:

один канал → дво-, триканальна *WDM* передача на 850 нм, 1310 нм і 1550 нм → «грубе» хвильове мультиплексування – *CWDM* (4, 8 каналів) → спектрально «щільне» хвильове мультиплексування – (16, 32, 40 каналів), «дуже щільне» *HDWDM* (96, 192 каналів).

ФОРМАТ ЛІНІЙНОГО СИГНАЛУ:

формат *NRZ* → формат *RZ* → дуобінарний формат → фазомодульований *RZ* формат.

ВІДНОВЛЕННЯ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ:

класична О-Е-О регенерація → ербієві оптичні підсилювачі → раманівські оптичні підсилювачі → компенсація хроматичної дисперсії, компенсація поляризаційної модової дисперсії → повністю оптична регенерація.

ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ В ОДНОМУ КАНАЛІ:

2 Мбіт/с → 8 Мбіт/с → 34 Мбіт/с → 155 Мбіт/с → 622 Мбіт/с → 2,5 Гбіт/с → 10 Гбіт/с → 40 Гбіт/с → 160 Гбіт/с.

МАРШРУТИЗАЦІЯ СИГНАЛУ:

опто-електро-оптичне (О-Е-О) перетворення → оптичний мультиплексор вводу/виводу → оптична комутація → повністю оптична мережа.

1 ПРОЕКТУВАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЦСП СИНХРОННОЇ ІЄРАРХІЇ

1.1 Вибір траси

Траса лінії передачі прокладається так, щоб при забезпеченні зв'язком усіх пунктів, витрати на спорудження та експлуатацію ВОЛП були мінімальними.

Траса лінії передачі вибирається, як правило, вздовж шосейних та ґрунтових доріг, по яких автомобільний рух можливий протягом усього року.

При порівнянні варіантів трас ураховуються наступні фактори: протяжність траси, склад ґрунту, стан доріг, кількість перетинань з річками і залізницями, рельєф місцевості і т.п.

Складається ситуаційний план (рис. 1.1.1), на якому показують автомобільні дороги, залізниці, ріки й водоймища, населенні пункти та трасу кабелю. На плані наводяться умовні позначення, масштаб, напрямлення сторін світу і відстані між мережними вузлами.

Слід відзначити, що довжина кабелю ВОЛП складає 101,5 % від довжини траси.

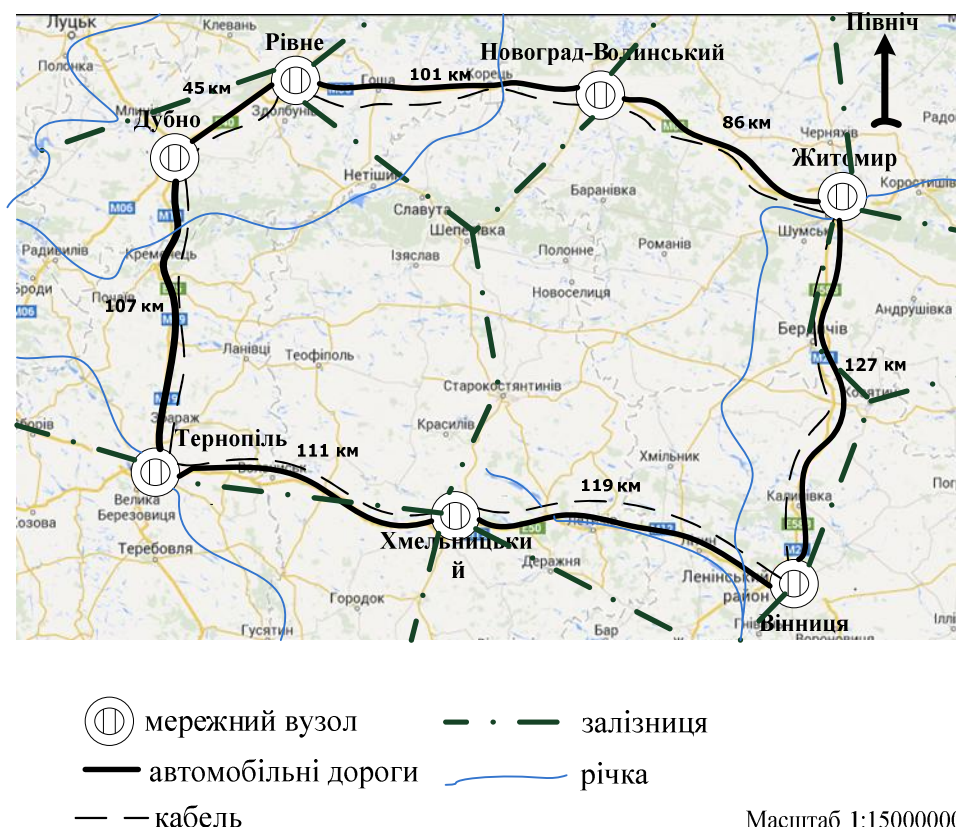


Рисунок 1.1.1 – Ситуаційний план

При техніко-економічних розрахунках враховується, що при будівництві витрачається оптичного кабелю 102,4 % від довжини траси. Ще 1 % (але не

менше 1 км) кабелю є запас на випадок розриву ОК і необхідність виконання вставки при ремонті.

1.2 Топологія та архітектура мереж зв'язку СЦІ

При проектуванні мереж СЦІ необхідно вирішити декілька задач. Однією з перших є вибір топології та архітектури мережі.

Розглянемо базові топології.

Найбільш простою є топологія «точка-точка» (рис. 1.2.1), яка реалізується з використанням двох термінальних мультиплексорів (ТМ) і двох трактів: основного та резервного. При відмові основного тракту автоматично здійснюється перехід на резервний за десятки мілісекунд.

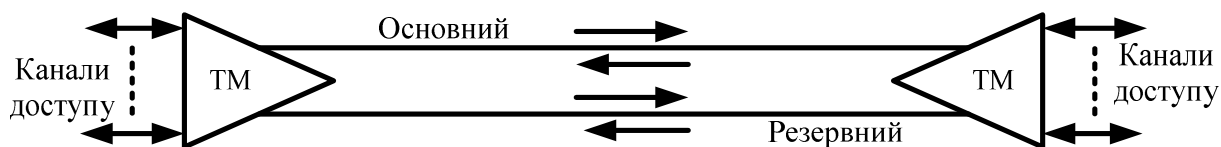


Рисунок 1.2.1 – Топологія «точка-точка»

За необхідності виділення каналів у проміжних пунктах застосовується топологія «послідовне лінійне коло», яка може бути представлена без резервування (рис. 1.2.2), так і з резервуванням типу 1 + 1, рис. 1.2.3. Останній тип топології називають «сплющеним кільцем». В проміжних пунктах використовуються мультиплексори введення-виведення (ADM).

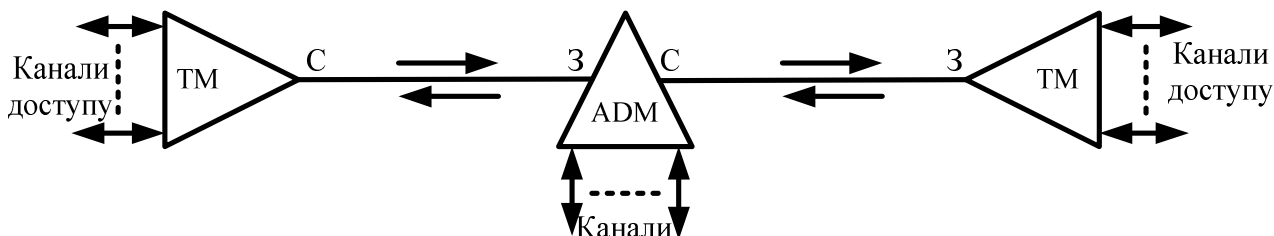


Рисунок 1.2.2 – Топологія «послідовне лінійне коло»

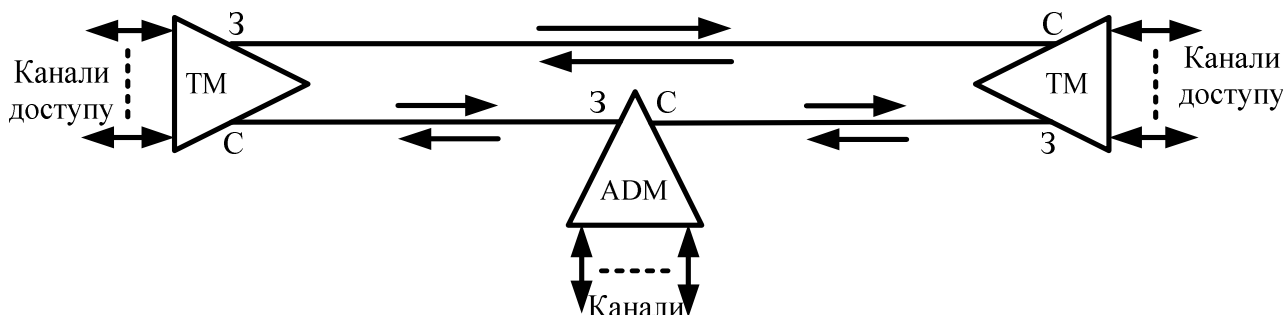


Рисунок 1.2.3– Топологія «послідовне лінійне коло» типу «сплющене кільце»

Широко використовується для побудови мереж СЦІ топологія «кільце», для організації якої може бути використано два оптичних волокна або чотири. Хоча кільце з чотирма волокнами дорожче, воно використовується досить часто, тому що забезпечує високу надійність і більшу гнучкість схеми резервування. Перевагою цієї топології є легкість застосування захисту 1 + 1 завдяки наявності у синхронних мультиплексорах двох пар (основної та резервної) оптичних агрегатних виходів: схід-захід, які дають можливість формування подвійного кільця із зустрічними потоками, рис. 1.2.4.

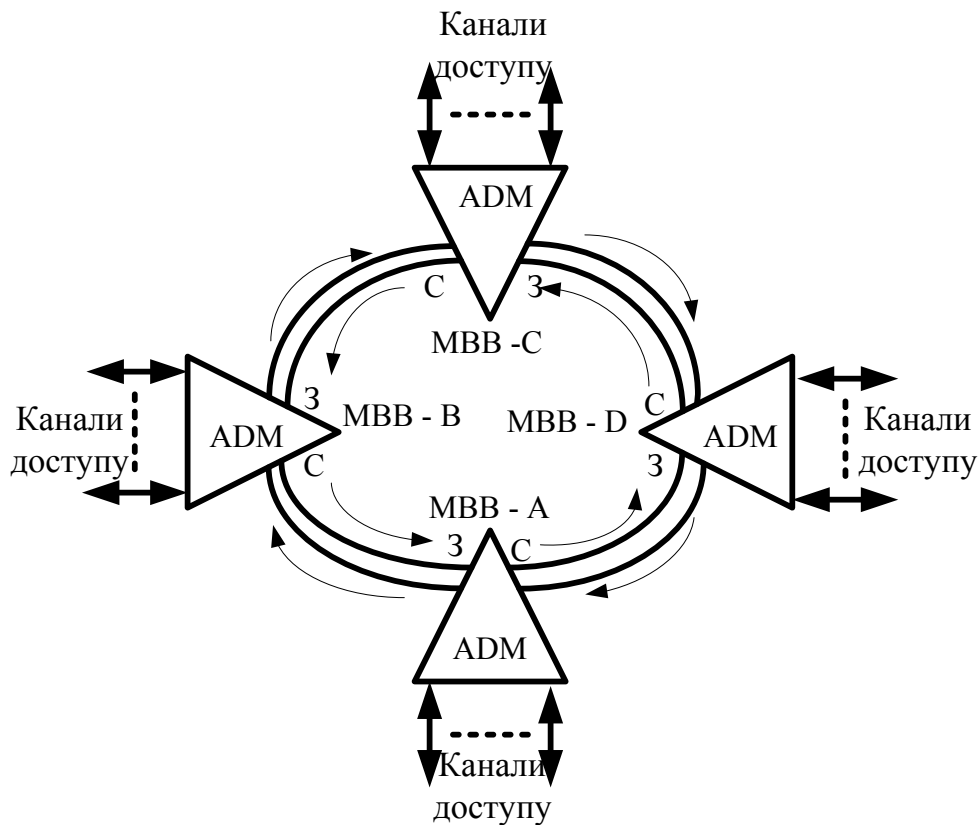


Рисунок 1.2.4 – Топологія «кільце»

Це кільце є двоспрямованим здвоєним з двома або чотирма оптичними волокнами.

Архітектурні розв'язання при проектуванні мережі СЦІ формуються на основі топологій в якості окремих сегментів. Часто використовується сполучення топологій «кільце» і «точка-точка» або «кільце» та «послідовне лінійне коло», рис. 1.2.5.

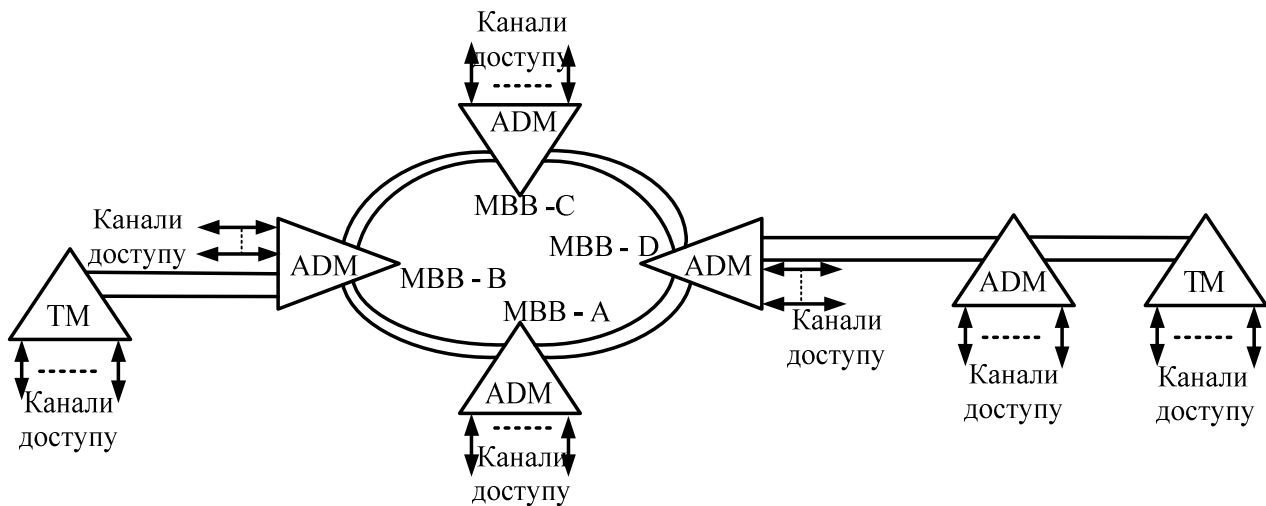


Рисунок 1.2.5 – Схема радіально-кільцевої мережі СЦІ

У «кільці» використовуються синхронні мультиплексори більшого рівня ієрархії ніж на відгалуженнях.

Другою архітектурою, що часто використовується, є «кільце-кільце», рис. 1.2.6. Кількість «кільць» може бути і три, і більше.

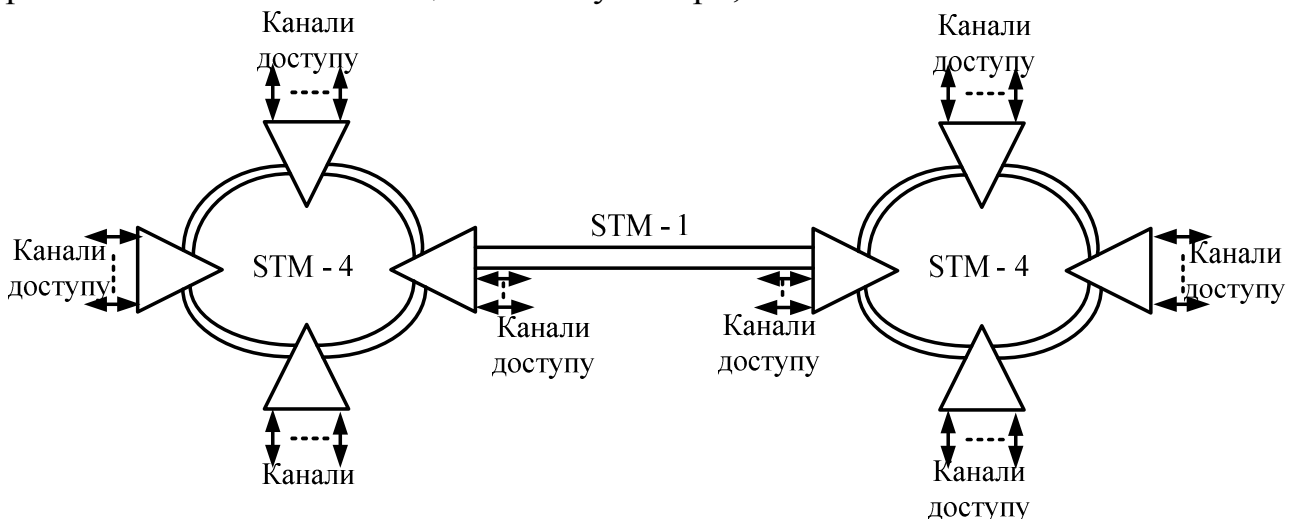


Рисунок 1.2.6 – Архітектура мережі «кільце-кільце»

Комбінація топологій дозволяє формувати архітектуру складних розгалужених мереж СЦІ.

1.3 Методи резервування у синхронних цифрових мережах

Резервування мультиплексної секції MSP (Multiplex Section Protection) засновано на надлишковості апаратури, оптичних волокон і операції переключення: у випадку пошкодження робочого тракту сигнал стає досяжним по резервному .

Функція MSP установлює зв'язок з відповідною функцією MSP далекого кінця для координації операцій переключення за допомогою біт-орієнтованого

протоколу, визначеного для байтів K1 і K2 заголовка MSON. Байти K1 і K2 використовуються для сигналізації та керування автоматичним переключенням на виправний тракт при роботі в захищеному режимі – APS (Automatic Protection Switch).

Функція MSP установлює зв'язок з функцією SEMF (Synchronous Equipment Management Function – функція керування синхронною апаратурою) для автоматичного та ручного керування переключенням. Автоматичне і ручне переключення на резерв здійснюється на основі прийнятих сигналів.

Функція MSP може здійснювати переключення як в одному напрямку передавання (рис. 1.3.1) або в обох напрямках передавання, рис. 1.3.2. При односпрямованому переключенні здійснюється перехід на резервний тракт тільки в пошкодженому напрямку передавання. При двоспрямованому переключенні здійснюється перехід на резервну секцію в обох напрямках.

Односпрямоване та двоспрямоване переключення можуть використовуватись як в режимі зворотного переключення, так і без зворотного переключення в залежності від способу керування мережею. В режимі зворотного переключення тракту після усунення пошкодження на секції здійснюється повернення на основний напрямку. В режимі без зворотного переключення після усунення пошкодження не виконується повернення на основний тракт.

Визначені дві конфігурації переключення на резерв MSP: 1 + 1 і 1 : 1 (рисунки 1.3.3, 1.3.4 і 1.3.5). При цих методах резервування два вузла з'єднуються по двох трасах (100% резервування), по яким одночасно передаються сигнали.

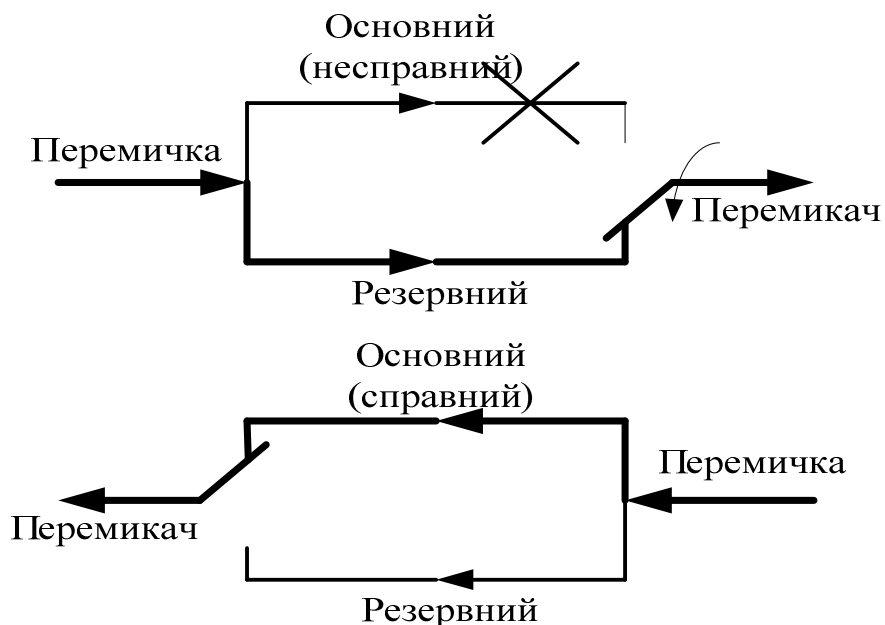


Рисунок 1.3.1 – Схема односпрямованого переключення на резервний тракт

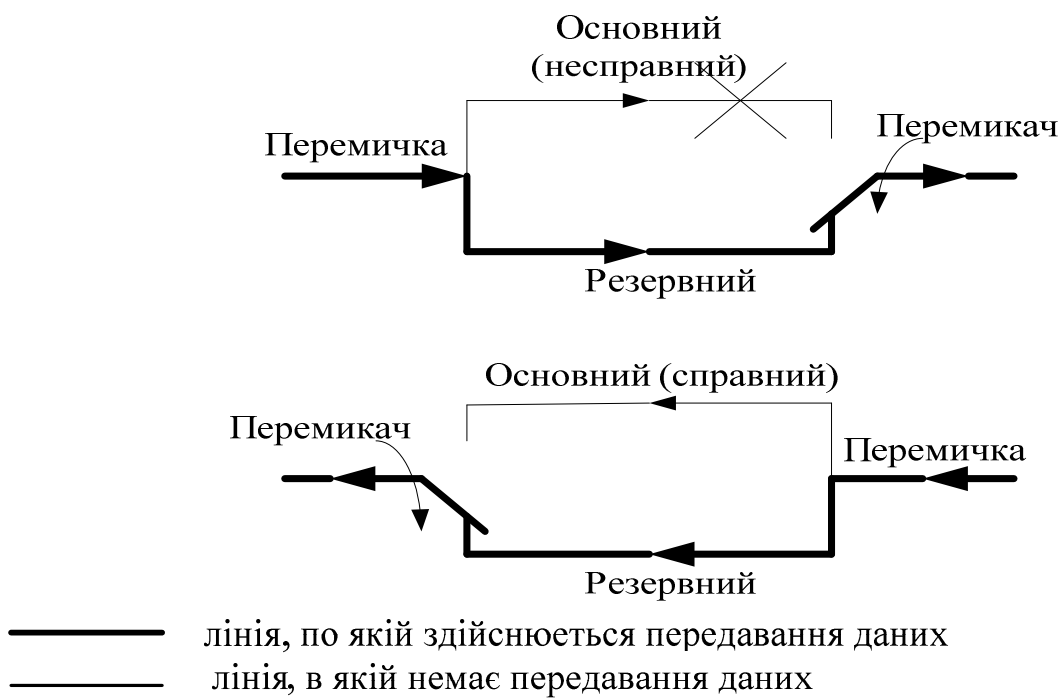


Рисунок 1.3.2 – Схема двоспрямованого переключення на резервний тракт

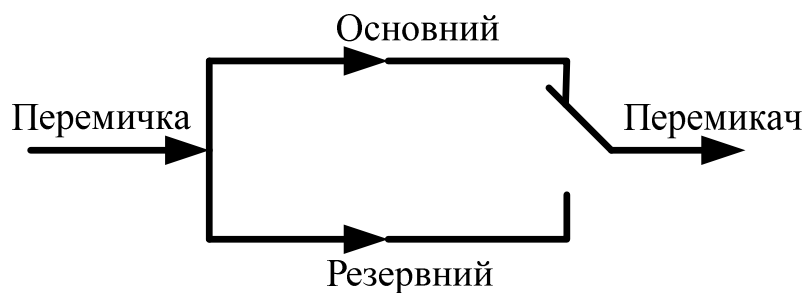


Рисунок 1.3.3 – Схема переключення 1 + 1

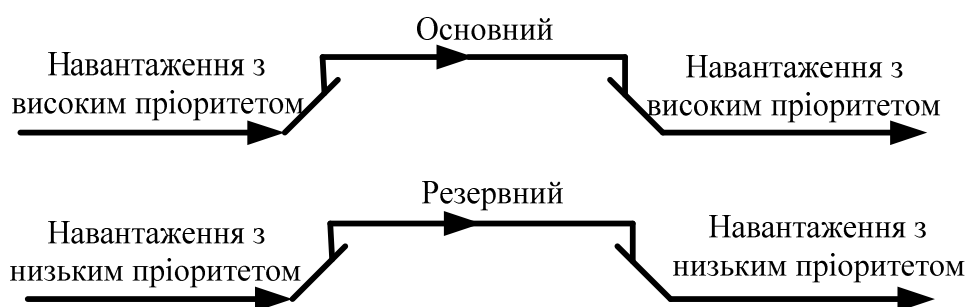


Рисунок 1.3.4 – Схема переключення 1 : 1, на резервний тракт підключається навантаження з низьким пріоритетом

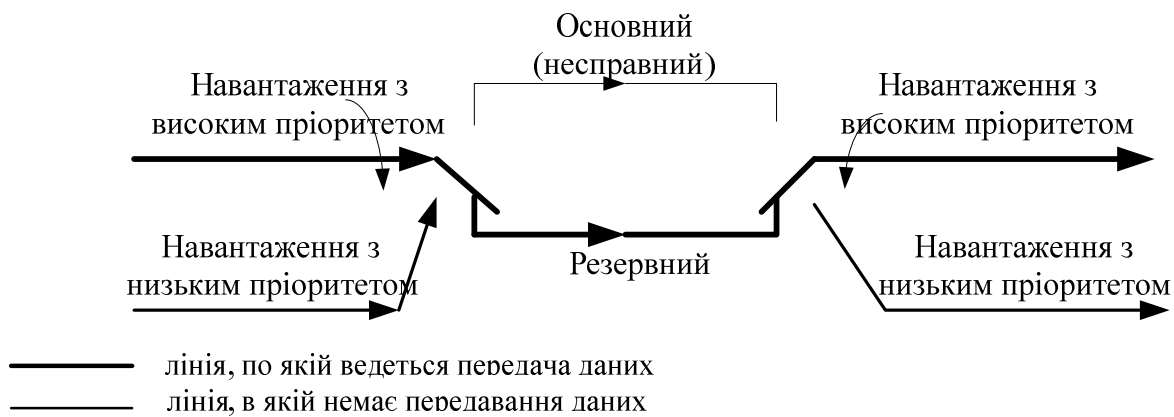


Рисунок 1.3.5 – Схема переключення 1 : 1, резервний тракт використовується для навантаження з високим пріоритетом після відключення навантаження з низьким пріоритетом

При виконанні схеми захисту 1 + 1 у вузлі аналізуються два прийняті сигнали і вибирається той, який має кращі параметри або який фактично можливий.

При резервуванні за схемою 1 : 1 у вузлі прийому альтернативним маршрутам призначаються пріоритети: високий і низький. Напрямок з низьким пріоритетом знаходиться у режимі гарячого резерву: переключення на нього здійснюється за сигналом про аварію від системи керування. Приймач каналу з низьким пріоритетом отримує сигнал CIAC (AIS).

З метою підвищення надійності мереж СЦІ використовуються системи оперативного переключення на працездатну ділянку.

У цьому випадку у вузлах мережі встановлюють крос-комутатори систем оперативного переключення, які у випадку пошкодження (розрив ОК або вихід з ладу вузла) в послідовному лінійному колі, здійснюють реконфігурацію маршрутів на прилеглих (вхідних або вихідних) ділянках мережі і відповідну крос-комутацію потоків.

Процедура такої реконфігурації може бути централізованою або розділеною.

Розглянемо варіанти оперативного переключення на працездатну ділянку:

1. Резервування мультиплексної ділянки, рис. 1.3.6.
2. Резервування тракту і резервування секції, рис. 1.3.7.
3. Резервування підключенням мережі нижнього рівня (SNCP), рис. 1.3.8.

Використання систем оперативного переключення за принципом організації захисту нагадує систему резервування 1 : 1. Відмінність в тому, що при застосовуванні схеми резервування 1 : 1 тракт передавання формується у момент оперативного переключення, а у випадку методу резервування по рознесених трасах фізичний або віртуальний канал існує.

Розглянемо схему захисту з розділенням ресурсів каналів типу MS SPRing, яка широко застосовується у мережах СЦІ кільцевої та чарункової топологій. Цей метод захисту базується на розділенні ресурсів кілець як з

двома, так і з чотирма волокнами. Особливістю захисту MS SPRing є те, що для передавання трафіка використовуються усі волокна, однак тільки 50 % ємності кожного оптичного волокна віддано під трафік і 50 % під трафік захисту.

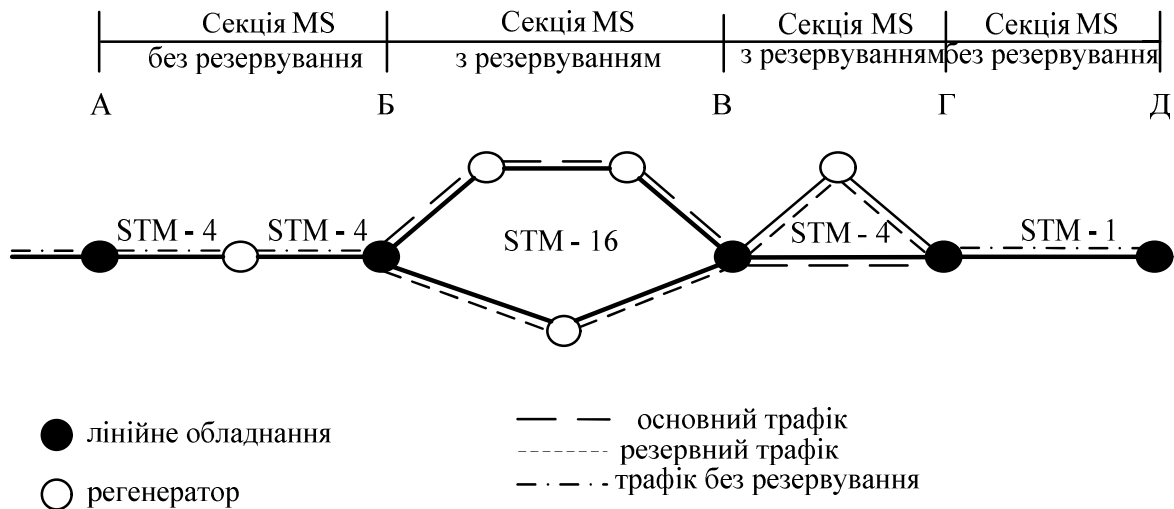


Рисунок 1.3.6 – Схема резервування мультимплексної ділянки

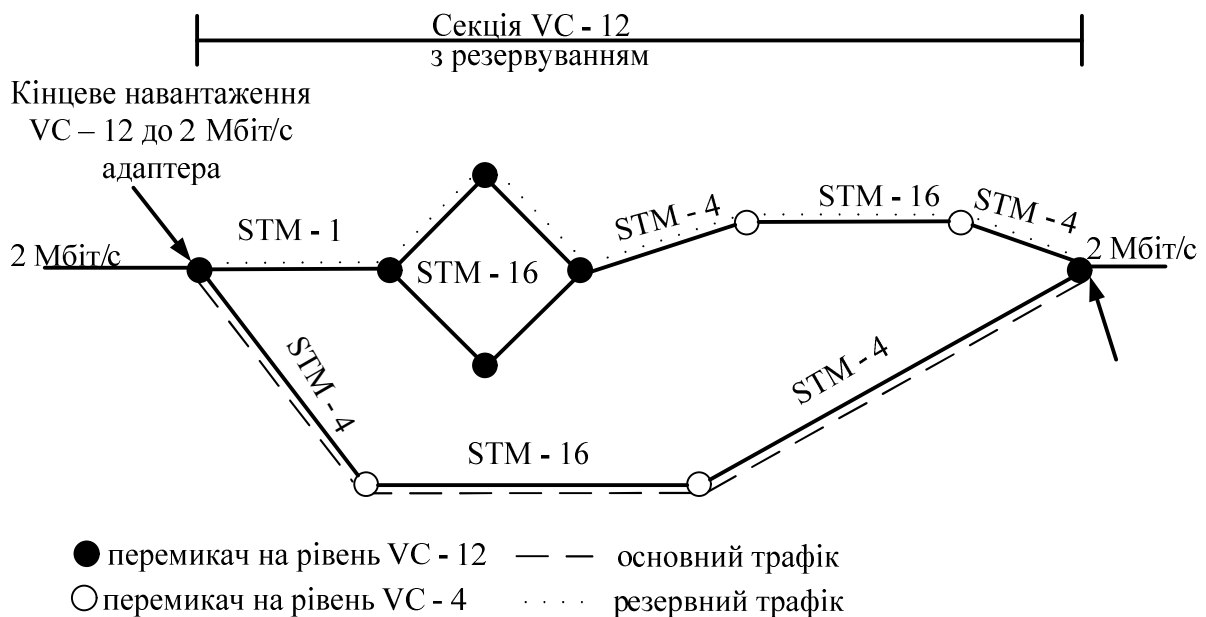


Рисунок 1.3.7 – Схема резервування тракту та секції VC - 12

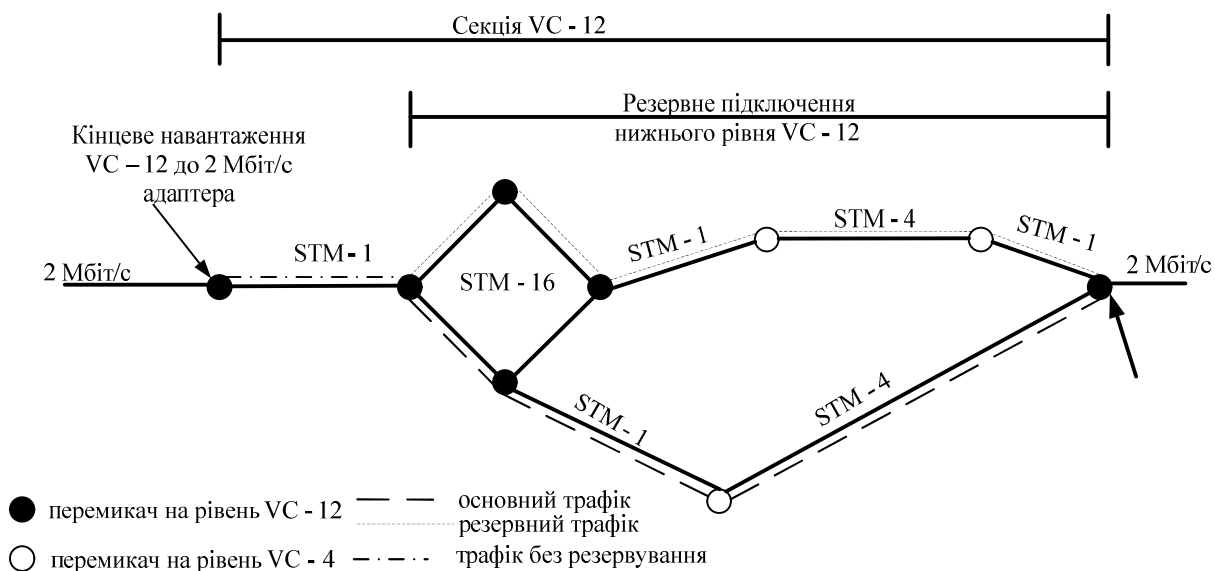


Рисунок 1.3.8 – Схема резервування підключенням мережі нижнього рівня з контролем тракту (SNCP)

Організація і функціонування схеми захисту MS SPRing на прикладі кільцевої двоспрямованої двоволоконної мережі, рис. 1.3.9. На рис. 1.3.9 показано маршрут сигналу між вузлами А і D при нормальному (а) та аварійному (б) станах. У першому випадку маршрут потоку А-В-С-Д проходить по робочому каналу через ділянки А-В, В-С, С-Д. У другому випадку при пошкодженні ділянки В-С маршрут змінюється на А-В-А-Ф-Е-Д-С-Д і проходить по робочому каналу на ділянках (А-В, С-Д) та на ділянках (В-А, А-Ф, Ф-Е, Е-Д і Д-С) – по каналу захисту.

Розглянемо схему захисту MS SPRing для чотириволоконного кільця: по двох ОВ в кожному робочому і захисному кільцях, які є двоспрямованими. Завдяки цьому схема MS SPRing дозволяє розміщувати 100 % (а не 50 %, як в двоволоконній схемі), що відповідає повній ємності.

На рис. 1.3.10 показаний маршрут сигналу між двома вузлами А і D мережі при двох станах: нормальному (а) та аварійному (б). У першому випадку маршрут потоку А-В-С-Д проходить, як і в двоволоконній схемі (рис. 1.3.9), по робочому каналу через ділянки А-В, В-С, С-Д. У другому випадку маршрут змінюється тільки на ділянці В-С, де робоча ділянка В-С замінюється на захисну.

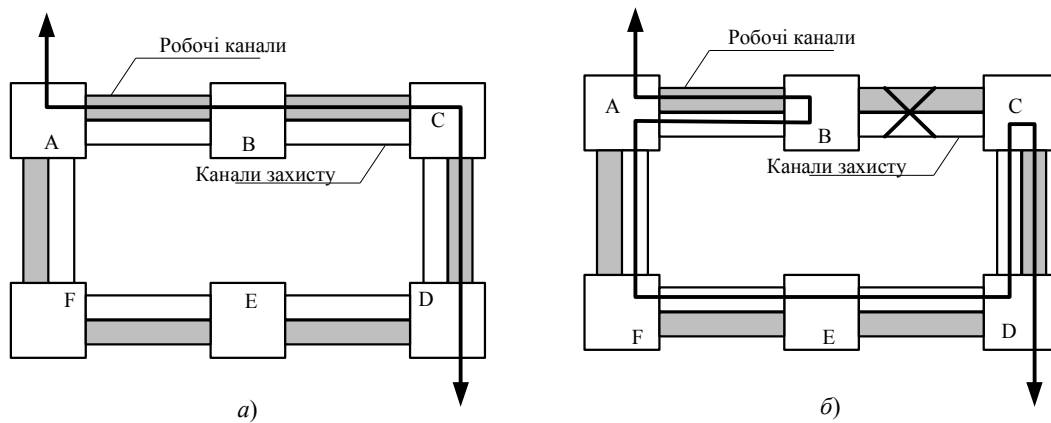


Рисунок 1.3.9 – Схема захисту потоків методом MS SPRing:
а) нормальний стан, б) пошкодження ОВ на ділянці В-С

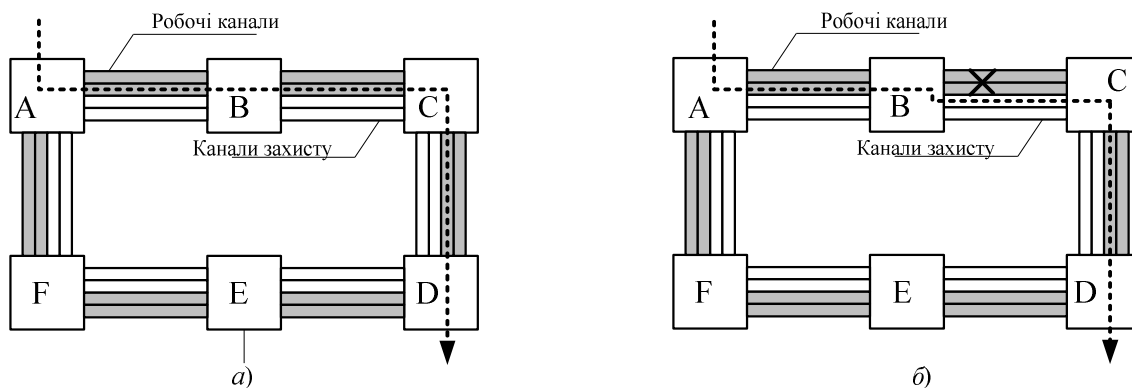


Рисунок 1.3.10 – Схема організації захисту потоків методом MS SPRing для чотириволоконного кільця: а) нормальний стан, б) пошкодження ОВ на ділянці В - С

Порівнюючи рисунки 1.3.9 і 1.3.10, можна зробити висновки про переваги та недоліки кожного варіанта. Але слід враховувати, що перехід на захисний канал на ділянці В-С (рис. 1.3.10) можливий тільки при не пошкоджених захисних ОВ. У випадку пошкодження не тільки робочих, але й захисних ОВ, схема проходження сигналу аналогічна тій, яка показана на рис.1.3.9.

Розглянемо, яка різниця між резервуванням лінії та карти (блока):

- переключення на резервну карту, рис. 1.3.11. Блок SN визначає несправність карти і включається резервна.
- переключення на резервну лінію, рис. 1.3.12. При аварії на ВОЛП в роботі залишається робоча карта, а резервна лінія підключається по шині PBUS.

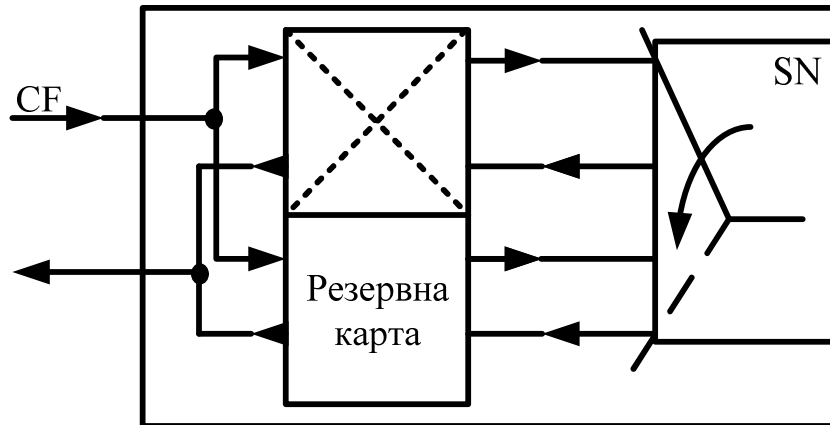


Рисунок 1.3.11 – Принцип резервування карти, де CF – дефект карти, SN – перемикач

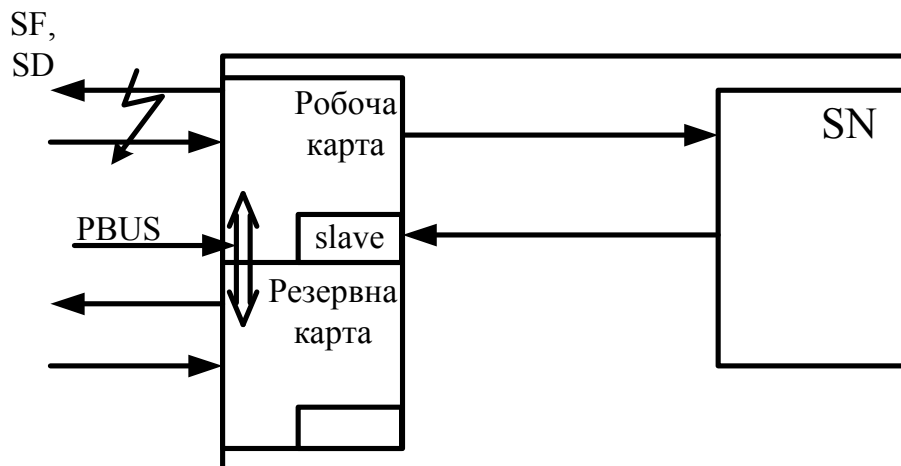


Рисунок 1.3.12 – Принцип резервування лінії, де SD – погіршення параметрів сигналів, SF – помилки у сигналі, PBUS – резервна шина

1.4 Складання мультиплексного плану і визначення рівня ієрархії ЦСП СЦІ

При проектуванні мережі СЦІ розробляється мультиплексний план.

Приклад. Приймемо, що архітектура мережі радіально-кільцева, рис. 1.4.1.

У мережі реалізується двоспрямоване кільце з чотирма оптичними волокнами, що забезпечує високу надійність і дозволяє реалізовувати гнучкі схеми резервування. На відгалуженні в пункт Д застосовано два оптичних волокна. Захист у кільці MS SPRing (Multiplex Section Shared Protection Ring) є захист маршрутів потоку даних на основі розділення ресурсів у кільці.

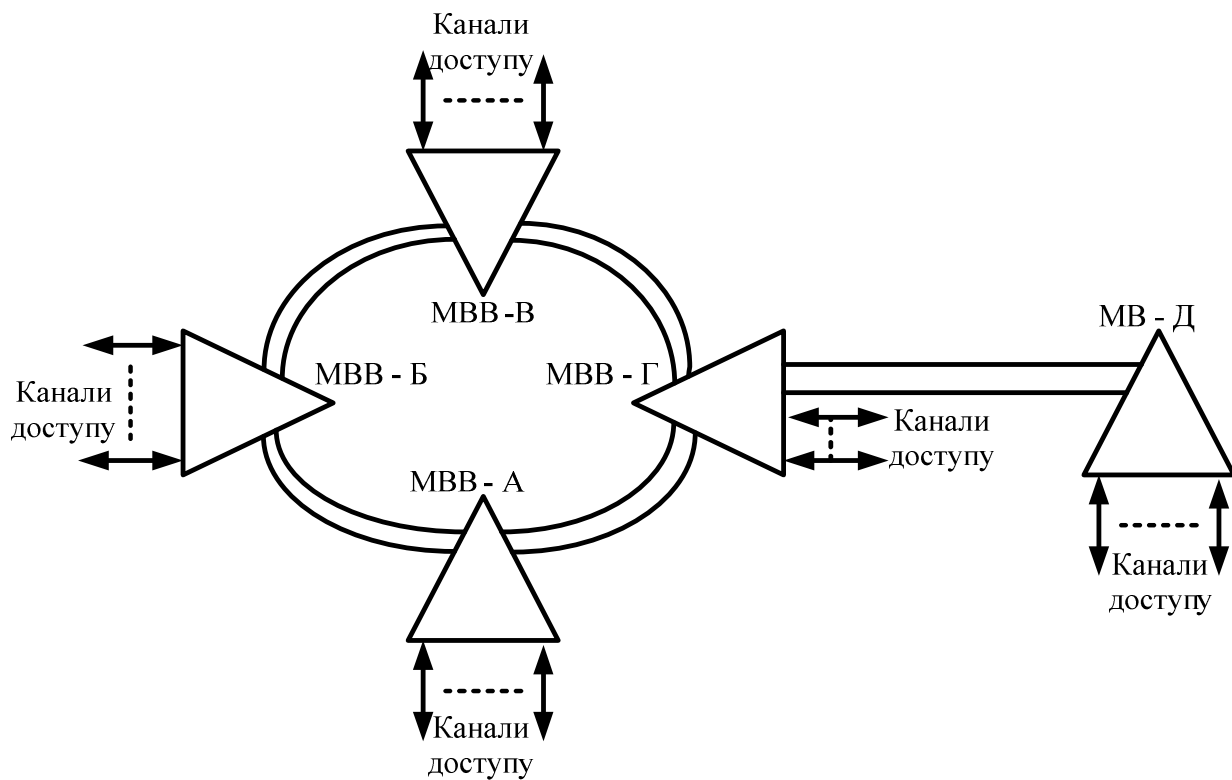


Рисунок 1.4.1 – Схема радіально-кільцевої мережі

Розподіл первинних цифрових потоків Е1 між мережними вузлами наведено в табл. 1.4.1.

Таблиця 1.4.1 – Розподіл ПЦП між мережними вузлами

Мережні вузли	MBV-A	MBV-Б	MBV-B	MBV-Г	MBV-Д
MBV-A		70	45	50	13
MBV-Б			55	35	15
MBV-B				30	12
MBV-Г					17
MB-Д					

Розробимо мультиплексний план для проектованої мережі. При побудові мультиплексного плану (рис. 1.4.2) «розриваємо» кільце в MBV-Г і використовуємо дані табл. 1.4.1. Розраховуємо сумарну кількість ПЦП на кожній секції: АБ – 115 Е1; БВ – 150 Е1; ВГ – 92 Е1; ГД – 57 Е1; ГА – 63 Е1. Необхідно визначити кількість виділених ПЦП в: п. А – 178 Е1, п. Б – 175 Е1, п. В – 142 Е1, п. Г – $(50 + 82) = 132$ Е1.

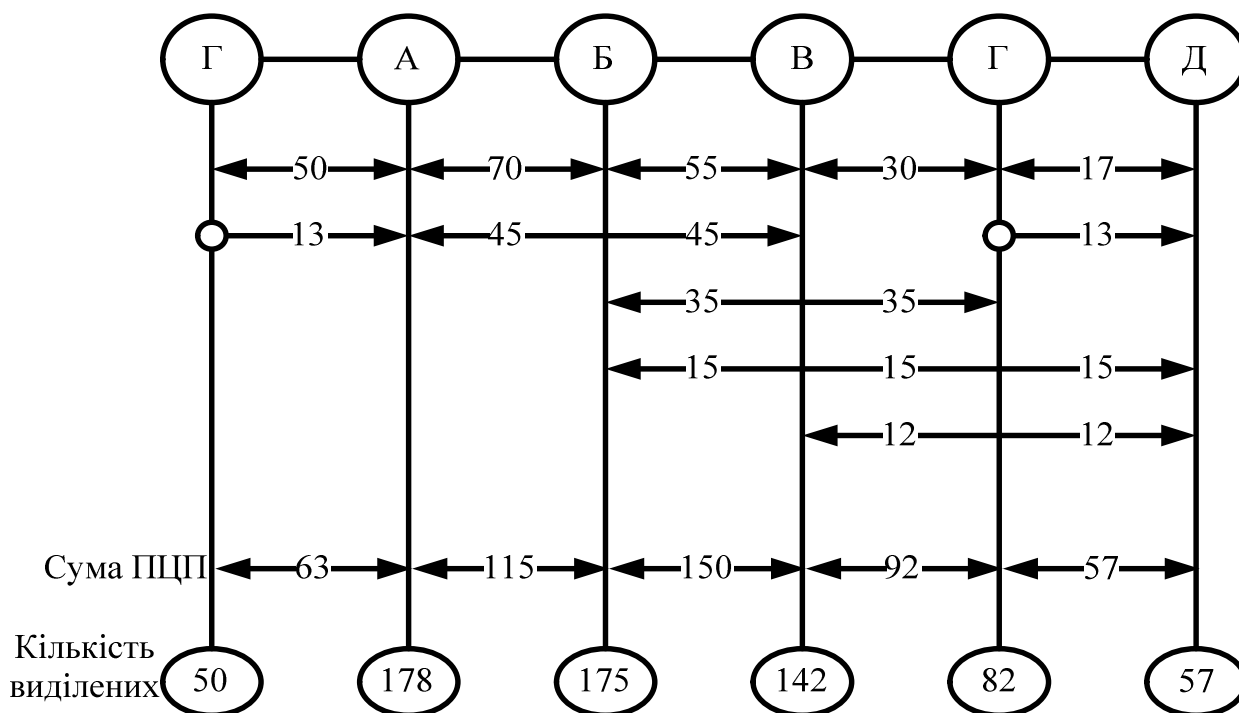


Рисунок 1.4.2 – Мультиплексний план

При визначенні рівня ієрархії мережі враховується кількість оптичних волокон, метод захисту, кількість цифрових потоків. Рівень ієрархії ЦСП СЦІ слід вибрати таким, щоб забезпечити надійне функціонування мережі як при нормальному стані, так і після аварії (наприклад, після розриву волоконно-оптичного кабелю).

Відомо, що при застосуванні методу захисту MS SPRing на чотирьох оптичних волокнах два оптичні волокна використовуються для передавання робочого трафіка та два на резерв. У нормальному режимі трафік передається по робочих волокнах.

Припустимо, що на одній з ділянок розірвано оптичний кабель. При цьому пошкодженні на одному кінці здійснюється переключення з робочої пари на резервну, а на другому з резервної на робочу. Таким чином організується обхід пошкодженої ділянки.

Рівень ієрархії в кільці визначається ділянкою з максимальною кількістю ПЦП. В даному випадку це ділянка Б-В, на якій необхідно забезпечити передавання 150 ПЦП. Оскільки

$$63E1 < 150E1 < 252E1,$$

використовуємо STM-4.

На відгалуженні слід організувати 57 ПЦП ($57E1 < 63E1$), застосувавши STM-1.

Слід відзначити, що при використанні методу MS SPRing на двох оптичних волокнах є відмінність у визначенні рівня ієрархії мережі. В цьому випадку в кожному волокні ресурси між робочими та захисними каналами розподіляються приблизно порівно, щоб при аварії на будь-якій ділянці робочий трафік можна було переключити на захисні канали. Для визначення

рівня ієрархії мережі по мультиплексному плану (рис. 1.4.2) слід визначити суму двох найбільш завантажених ділянок

$$150 + 115 = 265$$

первинних цифрових потоків. Тому що

$$252E1 < 265E1 < 1008E1,$$

тоді в кільці слід використовувати STM-16.

Таким чином при розподілі ПЦП між мережними вузлами, наведеному в табл. 1.4.1, при застосуванні методу захисту MS SPRing на чотирьох оптичних волокнах використовується STM-4, а в двоволоконному – STM-16. На відгалуженні в обох випадках передається потік STM-1.

1.5 Вибір марки оптичного кабелю

У синхронних цифрових мережах використовується оптичний кабель з одномодовими оптичними волокнами.

Кабелі з оптичними волокнами, що відповідають рек. G.652 ITU-T, виробляє Одеський кабельний завод (додаток Д1). У маркуванні оптичного кабелю відображається як його побудова, так і характеристики оптичних волокон. Розглянемо значення індексів у маркуванні кабелів ВАТ «Одескабель», табл. 1.5.1.

Таблиця 1.5.1 – Розшифрування індексів у маркуванні кабелів, де МІКЗ – максимальний індивідуальний коефіцієнт загасання

Номер позиц.	Назва індексу	Умовне позначення індексів	Розшифрування умовного позначення індексів
1	2	3	4
1	Тип кабелю	ОК	Оптичний кабель
2	Область використання ОК	Л	Лінійний
3	Тип броні (індекс може бути відсутнім)	Б	Броня з плоских сталевих стрічок
		Бг	Броня з гофрованої сталеві стрічки
		К	Броня з одного шару круглих сталевих дротів
		КК	Броня з двох шарів круглих сталевих дротів
		С	Броня з одного шару діелектричних стрижнів
4	Негорючі оболонка і шланг ОК (індекс може бути відсутнім)	Н	Оболонка і шланг ОК з матеріалу, що не розповсюджує горіння
5	Номер розробки		Номінальний зовнішній діаметр оптичного модуля:
		1	2,7 мм
		2	3,0 мм
		3	2,5 мм

Продовження таблиці 1.5.1

1	2	3	4
6	Тип центрального силового елемента	Д	Діелектричний (склопластиковий) стрижень
		М	Металевий трос, який покритий поліетиленом або полівінілхлоридом
	Тип підсилювального елемента	А, 2А, 3А, 4А (варіанти)	Арамідні високомодульні нитки, що підвищують стійкість до розтягуючих зусиль
	Тип і матеріал захисних покриттів	1	Шланг з поліетилену
		2	Шланг з полівінілхлоридного пластикату, що не розповсюджує горіння
		3	Шланг з алюмополіетилену
		4	Оболонка з поліетилену, сталева броня та поліетиленовий шланг
		5	Те ж саме, але оболонка та шланг з полівінілхлоридного пластикату (ПВХ), що не розповсюджує горіння
		6	Оболонка з алюмополіетилену, сталева оцинкована броня та поліетиленовий шланг
		9	Оболонка з алюмополіетилену, сталева оцинкована броня та поліетиленовий шланг
		10	Поліетиленова оболонка, склопластикова броня та поліетиленовий шланг
		11	Оболонка з алюмополіетилену, склопластикова броня і поліетиленовий шланг
		12	Оболонка з поліетилену, броня з ламінованої сталі з електролітичним хромовим покриттям і шланг із поліетилену
		13	Броня зі сталі, оболонка та шланг з пластмас, що не розповсюджують горіння
	Конструкція шланга (індекс може бути відсутнім)	П	Полегшена конструкція шланга ОК
7	Побудови осердя ОК	3 x 4 (варіанти)	(кількість оптичних модулів в ОК) x (кількість ОВ в оптичному модулі)
		Е	Одномодове оптичне волокно
		М	Багатомодове оптичне волокно

1	2	3	4
8	Позначення опорної довжини хвилі	В	$\lambda = 850$ нм – багатомодовий режим
		А	$\lambda = 1300$ нм – багатомодовий або одномодовий режим
		Ф	$\lambda = 1310$ нм – одномодовий режим
		Н	$\lambda = 1550$ нм – одномодовий режим
	Оптичні параметри волокон		МІКЗ і дисперсія (або ширина смуги) на відповідній довжині хвилі
	Одномодові за рекомендацією ІТУ-Т G.652 (працюють у двох вікнах прозорості $\lambda = 1310$ нм і $\lambda = 1550$ нм)	0,40Ф3,5/ 0,30Н19 (варіант)	МІКЗ = 0,4 дБ/км, коефіцієнт хроматичної дисперсії (не більше 3,5 пс/(нм·км) на опорній довжині хвилі Ф (1310 нм))/(МІКЗ (0,30 дБ/км), коефіцієнт хроматичної дисперсії (не більше 19 пс/(нм·км) на опорній довжині хвилі Н (1550 нм)
	Одномодові (працюють на довжині хвилі 1300 нм)	0,7А6,0 (варіант)	МІКЗ = 0,7 дБ/км, коефіцієнт хроматичної дисперсії (не більше 6,0 пс/(нм·км) на опорній довжині хвилі А ($\lambda = 1300$ нм)
	Багатомодові за рекомендацією ІТУ-Т G.651 (працюють на довжині хвилі 850 нм)	5В250 (варіант)	МІКЗ (5 дБ/км), коефіцієнт широкосмуговості не менше 250 МГц х км на опорній довжині хвилі 850 нм
9	Багатомодові за рекомендацією ІТУ-Т G.651 (працюють на довжині хвилі 1300 нм)	1,0А800 (варіант)	МІКЗ (1,0 дБ/км), коефіцієнт широкосмуговості не менше 800 МГц х км на опорній довжині хвилі 1300 нм
	Загальна кількість ОВ і мідних жил дистанційного живлення у кабелі	12/2 (варіант)	(загальна кількість ОВ в кабелі (12 штук))/(кількість жил дистанційного живлення у кабелі (2 штуки))

Слід відзначити, що кількість оптичних волокон у кабелі завжди парна. Будівельні довжини оптичного кабелю 2, 3, 4, 5, 6 і 7 км.

Приклад. Привести розшифровку індексів в маркуванні кабелю:

ОК Л Б_г – Н – 3 – ДА12 – 4х4Е – 0,40Ф3,5/ 0,30Н19 – 16 / 0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер позиції								

1 – Вид кабелю – оптичний кабель – ОК.

2 – Область використання – лінійний (для магістральних, зонових і міських мереж зв'язку) – Л.

3 – Тип броні – Б_г (гофрована сталева стрічка, що накладена вздовж).

4 – Шланг виконаний з матеріалу, що не розповсюджує горіння – Н.

5 – Номер розробки – 3.

6 – Тип силових елементів і захисних покриттів. Силові елементи – центральний силовий елемент (ЦСЕ) – Діелектричний (склопластиковий) стрижень і високомодульні Арамідні нитки – ДА. Тип захисних покриттів – 12 (Оболонка з поліетилену, броня з ламінованої сталі з електролітичним хромованим покриттям і шланг з поліетилену).

7 – Структура побудови осердя оптичного кабелю (ОК) – (Кількість оптичних модулів в ОК) $\times$ (Кількість оптичних волокон (ОВ) в оптичному модулі) – 4×4 . Тип оптичного волокна – ОМ, що відповідає рек.G.652 ITU-T.

8 – Оптичні параметри ОВ: МІКЗ на довжині хвилі 1310 нм (Ф) 0,40 дБ/км і коефіцієнт хроматичної дисперсії на цій довжині хвилі 3,5 пс/(нм·км); МІКЗ на довжині хвилі 1550 нм (Н) 0,30 дБ/км і коефіцієнт хроматичної дисперсії на цій довжині хвилі 19 пс/(нм·км).

9 – Загальна кількість ОВ в кабелі – 16 / кількість жил дистанційного живлення в кабелі – 0 (відсутні).

1.6 Технічні параметри апаратури СЦІ компанії ERICSSON

При проектуванні волоконно-оптичної лінії передавання необхідно вивчити принцип побудови ЦСП СЦІ, технічні характеристики апаратури, параметри оптичних і електричних інтерфейсів STM-N.

Комплекс обладнання компанії ERICSSON AXD-155, AXD-620, AXD-2500, що призначене для транспортування оптичних сигналів рівнів STM-1 (швидкість передавання 155,52 Мбіт/с), STM-4 (швидкість передавання 622,08 Мбіт/с) і STM-16 (швидкість передавання 2488,32 Мбіт/с), що використовується на первинній мережі України.

Комплекс забезпечує весь діапазон обладнання транспортної мережі: термінальні мультиплексори (ТМ), мультиплексори введення-виведення (ADM), крос-конектори (DXC), проміжні (лінійні) регенератори (IR) і операційна система (OS) мережі керування TMN.

Даний комплекс обладнання відповідає вимогам рекомендацій ITU-T, які визначають параметри систем передачі і мережі СЦІ зі стандартними оптичними інтерфейсами і трактами мультиплексування.

Основні параметри оптичних інтерфейсів рівня STM-1, STM-4 та STM-16 наведені в таблицях 1.6.1, 1.6.2 та 1.6.3 відповідно.

Таблиця 1.6.1 – Параметри оптичних інтерфейсів рівня STM-1 компанії ERICSSON

Назва параметра	Одиниці вимірюв.	Значення параметру					
Номінальна швидкість передавання	Мбіт/с	155,52					
Тип інтерфейсу	-	S-1-1	S-1-2		L-1-1		L-1-2
Діапазон робочих довжин хвиль	нм	1261...1360	1430...1580		1280...1335		1480...1580
Тип джерела випромінювання	-	MLM	MLM	SLM	MLM	SLM	SLM
Максимальний рівень вихідної оптичної потужності	дБм	-8	-8		0		0
Мінімальний рівень вихідної оптичної потужності	дБм	-15	-15		-5		-5
Мінімальний рівень чутливості	дБм	-28	-28		-34		-34
Діапазон загасання	дБ	0...12	0...12		10...28		10...28

Таблиця 1.6.2 – Параметри оптичних інтерфейсів рівня STM-4 компанії ERICSSON

Назва параметра	Одиниці вимірюв.	Значення параметру					
Номінальна швидкість передавання	Мбіт/с	622,08					
Тип інтерфейсу	-	S-4-1	S-4-2	L-4-1		L-4-2	
Діапазон робочих довжин хвиль	нм	1293...1334	1430..1580	1230..1325	1280..1335	1480..1580	
Тип джерела випромінювання	-	MLM	SLM	MLM	SLM	SLM	
Максимальний рівень вихідної оптичної потужності	дБм	-8	-8	+2		+2	
Мінімальний рівень вихідної оптичної потужності	дБм	-15	-15	-3		-3	
Мінімальний рівень чутливості	дБм	-28	-28	-28		-28	
Діапазон загасання	дБ	0...12	0...12	10...24		10...24	

Таблиця 1.6.3 – Параметри оптичних інтерфейсів рівня STM-16 компанії ERICSSON

Назва параметра	Одиниці вимірюв.	Значення параметру				
Номінальна швидкість передавання	Мбіт/с	2488,32				
Тип інтерфейсу		S-16-1	S-16-2	L-16-1		L-16-2
Діапазон робочих довжин хвиль	нм	1260.. ...1360	1430... ...1580	1230... ...1325	1280... ...1335	1480... ...1580
Тип джерела випромінювання		SLM	SLM	SLM		SLM
Максимальний рівень вихідної оптичної потужності	дБм	0	0	+3		+3
Мінімальний рівень вихідної оптичної потужності	дБм	-5	-5	-2		-2
Мінімальний рівень чутливості	дБм	-18	-18	-28		-28
Діапазон загасання	дБ	0...12	0...12	10...24		10...24

1.7 Розрахунок довжини регенераційної ділянки

Максимальна довжина регенераційної ділянки визначається з урахуванням загасання у тракті та дисперсії: вибирається менше значення.

Визначимо довжину регенераційної ділянки з урахуванням енергетичних втрат.

Схема регенераційної ділянки наведена на рис. 1.7.1.



Рисунок 1.7.1 – Структурна схема регенераційної ділянки ВОСП

На початку регенераційної ділянки вмикається електрооптичний перетворювач (ЕОП), а в кінці – оптикоелектричний перетворювач (ОЕП). ЕОП та ОЕП підмикаються до оптичних волокон кабелю за допомогою роз'ємних з'єднувачів, які вносять загасання A_p кожний. Будівельні довжини кабелю з'єднуються зварюванням оптичних волокон, що вносить загасання $A_{зв}$.

Максимальна довжина регенераційної ділянки ВОСП визначається формулою

$$l_{ра} = \frac{Q - \Delta p_{\text{çаї}} - 2A_p - N \cdot A_{\text{çа}}}{\alpha}, \quad (1.7.1)$$

де

Q – енергетичний потенціал апаратури, дБ;

$\Delta p_{\text{зап}}$ – запас, який закладається з урахуванням можливого збільшення втрат під час експлуатації, дБ;

A_p – загасання рознімного стику, дБ;

$A_{\text{зв}}$ – загасання зварного стику, дБ;

N – кількість зварних стиків;

α – коефіцієнт загасання оптичного волокна, дБ/км.

Прийmemo, що використовується оптичний кабель з однаковими будівельними довжинами $l_{\text{бод}} = \text{const}$ і коефіцієнт загасання $\alpha = \text{const}$. Кількість зварних стиків

$$N = \frac{l_{\text{pa}}}{l_{\text{áoä}}} - 1. \quad (1.7.2)$$

Підставимо в формулу (1.7.1) вираз (1.7.2)

$$l_{\text{pa}} = \frac{Q - \Delta p_{\text{çäi}} - 2A_p - \left(\frac{l_{\text{pa}}}{l_{\text{áoä}}} - 1 \right) \cdot A_{\text{çä}}}{\alpha}. \quad (1.7.3)$$

Після виконання перетворень, отримуємо

$$l_{\text{pa}} = \frac{Q - \Delta p_{\text{çäi}} - 2A_p + A_{\text{çä}}}{\alpha + \frac{A_{\text{çä}}}{l_{\text{áoä}}}}. \quad (1.7.4)$$

Слід відзначити, що різницю $(2A_p - A_{\text{зв}})$ іноді позначають як додаткове загасання

$$A_{\text{дод.}} = 2A_p - A_{\text{зв.}} \quad (1.7.5)$$

Підставляючи вираз (1.7.5) у формулу (1.7.4), отримуємо

$$l_{\text{pa}} = \frac{Q - \Delta p_{\text{çäi}} - A_{\text{äiä}}}{\alpha + \frac{A_{\text{çä}}}{l_{\text{áoä}}}}. \quad (1.7.6)$$

Довжина регенераційної ділянки з урахуванням дисперсії оптичних сигналів у волокні розраховується за формулою

$$l_{\text{p}\sigma} = \frac{0,25}{\sigma \cdot \Delta\lambda \cdot F}, \quad (1.7.7)$$

де

σ – питома хроматична дисперсія ОВ, пс/(нм·км) на робочій довжині хвилі;

$\Delta\lambda$ – ширина спектра джерела випромінювання, нм;

F – тактова частота апаратури, Гц.

Більш точний розрахунок довжини регенераційної ділянки з урахуванням інерційності компотнентів наведено в п.2.2.

Приклад 1. Розрахувати довжину регенераційної ділянки мережі СЦІ, на якій застосовуються мультиплексори рівня STM-4.

Енергетичний потенціал обладнання рівня STM-4 $Q = 24$ дБ; коефіцієнт загасання ОК $\alpha = 0,22$ дБ/км; будівельна довжина кабелю $l_{\text{буд}} = 4$ км; хроматична дисперсія $\sigma = 17$ пс/(нм·км); ширина спектра джерела випромінювання $\Delta\lambda = 0,3$ нм, $F = 622,08$ МГц.

Прийняти експлуатаційний запас $p_{\text{зап.}} = 6$ дБ; додаткове загасання $A_{\text{дод}} = 1$ дБ; загасання зварного стику $A_{\text{зв}} = 0,3$ дБ.

Підставляючи числові значення у формулу (1.7.6), визначаємо довжину регенераційної ділянки з урахуванням втрат

$$l_{\text{ра}} = \frac{24 - 6 - 1}{0,22 + \frac{0,3}{4}} = 57,6 \text{ км}.$$

Розрахуємо довжину регенераційної ділянки з урахуванням дисперсії за формулою (1.7.7)

$$l_{\text{рс}} = \frac{0,25}{17 \cdot \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} \cdot 0,3 \text{ дБ} \cdot 622,08 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{нм}}} = \frac{0,25}{17 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} \cdot 0,3 \text{ дБ} \cdot 622,08 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{нм}}} = 78,8 \text{ км}.$$

Таким чином, довжина регенераційної ділянки з урахуванням втрат дорівнює 57,6 км, а з урахуванням хроматичної дисперсії – 78,8 км.

Висновок: У даному випадку довжина регенераційної ділянки буде 57,6 км.

1.8 Розміщення необслуговуваних регенераційних пунктів

Розрахувавши довжину регенераційної ділянки, слід проаналізувати відстані (по ОК) між мережними вузлами. Якщо довжина мультиплексної секції менша розрахованої довжини регенераційної ділянки, то проміжні регенераційні пункти відсутні. В протилежному випадку, коли довжина ОК між мережними вузлами перевищує довжину регенераційної ділянки, слід:

- працювати в третьому вікні прозорості, де менший коефіцієнт загасання оптичного волокна і більша довжина регенераційної ділянки;
- застосувати оптичні підсилювачі на передачі (бустери);
- застосувати оптичні підсилювачі і на передачі, і на прийомі.

У випадку, коли робота в третьому вікні прозорості ($\lambda = 1550$ нм) і застосування оптичних підсилювачів не забезпечують необхідну достовірність передавання інформації, то слід застосовувати регенераційні пункти, що не обслуговуються (НРП).

НРП розміщують в населених пунктах, тому що їм необхідно забезпечити живлення від електричних мереж. Місця розташування НРП слід вибирати так, щоб їх кількість була мінімальна.

1.9 Розробка схема організації зв'язку

Схема організації зв'язку відображає архітектуру мережі, систему передачі, кабель, як забезпечено зв'язок між мережними вузлами, які використовують електричні та оптичні інтерфейси, методи захисту та резервування.

Проаналізувавши технічне завдання на проектування ВОЛП, вибирається архітектура мережі, яка забезпечує зв'язок між мережними вузлами. Наступним етапом є вибір оптичного кабелю і його ємності. Ємність кабелю вибирається з запасом, який покриває потребу з урахуванням перспективи розвитку мережі.

На заміській ділянці може використовуватися броньований оптичний кабель, який безпосередньо прокладається в ґрунт, або неброньований, прокладений в трубі. В межах міста використовується неброньований оптичний кабель, який прокладається в телефонній каналізації.

Слід вибрати метод захисту, який забезпечить надійну роботу мережі.

Відповідно до завдання розробляється мультиплексний план: визначається рівень ієрархії ЦСП СЦІ, а також кількість цифрових потоків, що виділяються у мережних вузлах.

Необхідно вибрати компанію, яка буде поставляти обладнання для мережі зв'язку, що проектується.

Тепер є всі дані для схеми організації зв'язку. В мережних вузлах розміщуємо мультиплексори і вибираємо лінійні інтерфейси в залежності від довжин мультиплексних секцій.

Відомо, що на мультиплексних секціях використовуються інтерфейси

$$S - n . 1(2),$$

де

S (Short – коротка) секція;

n – рівень STM;

$1(2)$ – друге (третє) вікно прозорості оптичного волокна.

При більшій довжині регенераційної ділянки, використовуються інтерфейси $L - n . 1(2)$, де L (Long – довга) секція.

Користуючись технічними параметрами мультиплексорів STM-N та ОК, необхідно розрахувати довжини короткої (S) і довгої (L) регенераційних секцій.

У залежності від довжини ОК, який з'єднує мережні вузли, вибираються відповідні лінійні інтерфейси.

Приклад 2. Розробити схему організації зв'язку мережі, архітектура якої наведена на рис. 1.4.1, а мультиплексний план на рис. 1.4.2. Довжина оптичного кабелю між пунктами А і Б складає 42,1км, Б і В – 50,5км, В і Г – 25,7км, Г і А – 30,1км, Г і D – 27,4км.

Архітектура мережі радіально-кільцева. Кільце двоспрямоване з чотирма оптичними волокнами, на відгалуженні – 2 оптичних волокна. Метод захисту – MS SPRing.

Використовується обладнання компанії ERICSSON: в кільці AXD-620 (STM-4), на відгалуженні – AXD-155 (STM-1).

Кількість виділених ПЦП в MBV-A дорівнює $63 \times 2 + 52 = 178$ Е1, в MBV-Б – $63 \times 2 + 49 = 175$ Е1, в MBV-В – $63 \times 2 + 16 = 142$ Е1, в MBV-Г – $63 \times 2 + 6 = 132$ Е1, в MBV-Д – $32 + 25 = 57$ Е1, що відповідає завданню.

Слід відзначити, що з STM-1, STM-4 можна виділяти (вводити) потоки Е1, Е3, Е4, S1.

Параметри інтерфейсу G.703 наведено в Д. 3, де є фізичні й електричні характеристики потоків Е1, Е3, Е4, S1.

Приклад. Розробити схему організації зв'язку кільцевої топології. В двоспрямованому двоволоконному кільці чотири мережних вузли А, Б, В, Г. Розподіл ПЦП між мережними вузлами наведений в табл. 1.9.1.

Таблиця 1.9.1 – Розподіл ПЦП між мережними вузлами

Мережеві вузли	MBV-A	MBV-Б	MBV-В	MBV-Г
MBV-A		75	65	100
MBV-Б			80	55
MBV-В				90
MBV-Г				

Відстань між пунктами А і Б складає 33,3 км, Б і В – 47,1 км, В і Г – 55,3 км, А і Г – 25,5 км.

Метод захисту MS SPRing; в кільці задіяно два оптичних волокна. Використовується обладнання компанії ERICSSON.

Складемо мультиплексний план, рис. 1.9.2.

Для визначення рівня ієрархії мережі в даному випадку слід визначити суму двох найбільш завантажених ділянок

$$200 + 145 = 345$$

первинних цифрових потоків.

У кільці використовуємо STM-16, тому що

$$252 < 345 < 1008.$$

Використовуємо STM-16 компанії ERICSSON, з якого можливо виділити потоки S1 (155,52 Мбіт/с), S4 (622,08 Мбіт/с), але не передбачено виділення первинних цифрових потоків.

У даному випадку в мережних вузлах необхідно виділити потоки ПЦП. Для розв'язання цієї задачі в мережних вузлах установлюють STM-4 і STM-1.

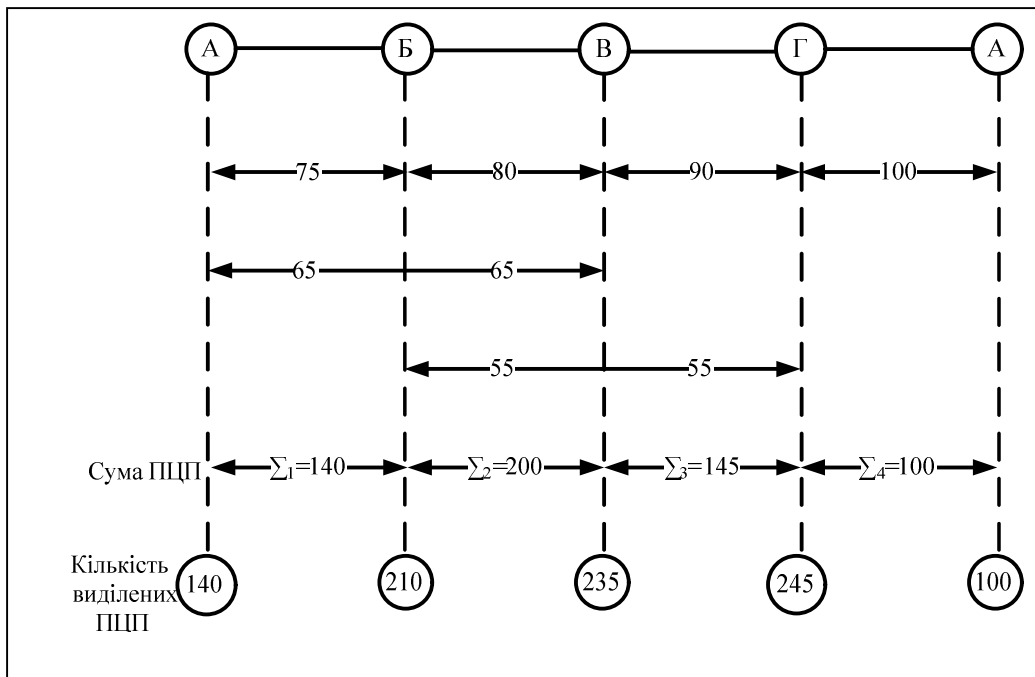


Рисунок 1.9.2 –
Мультиплексний план

Схема організації зв'язку наведена на рис. 1.9.3.

у кільці використані мультиплексори AXD-2500 (STM-

16), з яких виділяються потоки S_4 (620 Мбіт/с) і подаються на мультиплексори AXD-620 (STM-4). Інтерфейс $I-4$ є внутрішньостанційним, швидкість передавання інформації – 620 Мбіт/с у другому вікні прозорості.

Первинні цифрові потоки виділяються з AXD-620. Використовуються трибутивні модулі 63 x 2 Мбіт/с.

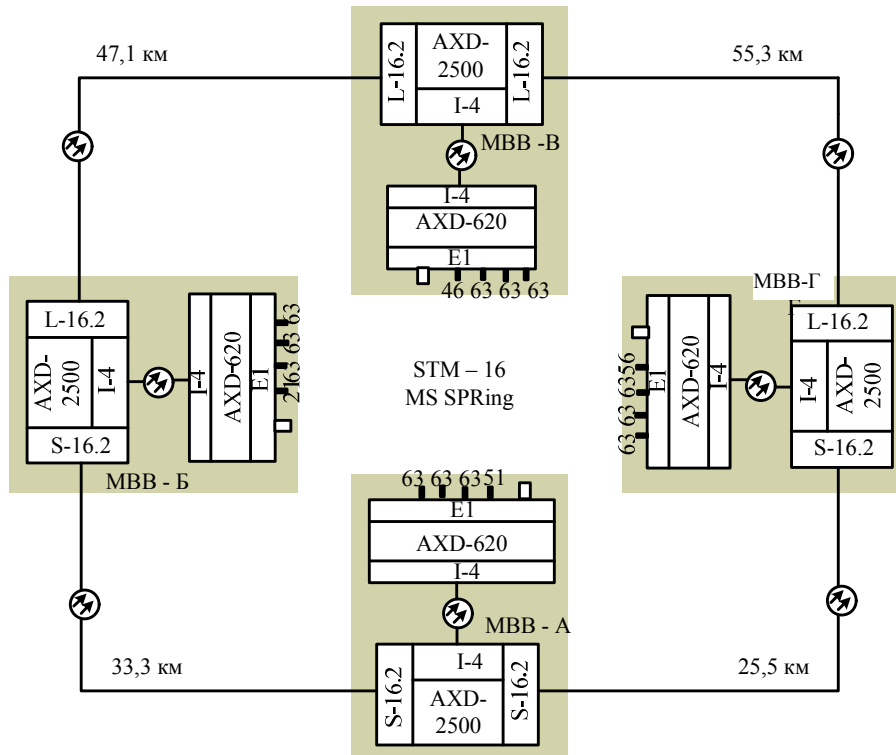


Рисунок 1.9.3 – Схема організації зв'язку мережі СЦ

1.10 Розробка схеми синхронізації мережі

Необхідною умовою нормального функціонування цифрових мереж є синхронізація.

Дві цифрові послідовності, що порівнюються, можуть бути – синхронізованими за трьома параметрами:

- часу появи на вузлі мережі t – часова синхронізація;
- тривалості інтервалу t або частоти проходження імпульсів $f = 1/t$ – частотна (тактова) синхронізація;
- початок фази – фазова синхронізація.

Задача часової синхронізації – глобальна, але вирішується просто, якщо для мережі використовується служба всесвітнього координованого часу (UTC) або одне стабільне джерело.

Задача фазової синхронізації – локальна і вирішується завдяки використанню систем фазового автопідстроювання або «еластичних цифрових буферів», що дозволяють прив'язати початкову фазу до початку такту стабільного джерела тактової синхронізації.

Задача тактової синхронізації – глобальна і локальна одночасно, є складною.

Відомо, що в цифрових системах передачі ІКМ, ПЦІ, СЦІ послідовності необхідно синхронізувати за наступними параметрами:

- за циклами – циклова синхронізація, втрата якої призводить до появи аварійного сигналу LOF (втрата синхронізації за циклами);
- за надциклами – надциклова синхронізація, втрата якої призводить до появи аварійного сигналу LOM (втрата синхронізації за надциклами);
- за тактами всередині циклу – тактова синхронізація, втрата якої призводить до появи аварійного сигналу LOS (втрата сигналу тактової синхронізації).

Метою тактової синхронізації є передавання інформації про довжину тактового інтервалу t_0 або про тактову частоту f_0 усім пристроям мережі з точністю, яка вимагається.

Для тактової синхронізації мережі СЦІ використовується високоточний первинний генератор і надійна система розподілу сигналу синхронізації на всі вузли мережі. На ЄНСЗ України прийнята схема керування сигналом синхронізації типу ведучий – ведений. Це ієрархічна схема з використанням первинного еталонного генератора ПЕГ (PRC), сигнали якого розподіляються за елементами, що синхронізуються (CE), дерева мережі синхронізації до другого рівня ієрархії, де вони керують вторинними задаючими генераторами ВЗГ (SRC), а ВЗГ через ланцюжки генераторів мережних елементів ГМЕ керують локальними джерелами синхронізації третього рівня ієрархії. Основною вимогою при формуванні мережі синхронізації є наявність основних і резервних шляхів розповсюдження сигналу синхронізації. У мережній синхронізації не допустимо проектувати замкнені контури синхронізації як в кільцевих, так і в чарункових мережах.

На рис. 1.10.1 наведена схема синхронізації радіально-кільцевої мережі СЦІ при нормальному функціонуванні. Вузол А назначається ведучим (або майстер-вузол) , на який подається сигнал синхронізації від зовнішнього PRC. Від вузла А основний сигнал синхронізації передається по кільцю проти годинникової стрілки в пункти Б, В, Г з відгалуженням у пункт Д. Синхронізація по резервній гілці здійснюється за годинниковою стрілкою з відгалуженням у пункт Д.

На рис. 1.10.2 наведена схема синхронізації після розриву кабелю між пунктами Б і В. При розриві кабелю вузол В не отримує сигнал синхронізації від вузла Б і переходить у режим утримання синхронізації та посилає вузлу Г повідомлення про статус рівня якості синхронізації. Вузол Г, який отримав повідомлення про рівень якості синхронізації від пунктів А та В вибирає кращий (від А) та посилає вузлу В повідомлення «PRC» замість «Don't use». Вузол В, який отримав це повідомлення від вузла Г, змінює джерело синхронізації на «PRC» від пункту Г.

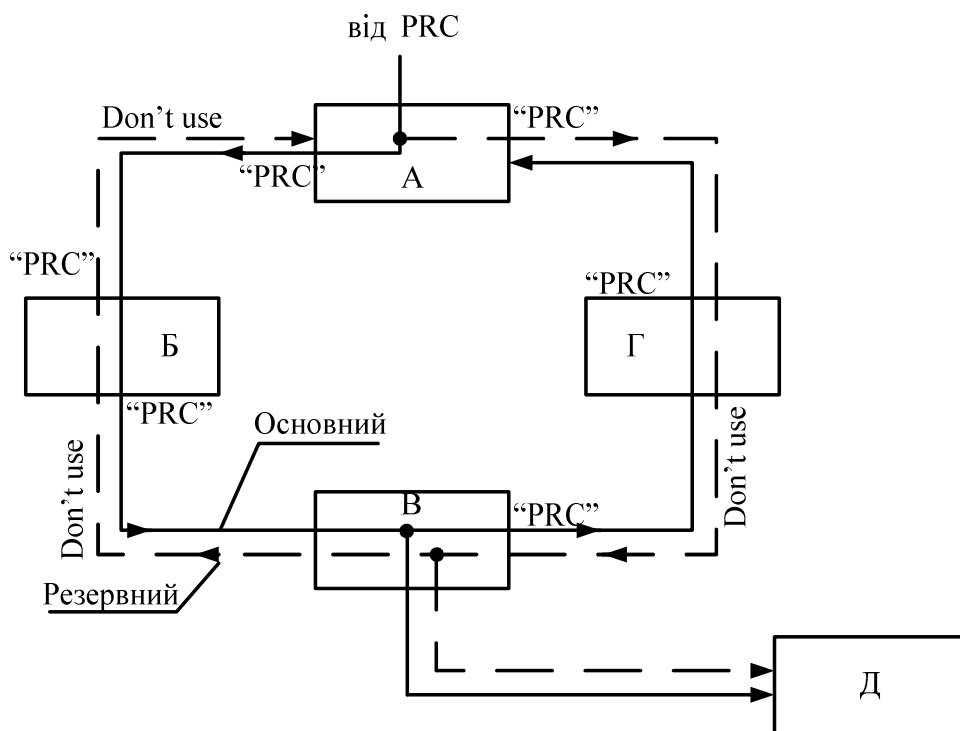


Рисунок 1.10.1 – Схема синхронізації мережі при нормальному функціонуванні

Початкове розповсюдження хронуючих джерел по вузлам наведено в табл. 1.10.1.

Таблиця 1.10.1 – Розподіл джерел синхронізації при нормальному функціонуванні мережі

Вузол	Джерело I пріоритету	Джерело II пріоритету
Вузол А	Зовнішній PRC (2 МГц)	–
Вузол Б	Лінійний сигнал від А	Don't use
Вузол В	Лінійний сигнал від Б	Don't use
Вузол Г	Лінійний сигнал від В	Don't use
Вузол Д	Лінійний сигнал від В	Don't use

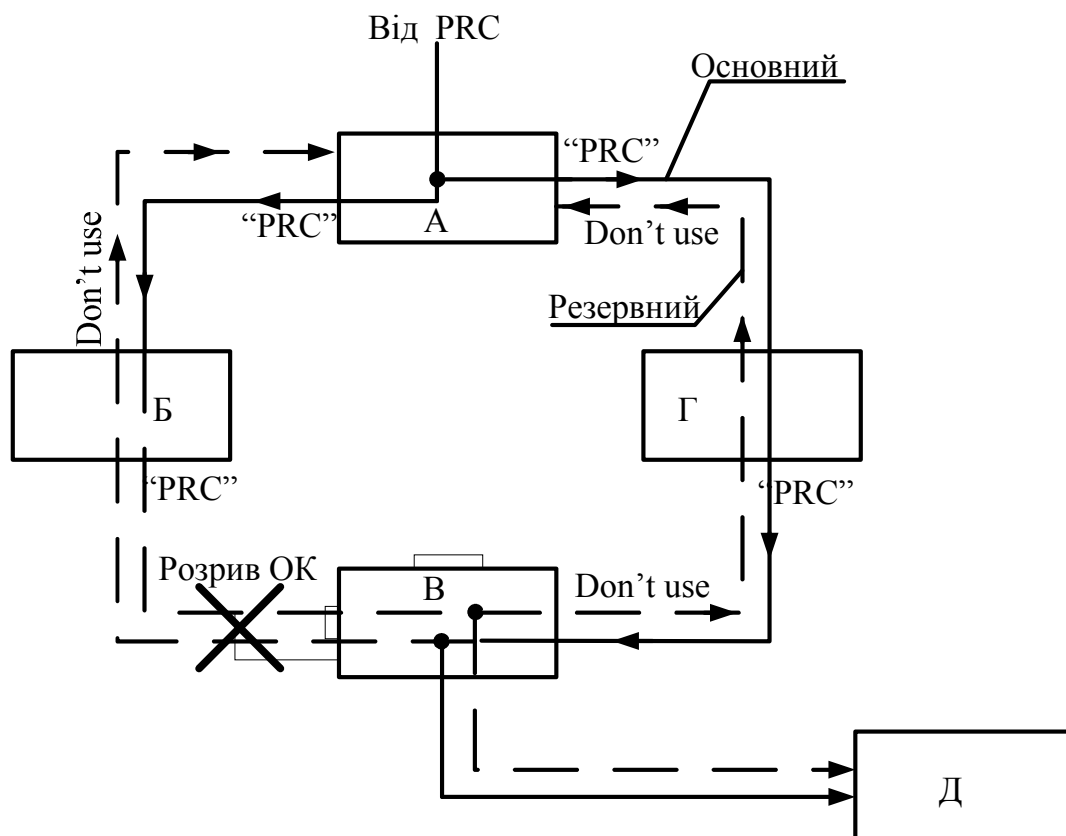


Рисунок 1.10.2 – Схема синхронізації мережі після обриву кабелю

Розповсюдження хронуючих джерел по вузлам після пошкодження (розриву) кабелю наведено в табл. 1.10.2.

Таблиця 1.10.2 – Розподіл джерел синхронізації після розриву кабелю

Вузол	Джерело I пріоритету	Джерело II пріоритету
Вузол А	Зовнішній PRC (2МГц)	-
Вузол Б	Лінійний сигнал від А	Don't use
Вузол В	Don't use	Лінійний сигнал від Г
Вузол Г	Don't use	Лінійний сигнал від А
Вузол Д	Don't use	Лінійний сигнал від В

2 ПРОЕКТУВАННЯ ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ТА ЧАСОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Проектування лінійного тракту ВОСП прийнято виконувати у два етапи.

Перший етап (п. 2.1) – компоненти лінійного тракту приймаються безінерційними (не враховуються лінійні спотворення форми сигналу) і аналізується тільки зміна потужності електричного й оптичного сигналів та середньоквадратичного значення шумів [10]. При цьому визначають максимальну довжину ділянки регенерації або підсилення за потужністю (загасанням), за якої забезпечується необхідна якість зв'язку.

Другий етап (п. 2.2) – навпаки враховують тільки параметри інерційності (швидкодії) компонентів тракту і не звертають уваги на енергетичні показники. При цьому обчислюють максимальну дальність передавання (довжину ділянки регенерації або підсилення) за допустимим значенням часу наростання фронту імпульсу, за якого забезпечується нормована якість зв'язку [12]. З двох отриманих результатів обирають менший.

У п. 2.1 наведено метод проектування лінійних трактів ВОСП (перший етап аналізу), який ще можна назвати «арифметикою оптоелектронних співвідношень».

2. 1 Проектування лінійного тракту за енергетичними параметрами

2.1.1 Основні компоненти лінійного тракту

Для передавання електричних сигналів по оптичних волокнах (ОВ) застосовують волоконно-оптичні лінійні тракти (ВОЛТ), рис. 2.1.1.

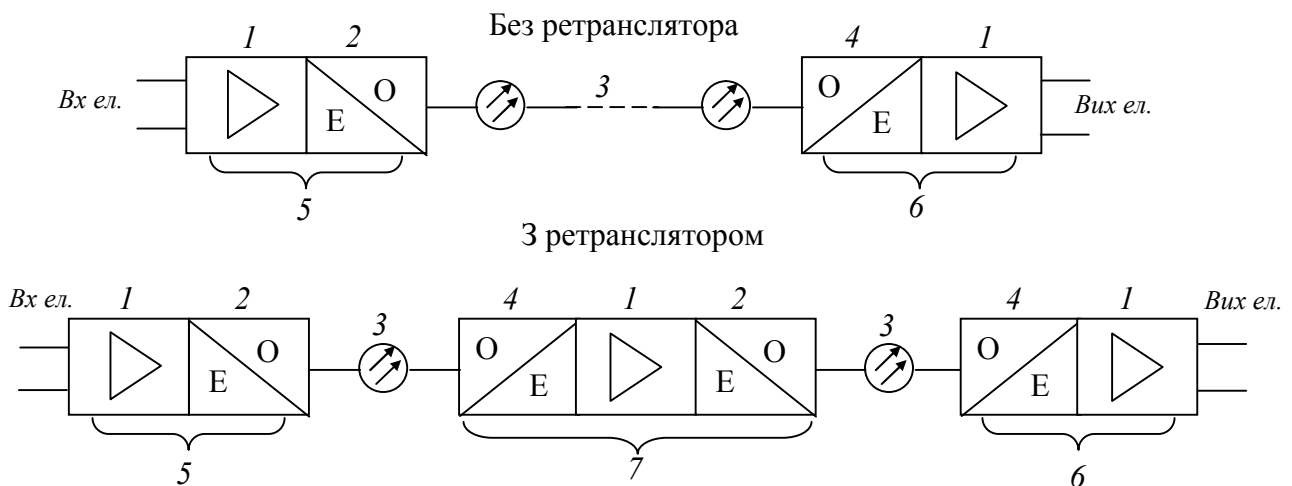


Рисунок 2.1.1 – Структурні схеми та основні компоненти ВОЛТ: 1 – сигнальний процесор (підсилювач), 2 – джерело випромінювання (Е/О перетворювач), 3 – оптичне волокно, 4 – приймач випромінювання (О/Е перетворювач), 5 – передавальний пристрій, 6 – приймальний пристрій, 7 – ретранслятор О-Е-О типу

Волоконно-оптичний лінійний тракт – це комплекс технічних пристроїв, призначених для передачі оптичного лінійного сигналу з певною довжиною хвилі, компенсації загасання в середовищі передачі, корекції спотворень сигналу, з метою забезпечення необхідного значення відношення сигнал/шум в аналоговій або коефіцієнта помилок в цифровій системі передачі.

Основними функціональними компонентами ВОЛТ є наступні [7]: а) електрооптичний (Е/О) перетворювач; 2 – джерело випромінювання (ДВ); б) середовище передачі – оптичне волокно 3; в) оптоелектричний (О/Е) перетворювач 4 – приймач випромінювання (ПВ). Передавальний пристрій (ПП) 5 складається з сигнального процесора (підсилювача) 1 та ДВ 2, а приймальний пристрій (ПрП) 6 – з ПВ 4 та сигнального процесора (підсилювача) 1. У протяжних ВОЛТ встановлюють ретранслятори 7 О-Е-О-типу, що складаються з трьох основних блоків – ПрП 6, сигнального процесора 1 (підсилювача в аналогових, регенератора в цифрових системах) і ПП 5. В сучасних ВОЛТ також застосовують оптичні підсилювачі – ретранслятори О-типу, що підсилюють оптичний сигнал без перетворення в електричний еквівалент, але і без регенерації.

Для зручності аналізу параметрів компонентів ВОЛТ представимо їх у вигляді функціональних вузлів, що здійснюють відповідно Е/О, О/Е, О-О і Е-Е перетворення енергії переносника інформації, що має електричну (Е) або оптичну (О) природу, рис. 2.1.2. В *оптоелектронних перетворювачах* – Е/О (передавальний пристрій) і О/Е (приймальний пристрій) – відбувається перенос спектру сигналу з Е до О-області і навпаки. В *оптичних компонентах* типу О-О (оптичне волокно, оптичний підсилювач, транспондер та інші) і *електричних компонентах* типу Е-Е (сигнальний процесор) спектрального перетворення немає, а змінюються значення параметрів оптичного і електричного переносника відповідно.

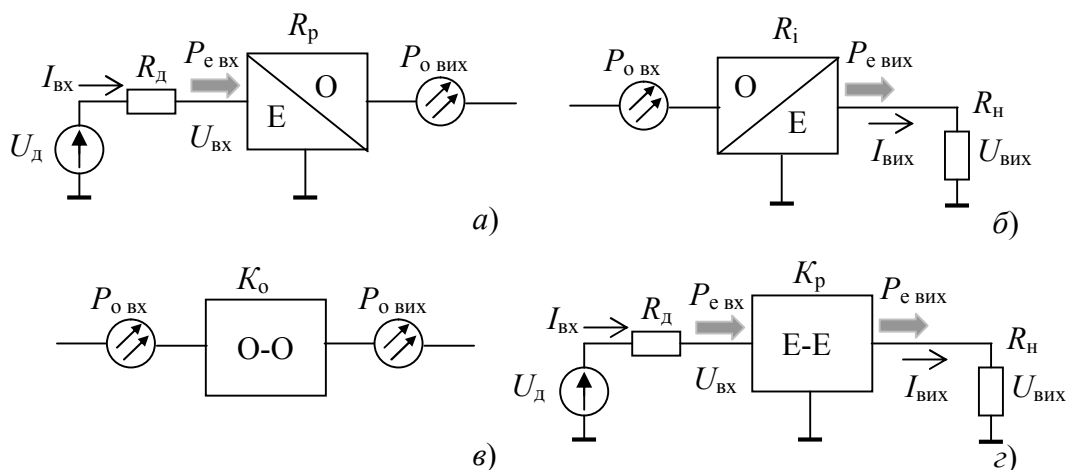


Рисунок 2.1.2 – Умовні графічні позначення компонентів:

а) електро-оптичного; б), опто-електричного; в) опто-оптичного; з) електро-електричного, де U_d та R_d – напруга та опір джерела сигналу, R_H – опір навантаження (інші пояснення в тексті)

Нижче подано метод проектування параметрів оптичних лінійних трактів ВОСП [11]. Наведені співвідношення справедливі для таких умов:

1) неперервних (немодульованих) значень електричних і оптичних величин (аналіз «на постійному світлі», що є аналогічним до аналізу електричних кіл «на постійному струмі»); 2) середніх у часі значень електричних і оптичних величин, що змінюються, зокрема, для випадку модуляції інтенсивності (потужності) оптичного переносника на передачі та прямим перетворенням на прийомі за відсутності інерційності приймально-передавальних пристроїв, і дисперсії сигналу у середовищі розповсюдження.

Електрооптичний перетворювач. Для ЕОП на рис. 2.1.2,а прийняті такі позначення: $U_{\text{вх}}, I_{\text{вх}}, P_{\text{е вх}}$ – напруга, струм і потужність електричного сигналу на вході ЕОП;

$$R_p(\text{Вт/А}) = \Delta P_{\text{о вих}}(\text{Вт})/I_{\text{вх}}(\text{А}), \rho_p(\text{дБ}) = 20\lg[R_p(\text{Вт/А})/1 \text{ Вт/А}] \quad (2.1.1)$$

– *диференційний ватовий відгук* ЕОП-а з урахуванням ефективності введення потужності світла до ОВ, де $\Delta P_{\text{о вих}}$ – приріст оптичної потужності на вихідному оптичному полюсі ЕОП, який викликаний приростом електричного струму $\Delta I_{\text{вх}}$ на його вхідному електричному полюсі. Індекси «е» або «о» вказують на приналежність параметра до електричної або оптичної області спектра. Далі окрім фізичних одиниць (А, В, Вт, Ом) будемо застосовувати і логарифмічні – дБм, дБ. Перші позначатимемо великими, а другі – маленькими літерами. Наприклад, у виразі $p_{\text{е вх, вих}}(\text{дБм}) = 10\lg[P_{\text{е вх, вих}}(\text{мВт})/1\text{мВт}]$, $P_{\text{е вих, вх}}$ і $p_{\text{е вх, вих}}$ – потужність і рівень потужності електричного сигналу на вході (виході) відповідно. Для ЕОП з урахуванням співвідношень (2.1.1), отримуємо

$$P_{\text{е вх}}(\text{Вт}) = I_{\text{вх}}^2(\text{А}) R_{\text{д}}(\text{Ом}), P_{\text{о вих}}(\text{Вт}) = I_{\text{вх}}(\text{А}) R_p(\text{Вт/А});$$

$$p_{\text{о вих}}(\text{дБм}) = [p_{\text{е вх}}(\text{дБм}) + \rho_p(\text{дБ}) - r_{\text{д}}(\text{дБ}) + 30 \text{ дБ}]/2; \quad (2.1.2)$$

$$p_{\text{е вх}}(\text{дБм}) = 2p_{\text{о вих}}(\text{дБм}) - \rho_p(\text{дБ}) + r_{\text{д}}(\text{дБ}) - 30 \text{ дБ}, \quad (2.1.3)$$

де $r_{\text{д}}(\text{дБ}) = 10\lg[R_{\text{д}}(\text{Ом})/1 \text{ Ом}]$.

У табл. 2.1.1 наведені розрахункові вирази для трьох значень $R_{\text{д}} = 50 \text{ Ом}$ і 75 Ом (цифрові й аналогові ВОЛТ відповідно) та $R_{\text{д}} = 1000 \text{ Ом}$, за якого формули (2.1.2) і (2.1.3) спрощуються.

Таблиця 2.1.1 – Співвідношення для розрахунку параметрів ЕОП

Опір ДВ $R_{\text{д}}, \text{Ом}$	Оптичний полюс: $p_{\text{о вих}}(\text{дБм}) =$	Електричний полюс: $p_{\text{е вх}}(\text{дБм}) =$
50	$[p_{\text{е вх}}(\text{дБм}) + \rho_p(\text{дБ})]/2 + 6,05 \text{ дБ}$	$2p_{\text{о вих}}(\text{дБм}) - \rho_p(\text{дБ}) - 13,01 \text{ дБ}$
75	$[p_{\text{е вх}}(\text{дБм}) + \rho_p(\text{дБ})]/2 + 5,625 \text{ дБ}$	$2p_{\text{о вих}}(\text{дБм}) - \rho_p(\text{дБ}) - 11,25 \text{ дБ}$
1000	$[p_{\text{е вх}}(\text{дБм}) + \rho_p(\text{дБ})]/2$	$2p_{\text{о вих}}(\text{дБм}) - \rho_p(\text{дБ})$

Значення R_p не завжди вказує виробник ДВ. Воно може бути розраховане за паспортними або експериментальними даними за формулою (2.1.1), якщо відома (виміряна) потужність випромінювання, введена в одно- (ОМ) або багатомодове (БМ) ОВ. У табл. 2.1.2 наведені значення R_p і ρ_p основних типів напівпровідникових ОЕП і ОВ на довжині хвилі 1300 нм. Тут використані такі аббревіатури для позначення типу лазерного резонатора: ФП – Фабрі-Перро, РЗЗ

– розподілений зворотний зв'язок, РБВ – розподілене брегівське відбиття, ВР – вертикальний резонатор.

Таблиця 2.1.2 – Значення коефіцієнтів Е/О перетворення напівпровідникових ЕОП [2]

Тип ДВ і ОВ	Світлодіод + БМ/ОМ волокно		Лазерний діод + ОМ волокно			
	поверхневий	торцевий	Ф-П	РЗЗ	РБВ	ВР
R_p , Вт/А	0,00025/0,000013	0,0004/0,00013	0,1...0,2	0,07	0,1	0,5
ρ_p , дБ	-72/-97,5	-68/-77,5	-20...-14	-23	-20	-6

Для ЕОП формально може бути введений коефіцієнт передачі за потужністю (з перетворенням спектра) $K_{p\text{ еоп}} = P_{o\text{ вих}}(\text{Вт})/P_{e\text{ вх}}(\text{Вт}) = R_p(\text{Вт/А})/U_{\text{вх}}(\text{В})$. Очевидно, що між $K_{p\text{ еоп}}$ і $U_{\text{вх}}$ є зворотно пропорційна залежність. Коефіцієнт передачі за потужністю у відносних одиницях

$$k_{p\text{ еоп}}(\text{дБ}) = [\rho_p(\text{дБ}) - u_{\text{вх}}(\text{дБ})]/2, \text{ де } u_{\text{вх}}(\text{дБ}) = 20\lg[U_{\text{вх}}(\text{В})/1 \text{ В}]. \quad (2.1.4)$$

Приклад 2.1.1. Для лазерного діода з резонатором Фабрі-Перро $\rho_p = -20$ дБ при $R_d = 50$ Ом, $U_{\text{вх}} = 0,5$ В ($u_{\text{вх}} = -6$ дБ) знаходимо $k_{p\text{ еоп}} = -7$ дБ (ККД = 20%).

Оптоелектричний перетворювач (ОЕП). Для ОЕП на рис. 2.1.2,б прийняті наступні позначення: $P_{o\text{ вх}}$ – середнє в часі значення потужності оптичного сигналу на вході;

$$R_i(\text{А/Вт}) = \Delta I_{\text{вих}}(\text{А})/\Delta P_{o\text{ вх}}(\text{Вт}); \rho_i(\text{дБ}) = 20\lg[R_i(\text{А/Вт})/1 \text{ А/Вт}] \quad (2.1.5)$$

– *диференціальний струмовий відгук* (з урахуванням ефективності виведення світла з ОВ), що дорівнює приросту струму $\Delta I_{\text{вих}}$ на вихідному полюсі, викликаному приростом оптичної потужності $\Delta P_{o\text{ вх}}$ на його вхідному полюсі; $U_{\text{вих}}$, $I_{\text{вих}}$ і $P_{e\text{ вих}}$ – відповідно напруга, струм і потужність електричного сигналу на виході; R_n – опір навантаження. Для ОЕП з урахуванням співвідношень (2.1.5)

$$I_{\text{вих}}(\text{А}) = P_{o\text{ вх}}(\text{Вт})R_i(\text{А/Вт}), P_{e\text{ вих}}(\text{Вт}) = I_{\text{вих}}^2(\text{А}^2)R_n(\text{Ом});$$

$$p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) = 2p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) + \rho_i(\text{дБ}) + r_n(\text{дБ}) - 30 \text{ дБ}; \quad (2.1.6)$$

$$p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) = [p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) - \rho_i(\text{дБ}) - r_n(\text{дБ}) + 30 \text{ дБ}]/2, \quad (2.1.7)$$

де $r_n(\text{дБ}) = 10\lg[R_n(\text{Ом})/1 \text{ Ом}]$.

В табл. 2.1.3 наведені розрахункові вирази для трьох значень $R_n = 50$ Ом і 75 Ом (цифрові й аналогові ВОЛТ відповідно) та $R_n = 1000$ Ом, за якого формули (2.1.6) і (2.1.7) спрощуються.

Таблиця 2.1.3 – Співвідношення для розрахунку параметрів ОЕП

Опір навантаження ПВ R_n , Ом	Електричний полюс: $p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) =$	Оптичний полюс: $p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) =$
50	$2p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) + \rho_i(\text{дБ}) - 13,01 \text{ дБ}$	$[p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) - \rho_i(\text{дБ})]/2 + 6,05 \text{ дБ}$
75	$2p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) + \rho_i(\text{дБ}) - 11,25 \text{ дБ}$	$[p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) - \rho_i(\text{дБ})]/2 + 5,625 \text{ дБ}$
1000	$2p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) + \rho_i(\text{дБ})$	$[p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) - \rho_i(\text{дБ})]/2$

Значення R_i звичайно вказує виробник ПВ на робочій довжині хвилі λ . В іншому випадку значення може бути розраховане за формулою (2.1.5) після вимірювання сім'ї вольт-амперних характеристик фотодіода. В табл. 2.1.4 наведені значення R_i і ρ_i фотодіодів (ФД) без внутрішнього підсилення ($p-i-n$ -типу) і з підсиленням (лавинного типу), виконаних з різних напівпровідникових матеріалів.

Таблиця 2.1.4 – Значення коефіцієнтів О/Е перетворення напівпровідникових ФД [2]

Тип ФД	$p-i-n$			лавинний		
нм	850	1300	1550	850	1300	1550
Матеріал	кремній	германій	InGaAs	кремній	германій	InGaAs
R_i , А/Вт	0,5	0,7	0,6	75	35	12
ρ_i , дБ	-6	-3,1	-4,4	37,5	31	21,6

Диференціальний вольтовий відгук ПрП оцінює ефективність перетворення ОЕП-ом оптичної потужності в електричну напругу

$$R_u(\text{В/Вт}) = \Delta U_{\text{вих}}(\text{В})/\Delta P_{\text{о вх}}(\text{Вт}), \rho_u(\text{дБ}) = 20\lg[R_u(\text{В/Вт})/1 \text{ В/Вт}], \quad (2.1.8)$$

де $\Delta U_{\text{вих}}$ – приріст напруги на виході, викликаний приростом оптичної потужності $\Delta P_{\text{о вх}}$ на вході. Вольтовий відгук можна виразити через струмовий відгук $\rho_u(\text{дБ}) = \rho_i(\text{дБ}) + 2r_n(\text{дБ})$. Доцільність введення цього параметра продиктована тим, що на виході ПрП звичайно вимірюється електрична напруга.

Для ОЕП формально може бути введений коефіцієнт передачі за потужністю (з перетворенням спектра) $K_{p \text{ оеп}} = P_{e \text{ вих}}(\text{Вт})/P_{o \text{ вх}}(\text{Вт}) = R_u(\text{В/А})I_{\text{вих}}(\text{А})$, тобто пропорційна вихідному електричному (і вхідному оптичному) сигналу. Коефіцієнт передачі за потужністю у відносних одиницях

$$k_{p \text{ оеп}}(\text{дБ}) = [\rho_u(\text{дБ}) + i_{\text{вих}}(\text{дБ})]/2, \quad (2.1.9)$$

де $i_{\text{вих}}(\text{дБ}) = 20\lg[I_{\text{вих}}(\text{А})/1 \text{ А}]$.

Приклад 2.1.2. Для $p-i-n$ -фотодіода з $R_i = 0,5 \text{ А/Вт}$ і $R_n = 50 \text{ Ом}$, $\rho_u = 28 \text{ дБ}$ і для $P_{o \text{ вх}} = 1 \text{ мВт}$ знаходимо $I_{\text{вих}} = 0,5 \text{ мкА}$ ($i_{\text{вих}} = -66 \text{ дБ}$) і $k_{p \text{ оеп}} = -19 \text{ дБ}$ (ККД = 1,2 %). Збільшивши значення R_n до 1 кОм, отримаємо $\rho_u = 54 \text{ дБ}$, $k_{p \text{ оеп}} = -6 \text{ дБ}$ (ККД = 25,1 %). Висновок – для ОЕП бажане високоомне навантаження.

Приклад 2.1.3. Використовуючи результати прикладів 2.1.1 і 2.1.2, знайти коефіцієнт передачі оптрона «ЕОП + ОЕП» $k_p = k_{p \text{ еоп}}(\text{дБ}) + k_{p \text{ оеп}}(\text{дБ})$. Для $R_d = R_n = 50 \text{ Ом}$ отримуємо $k_p = -7 - 19 = -26 \text{ дБ}$ (ККД = 2,5 %); для випадку $R_d = 50 \text{ Ом}$ і $R_n = 1 \text{ кОм}$ знаходимо $k_p = -7 - 6 = -13 \text{ дБ}$ (ККД = 5 %), тобто є зростання у 2 рази.

Оптооптичний перетворювач (ООП) на рис. 2.1.2, в характеризується коефіцієнтом передачі за потужністю

$$K_o = P_{o \text{ вих}}(\text{Вт})/P_{o \text{ вх}}(\text{Вт}), k_o(\text{дБ}) = p_{o \text{ вих}}(\text{дБм}) - p_{o \text{ вх}}(\text{дБм}), \quad (2.1.10)$$

де $P_{o \text{ вх}}$ і $P_{o \text{ вих}}$ – середні в часі значення потужності оптичного випромінювання на вході і виході відповідно. Для активного ООП, наприклад, оптичного

підсилювача $K_o > 1$ ($k_o > 0$ дБ), тоді як для пасивного (оптичне волокно, з'єднувач, атенюатор, компенсатор дисперсії, вентиль та ін.) $K_o < 1$ ($k_o < 0$ дБ). В табл. 2.1.5 наведені значення коефіцієнта загасання ОВ різних типів у залежності від довжини хвилі. Для ОВ довжиною l (км) знаходимо коефіцієнт передачі за потужністю k_o (дБ) = α (дБ/км)· l (км).

Таблиця 2.1.5 – Типові коефіцієнти загасання (дБ/км) різних типів ОВ [2]

Тип ОВ	Матеріал серцевини/ оболонки	Довжина хвилі оптичного випромінювання, нм				
		580	850	1300	1380 (пік ОН)	1550
ОМ 8,2/125	К/К	-	1,80	0,35	0,55	0,20
БМ 50/125		-	2,80	0,80	1,00	-
БМ 200/400	К/П	-	8,0	-		
БМ 900/1000	П/П	200	-			
Примітка. К – кварц, П – полімер.						

Електроелектричний перетворювач (ЕЕП) або сигнальний процесор на рис. 2.12, з характеризується коефіцієнтом підсилення за потужністю

$$K_p = P_{e \text{ вих}}(\text{Вт})/P_{e \text{ вх}}(\text{Вт}), k_p(\text{дБ}) = 10\lg K_p,$$

де $P_{e \text{ вх}}$ і $P_{e \text{ вих}}$ – середні в часі значення потужності електричного сигналу на вході і виході відповідно. Якщо відомі рівні потужностей $p_{e \text{ вих}}$, $p_{e \text{ вх}}$, тоді $k_p(\text{дБ}) = p_{e \text{ вих}}(\text{дБм}) - p_{e \text{ вх}}(\text{дБм})$. Звичайно ЕЕП встановлюють до ЕОП або після ОЕП для підсилення електричного сигналу, тому завжди $K_p > 1$ ($k_p > 0$ дБ). Якщо він працює в режимі підсилення струмів, то коефіцієнт передачі за струмом

$$K_i = I_{\text{вих}}(\text{А})/I_{\text{вх}}(\text{А}), k_i(\text{дБ}) = 20\lg K_i,$$

де $I_{\text{вх}}$ і $I_{\text{вих}}$ – струм сигналу на вході і виході ЕЕП відповідно. Є справедливим співвідношення

$$k_p(\text{дБ}) = 2k_i(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}}),$$

тобто значення $k_p(\text{дБ})$ зростає зі збільшенням відношення $R_{\text{н}}$ до $R_{\text{д}}$.

Використовуємо отримані формули для проектування типових оптичних лінійних трактів.

2.1.2 Проектування лінійного тракту «точка-точка»

Каскад ЕОП-ООП-ОЕП є моделлю симплексного ВОЛТ «точка-точка» без ретрансляторів, рис. 2.1.3. Знайдемо його основні енергетичні параметри [10]:

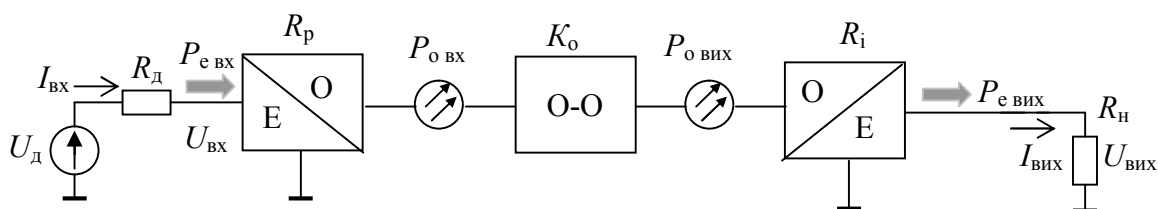


Рисунок 2.1.3 – Функціональна схема лінійного тракту

– коефіцієнт передачі за струмом

$$K_i = I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = R_p K_o R_i;$$

– коефіцієнт передачі за потужністю

$$K_{e p} = P_{e \text{ вих}}/P_{e \text{ вх}} = (I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}})^2 (R_{\text{н}}/R_{\text{д}}) = (R_p K_o R_i)^2 (R_{\text{н}}/R_{\text{д}});$$

– передавальний опір

$$R_{\text{п}} = U_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = R_p K_o R_i R_{\text{н}} = R_p K_o R_{\text{д}}, \text{ Ом.}$$

Отримані за допомогою співвідношень із табл. 2.1.1 і 2.1.3 формули розрахунку параметрів тракту ЕОП-ООП-ОЕП у відносних одиницях наведені в табл. 2.1.6.

Таблиця 2.1.6 – Співвідношення та результати розрахунку параметрів лінійного тракту

Розрахункове співвідношення		Результати розрахунку для $R_{\text{н}}/R_{\text{д}} =$	
		1	10^3
$k_i(\text{дБ}) = \rho_p(\text{дБ}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ})$		– 46 дБ	– 46 дБ
$k_{\text{ср}}(\text{дБ}) =$	$\rho_p(\text{дБ}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}})$ $k_o(\text{дБ}) + [k_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ})]/2 + 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}})$ $k_o(\text{дБ}) + [\rho_p(\text{дБ}) - u_{\text{вх}}(\text{дБ}) + \rho_u(\text{дБ}) + i_{\text{вх}}(\text{дБ})]/2$	– 46 дБ	– 16 дБ
$r_{\text{п}}(\text{дБ}) = \rho_p(\text{дБ}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + r_{\text{н}}(\text{дБ})$		– 12 дБ (0,25 Ом)	50 дБ (316 Ом)
$p_{e \text{ вих}}(\text{дБм}) = p_{e \text{ вх}}(\text{дБм}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}})$		– 39 дБм	– 9 дБм

Застосування отриманих співвідношень проілюструємо на такому прикладі.

Приклад 2.1.4. Розрахувати параметри ВОЛТ (див. схему на рис. 2.1.3) для наступних значень: $R_{\text{д}} = R_{\text{н}} = 50 \text{ Ом}$; $i_{\text{вх}} = 10^{-2} \text{ А}$, $R_p = 10^{-1} \text{ Вт/А}$, $K_o = 10^{-1}$, $R_i = 0,5 \text{ А/Вт}$. Знаходимо $P_{e \text{ вх}} = i_{\text{вх}}^2 R_{\text{д}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$ (7 дБм); $\rho_p = 20\lg 10^{-1} = -20 \text{ дБ}$; $k_o = -10 \text{ дБ}$, $P_{o \text{ вх}} = 10^{-1} \cdot 10^{-2} = 10^{-3} \text{ Вт}$ (0 дБм); $P_{o \text{ вих}} = 10^{-3} \cdot 10^{-1} = 10^{-4} \text{ Вт}$ (–10 дБм); $\rho_i = 20\lg 0,5 = -6 \text{ дБ}$. Розрахункові значення параметрів тракту ЕОП-ООП-ОЕП наведені в табл. 2.1.6 для значень $R_{\text{н}}/R_{\text{д}} = 1$ і 10^3 .

Діаграми рівнів потужності ВОЛТ для умов прикладу 2.1.4 і значень $R_{\text{н}}/R_{\text{д}} = 50 \text{ Ом}/50 \text{ Ом} = 1$ і $R_{\text{н}}/R_{\text{д}} = 50 \text{ кОм}/50 \text{ Ом} = 10^3$ наведені на рис. 2.1.4,а.

Відзначимо, що коефіцієнт передачі за струмом не залежить від значень $R_{\text{д}}$ і $R_{\text{н}}$, а коефіцієнт передачі за потужністю є пропорційним відношенню $R_{\text{н}}$ до $R_{\text{д}}$. Тому, при виборі $R_{\text{н}} \gg R_{\text{д}}$ може бути досягнутий «ефект підсилення потужності» в тракті. Наприклад, збільшення значення $R_{\text{н}}/R_{\text{д}}$ від 1 до 10^3 ($R_{\text{д}} = 50 \text{ Ом}$, $R_{\text{н}} = 50 \text{ кОм}$) дає збільшення значень: $k_{e p}$ від –46 дБ до –16 дБ (ККД з 0,005 % до 15,8 %); рівня потужності вихідного електричного сигналу від –39 дБм до –9 дБм; передаточного опору від –12 дБ до +50 дБ (від 0,25 до 316 Ом).

Резистор $R_{\text{д}}$ звичайно має стандартний номінал (50 Ом у ЦСП і 75 Ом у АСП), тому на практиці можна збільшувати лише значення $R_{\text{н}}$. Це, окрім зростання рівня потужності вихідного сигналу, забезпечує зниження середньоквадратичного значення струму теплового шуму, що створюється

опором навантаження ОЕП ($\overline{I_{\text{ш}}^2} = 4kT\Delta f/R_{\text{н}}$, А^2), де kT – добуток постійної Больцмана на абсолютну температуру, Δf – еквівалентна шумова смуга пропускання ОЕП). Таким чином, високоомне навантаження ФД дозволяє поліпшити відношення сигнал/шум на виході ОЕП, що і застосовується на

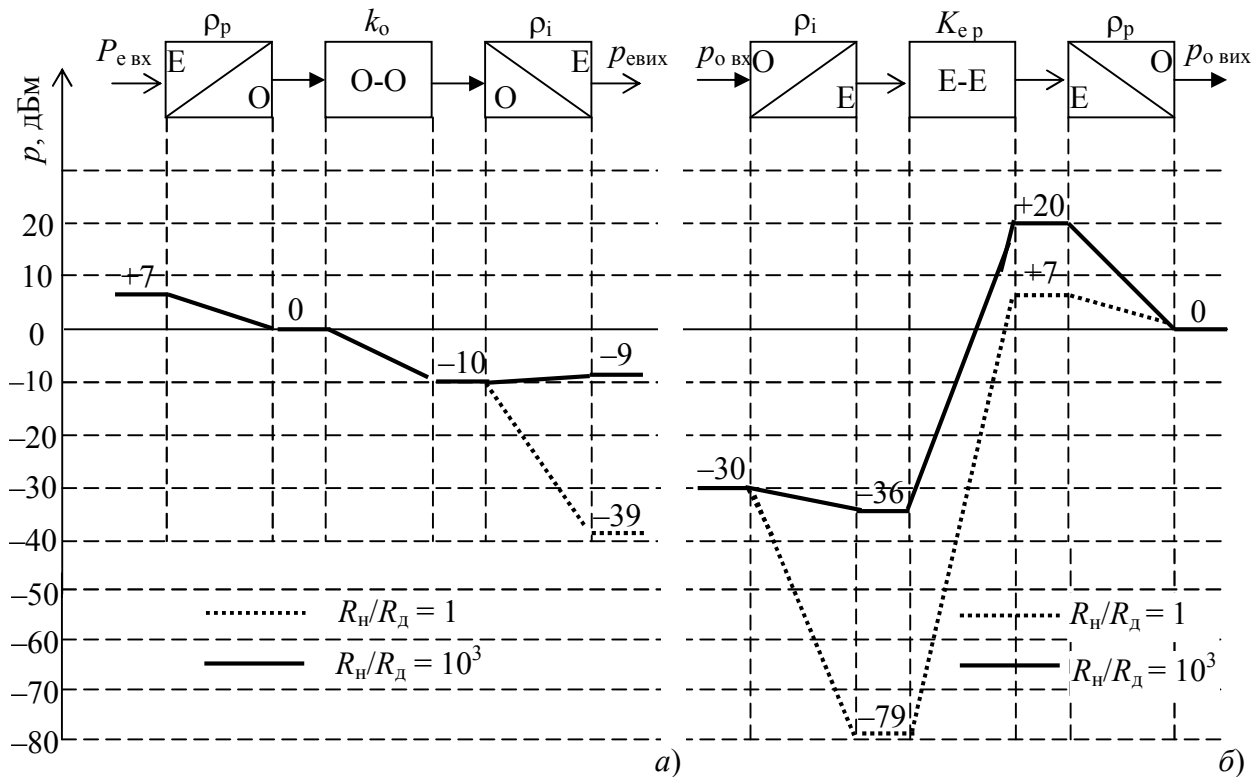


Рисунок 2.1.4 – Діаграми рівнів потужності оптичного лінійного тракту
а) «точка-точка» та б) оптоелектронного ретранслятора

практиці при побудові високоімпедансних ПрП.

2.1.3 Проектування ретранслятора О-Е-О-типу

Каскадне увімкнення ОЕП, ЕЕП і ЕОП є моделлю *оптоелектронного ретранслятора* (наприклад, проміжна підсилювальна станція О-Е-О типу

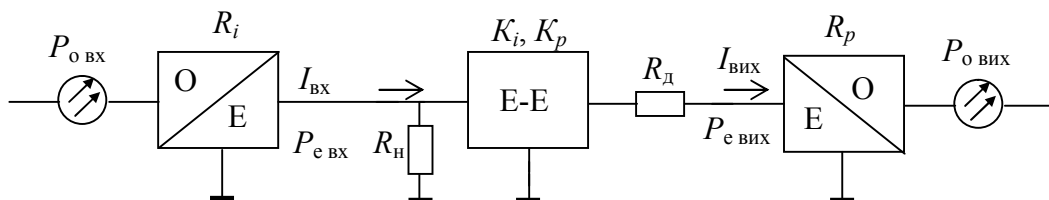


Рисунок 2.1.5 – Функціональна схема ретранслятора

аналогового ВОЛТ), рис. 2.1.5. Знайдемо його основні енергетичні параметри [9].

Коефіцієнт передачі ретранслятором оптичної потужності

$$K_o = P_{o \text{ вих}}/P_{o \text{ вх}}, k_o(\text{дБ}) = 10\lg K_o,$$

де $P_{o \text{ вих}}$ і $P_{o \text{ вх}}$ – значення оптичної потужності на виході та вході відповідно.

Енергетичний потенціал (ЕП) ретранслятора (при заданому нормами коефіцієнті помилок)

$$q_o(\text{дБ}) = p_{o \text{ вих}}(\text{дБм}) - p_{o \text{ вх}}(\text{дБм}),$$

$$q_o(\text{дБ}) = k_o(\text{дБ}) = \rho_i(\text{дБ}) + k_{e p}(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 10\lg(R_H/R_D).$$

Тут $k_{e p}(\text{дБ}) = p_{e \text{ вих}}(\text{дБм}) - p_{e \text{ вх}}(\text{дБм})$ – коефіцієнт передачі за потужністю ЕЕП. Якщо ЕП ретранслятора є заданим, наприклад, технічними умовами, то важливо розрахувати необхідні коефіцієнти підсилення ЕЕП за потужністю $k_{e p}(\text{дБ})$ або струмом $k_i(\text{дБ})$. Отримані за допомогою співвідношень з табл. 2.1.1 і 2.1.3 формули розрахунку параметрів тракту ЕОП-ЕЕП-ЕОП наведені в табл. 2.1.7. Тут також представлені розраховані значення необхідних коефіцієнтів підсилення ЕЕП за потужністю і струмом, що забезпечують енергетичний потенціал ретранслятора $q_o = 30 \text{ дБ}$. На рис. 2.1.4, б представлені діаграми рівнів потужності ретранслятора для умов наведених вище прикладів: $p_{o \text{ вх}} = -30 \text{ дБм}$, $R_H/R_D = 50 \text{ Ом}/50 \text{ Ом} = 1$ та $R_H/R_D = 50 \text{ кОм}/50 \text{ Ом} = 10^3$.

Таблиця 2.1.7 – Співвідношення та результати розрахунку параметрів ретранслятора

Розрахункове співвідношення		Результати розрахунку для $R_H/R_D =$	
		1	10^3
$k_o(\text{дБ}) \equiv$	$[\rho_i(\text{дБ}) + k_p(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 10\lg(R_H/R_D)]/2$		
$q_o(\text{дБ}) =$	$\rho_i(\text{дБ}) + 2k_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ})$	30 дБ	30 дБ
$k_{e p}(\text{дБ}) \geq$	$2q_o(\text{дБ}) - \rho_i(\text{дБ}) - \rho_p(\text{дБ}) - 10\lg(R_H/R_D)$	86 дБ	56 дБ
$k_i(\text{дБ}) \geq$	$[q_o(\text{дБ}) - \rho_i(\text{дБ}) - \rho_p(\text{дБ})]/2$	28 дБ	28 дБ

2.1.4 Проектування лінійного тракту з ретрансляторами

Розглянемо протяжний ВОЛТ з топологією «точка-точка», рис. 2.1.6. Окрім передавальної (ЕОП) і приймальної (ОЕП) станцій він складається з n ретрансляційних ділянок, розділених $n - 1$ ретрансляторами типу ОЕП-ЕЕП-ЕОП розглянутими вище. Тут K_{oi} і $K_{oeo i}$ – коефіцієнти передачі за потужністю i -го ООП (i -го відрізка ОВ) та i -го ретранслятора відповідно.

Основні параметри такого лінійного тракту є наступні [7]:

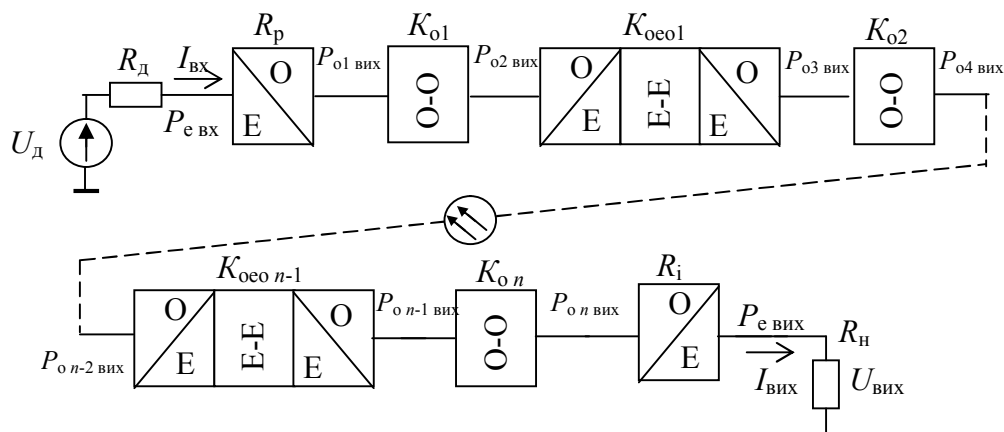


Рисунок 2.1.6 – Структурна схема лінійного тракту з $n - 1$ ретрансляторами О-Е-О типу

– коефіцієнт передачі тракту за струмом

$$K_i = I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = R_p(K_{o1} \cdot K_{o2} \cdots K_{on}) (K_{\text{оеп}1} \cdot K_{\text{оеп}2} \cdots K_{\text{оеп}n-1}) R_i,$$

де $K_{oi} = P_{oi}/P_{oi-1}$ і $K_{оеоi} = P_{\text{оеп}i}/P_{\text{оеп}i-1}$ – коефіцієнти передачі оптичної потужності i -м ООП та i -м оптоелектронним (О-Е-О) ретранслятором відповідно;

– коефіцієнт передачі трактом електричної потужності

$$K_{ep} = P_{\text{е вих}}/P_{\text{е вх}} = (I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}})^2 (R_{\text{н}}/R_{\text{д}}) = (K_i)^2 R_{\text{н}}/R_{\text{д}};$$

– передавальний опір

$$R_{\text{п}} = U_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = K_i R_{\text{н}}, \text{ Ом.}$$

Розрахункові співвідношення для ВОЛТ зі схемою на рис. 2.1.6 зведені в табл. 2.1.8. У формулах цієї таблиці перша сума враховує сумарні втрати потужності в усіх оптичних волокнах, а друга – загальне підсилення за потужністю всіма ретрансляторами. За умови точної компенсації (втрати в попередньому відрізку ОВ повністю компенсуються підсиленням в ретрансляторі) член у квадратних дужках дорівнює нулю, а розрахункові формули спрощуються (оптоелектронне коло ЕОП-ОЕП).

Таблиця 2.1.8 – Співвідношення для розрахунку параметрів тракту з $n-1$ ретрансляторами

$k_{ep}(\text{дБ}) = 2[\sum_{i=1}^n k_{oi}(\text{дБ}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{\text{оео}i}(\text{дБ})] + \rho_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}})$
$k_i(\text{дБ}) = 2[\sum_{i=1}^n k_{oi}(\text{дБ}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{\text{оео}i}(\text{дБ})] + \rho_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ})$
$r_{\text{пер}}(\text{дБ}) = 2[\sum_{i=1}^n k_{oi}(\text{дБ}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{\text{оео}i}(\text{дБ})] + \rho_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 20\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}})$

2.1.5 Розрахунок шумових параметрів лінійного тракту

Отримані вище співвідношення застосуємо для аналізу шумових параметрів ВОЛТ [7]. Шумові властивості ЕОП на основі лазерного діода (ЛД) характеризують параметром *відносна інтенсивність шуму* RIN (relative intensity noise)

$$RIN = P_{\text{ш}}^2 / E_{\text{ш}}^2 \Delta f, \text{ 1/Гц}$$

або у відносних одиницях

$$rin(\text{дБ/Гц}) = 10\lg(P_{\text{ш}}^2 / E_{\text{ш}}^2 \Delta f) = p_{\text{ош}}(\text{дБм}) - 2p_{\text{осер}}(\text{дБм}) - 10\lg f(\text{Гц}), \quad (2.1.11)$$

де $P_{\text{ош}}$ – середньоквадратичне значення потужності оптичних шумів, $P_{\text{осер}}$ – середнє в часі значення потужності випромінювання лазера, Вт; Δf – ширина смуги частот, в якій вимірюється шум. Із виразів (2.1.6) і (2.1.11) отримуємо формулу для розрахунку потужності шуму створюваного лазерним діодом у навантаженні ОЕП ($R_{\text{н}} = 50 \text{ Ом}$)

$$p_{e \text{ ш вих}} (\text{дБм}) = rin(\text{дБ}) + 2p_{o \text{ вих сер}}(\text{дБм}) + 10\lg\Delta f(\text{Гц}) + \rho_i(\text{дБ}) - 13,01 \text{ дБ}. \quad (2.1.12)$$

Процедуру розрахунку внеску шумів лазера покажемо на прикладі аналогового ВОЛТ.

Приклад 2.1.5. Нехай ВОЛТ має такі параметри компонентів: $R_d = R_n = 50 \text{ Ом}$; $i_{\text{вх}} = 10^{-2} \text{ А}$, $R_p = 10^{-1} \text{ Вт/А}$ (лазерний діод), $K_o = 10^{-1}$, $R_i = 0,5 \text{ А/Вт}$ ($p-i-n$ -фотодіод). Розрахуємо рівень потужності шумів, що створюються в навантаженні ОЕП лазером, якщо $RIN = 10^{-14}$ і $\Delta f = 1 \text{ ГГц}$ (система кабельного телебачення). Підставлення даних у формулу (2.1.12) дає

$$p_{e \text{ ш вих}} (\text{дБм}) = -140 \text{ дБ} - 2(-10 \text{ дБм}) + 10\lg 10^9 + (-6 \text{ дБ}) - 13,01 \text{ дБ} = -89,01 \text{ дБм}.$$

Якщо рівень потужності електричного сигналу в навантаженні ОЕП $p_{e \text{ вих}} = -39 \text{ дБм}$, тоді відношення сигнал/шум, обумовлене шумами тільки ЛД $всш_{\text{ЛД}}(\text{дБ}) = p_{e \text{ вих}}(\text{дБм}) - p_{e \text{ ш вих}}(\text{дБм}) = -39 \text{ дБм} - (-89,01 \text{ дБм}) = 50,01 \text{ дБ}$.

По аналогії з електричним $всш_e$, визначимо значення оптичного $всш_o$

$$всш_o(\text{дБ}) = p_{o \text{ вх, вих}}(\text{дБм}) - p_{o \text{ ш вх, вих}}(\text{дБм}) = -[rin(\text{дБ}) + 10\lg\Delta f(\text{Гц})]/2. \quad (2.1.13)$$

Підстановка даних прикладу 2.1.5 у формулу (2.1.13) дає $(всш_o) = -(-140 + 10\lg 10^9)/2 = 25 \text{ дБ}$. Якщо оптичний сигнал з таким значенням $всш_o$ подається на ОЕП, то, у відповідності до правила перерахунку, електричне ВСШ за умови ідеального (що не вносить шумів) навантаження ОЕП

$$всш_e(\text{дБ}) = 2 \cdot всш_o(\text{дБ}). \quad (2.1.14)$$

Для прикладу 2.1.5 отримуємо $всш_e = 2 \cdot 25 = 50 \text{ дБ}$. У реальному ВОЛТ необхідно враховувати тепловий шум резистора навантаження R_n і шум сигнального процесора (підсилювача), що йде за ОЕП. Потужність теплових шумів, що створюються резистором з номіналом R_n у смузі частот Δf визначається формулою Найквіста

$$P_{\text{шт}} = (4kT \cdot \Delta f / R_n) R_n = 4kT \cdot \Delta f, \text{ Вт},$$

де $k = 1,3810^{-23} \text{ Вт/К}$ – постійна Больцмана, T – абсолютна температура, К. Для $T = 300 \text{ К}$, $\Delta f = 1 \text{ ГГц}$ отримуємо $P_{\text{шт}} = 1,6610^{-11} \text{ Вт}$ ($p_{\text{шт}} = -77,8 \text{ дБм}$). Значення $всш_{e \text{ вих}} (\text{дБ}) = p_{e \text{ вих}} (\text{дБм}) - p_{\text{шт}}(\text{дБм}) = -39 - (-77,8) = 38,8 \text{ дБ}$ при $R_n = 50 \text{ Ом}$. Очевидно, що при стандартному значенні опору навантаження (50 Ом) якість сигналу на виході ВОЛТ визначають не шуми ЛД ($всш_{\text{ЛД}} = 50 \text{ дБ}$ у смузі 1 ГГц), а шуми резистора навантаження малого номіналу ($всш_{R_n} = 38,8 \text{ дБ}$). Для поліпшення ВСШ необхідно збільшувати номінал R_n і використовувати підсилювач з високим вхідним імпедансом. Якщо відоме значення коефіцієнта шуму електронного підсилювача $K_{\text{ш}} = \text{ВСШ}_{\text{вих}}/\text{ВСШ}_{\text{вх}}$, де $\text{ВСШ}_{\text{вх, вих}}$ – значення ВСШ на вході та виході підсилювача відповідно, разів. При цьому ВСШ на виході ВОЛТ за наявності підсилювача після ОЕП

$$ВСШ_{\text{е ВОЛТ}} (\text{дБ}) = \text{всш}_{\text{е ВИХ}} (\text{дБ}) - k_{\text{ш}} (\text{дБ}), \quad (2.1.15)$$

де $\text{всш}_{\text{е ВИХ}}$ – значення ВСШ без підсилювача і $k_{\text{ш}} (\text{дБ}) = 10 \lg(\text{ВСШ}_{\text{ВИХ}} / \text{ВСШ}_{\text{ВХ}})$ – коефіцієнт шуму підсилювача, дБ. Наприклад, якщо застосований підсилювач з $k_{\text{ш}} = 5$ дБ, то ВСШ на виході ВОЛТ $\text{всш}_{\text{е ВОЛТ}} = 38,8 - 5 = 33,8$ дБ. Відповідна цим розрахункам діаграма, що ілюструє зміну значення всш (дБ) на різних ділянках ВОЛТ подана на рис. 2.1.7, б.

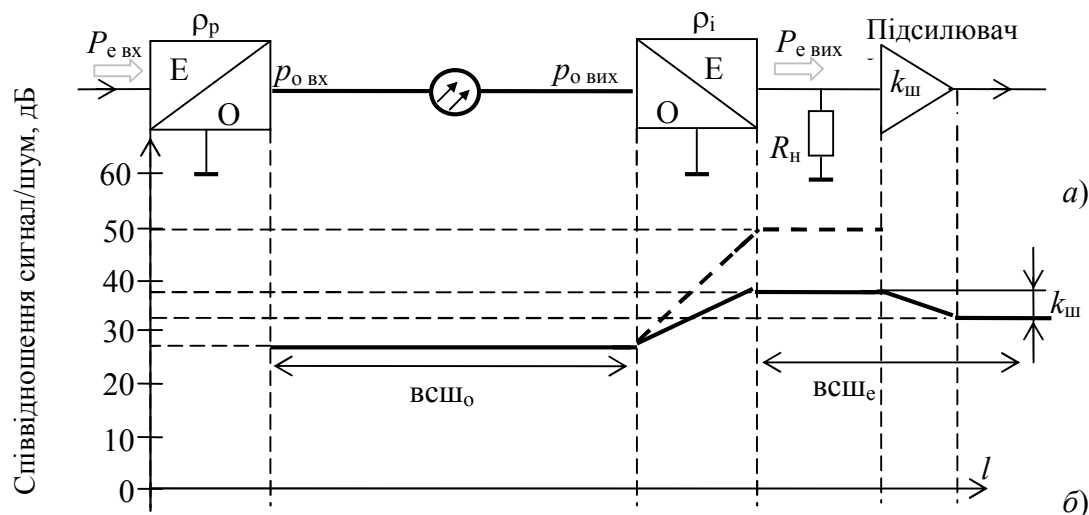


Рисунок 2.1.7 – Функціональна схема а) і діаграма залежності всш у лінійному тракті б) (пунктиром подано діаграму за умови відсутності шуму в опорі навантаження ОЕП)

Висновок. Наведений вище метод розрахунку енергетичних (сигнальних і шумових) параметрів ВОЛТ може бути застосований за умови безінерційності ЕОП та ОЕП і відсутності дисперсійних спотворень сигналу в ООП (останнє є справедливим для одномодових середньошвидкісних ВОСП). Подані приклади застосування цього методу для проектування лінійних трактів з топологією «точка-точка» і оптоелектронних ретрансляторів. Розрахункові формули можна застосувати для аналізу локальних оптичних мереж довільної топології, де дисперсія оптичного сигналу не є суттєвою.

2.2 Проектування лінійного тракту за часовими параметрами

При спрощеному проектуванні лінійного тракту ВОСП вважають, що активне обладнання є безінерційним, а спотворення форми і тривалості оптичного сигналу викликають дисперсійні процеси в оптичному волокні. Тоді максимальна дальність передавання, обмежена дисперсією, розраховується за формулою (1.8.7), виходячи з емпіричного припущення, що накопичена на ділянці регенерації дисперсія не повинна перевищувати чверті від тактового інтервалу лінійного цифрового сигналу. При такому підході не враховується такі чинники:

- інерційність (обмеженість смуги пропускання) приймального та передавального пристроїв;

- тип цифрового лінійного коду (NRZ, RZ або іншого) і, відповідно, ширина його енергетичного спектра.

У даному підрозділі наведено метод і приклади проектування лінійного тракту ВОСП з урахуванням основних чинників, що викликають лінійні спотворення сигналів, тобто інерційності приймального і передавального обладнання та дисперсії сигналу в оптичному волокні.

2.2.1 Швидкодія компонентів лінійного тракту

Як вже згадувалось, основними функціональними компонентами ВОЛТ (рис. 2.2.1) є: а) електрооптичний перетворювач (ЕОП) у вигляді джерела випромінювання (ДВ) 2; б) середовище передавання – оптичне волокно 3; в) оптоелектричний перетворювач (ОЕП) у вигляді приймача випромінювання (ПВ) 4. Передавальний пристрій (ПП) 5 складається з сигнального процесора (підсилювача) 1 і ДВ 2, а приймальний пристрій (ПрП) 6 – з ПВ 4 і сигнального процесора (підсилювача, регенератора) 1. У протяжних ВОЛТ встановлюють ретранслятори 7 О-Е-О-типу. Такий ретранслятор складається з трьох основних блоків – ОЕП 4, сигнального процесора 1 (підсилювача в аналогових, регенератора в цифрових системах) і ЕОП 2. У сучасних ВОЛТ застосовують оптичні підсилювачі (ОпП) 8. Це ретранслятори О-типу, що підсилюють оптичний сигнал без його перетворення в електричний еквівалент.

У процесі проектування ВОЛТ при розрахунку довжини ділянки регенерації необхідно враховувати інерційність передавального і приймального пристроїв та дисперсію сигналу в ОВ, оскільки ці чинники викликають міжсимвольну інтерференцію (МСІ), і разом із загасанням обмежують дальність/якість передавання (див. епюри сигналу на рис. 2.2.1, а).

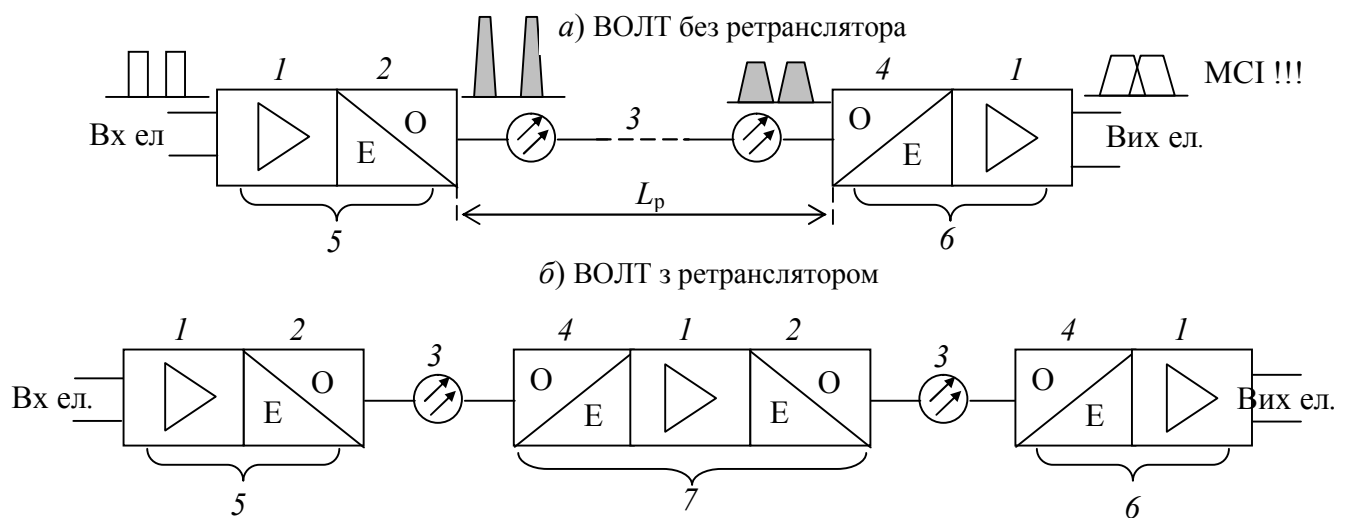


Рисунок 2.2.1 – Ілюстрація виникнення МСІ у ВОЛТ, де: 1 – електронний процесор (підсилювач), 2 – джерело випромінювання (Е/О перетворювач), 3 – оптичне волокно, 4 – приймач випромінювання (О/Е перетворювач), 5 – передавальний пристрій, 6 – приймальний пристрій, 7 – ретранслятор О-Е-О типу

В інженерній практиці інерційність активних і пасивних компонентів (і всього ВОЛТ) оцінюють (вимірюють) таким параметром, як *час наростання фронту імпульсу* (далі скорочено – час наростання) [2].

На етапі проектування параметри швидкодії компонентів підлягають вибору (розрахунку) і повинні мати такі значення, за яких забезпечується якісна робота ВОЛТ необхідної протяжності при заданій лінійній швидкості (ширині спектра лінійного сигналу).

Час наростання ЕОП $t_{н\text{ еоп}}$ – це час, протягом якого оптична потужність $P(t)$ на його виході нарастає з 10 % до 90 % від сталого значення при вхідному сигналі у вигляді сходинок струму. Принцип вимірювання часу наростання ЕОП показаний на рис. 2.2.2, а. Вхідний струм накачування $i_n(t)$ примушує оптичну потужність, яку випромінює ДВ, зростати від нуля до деякого сталого значення. Вихідний оптичний сигнал на рис. 2.2.2, а відповідає формі хвилі електричного сигналу на виході широкосмугового приймального пристрою, що використовується для вимірювання цієї потужності. Час наростання і *ширина смуги пропускання електричного сигналу* ЕОП за рівнем –3 дБ від максимуму зв'язані співвідношенням (для випадку гауссового імпульсного відгуку ЕОП)

$$f_{-3\text{дБ}} = 0,35/t_{н\text{ еоп}}. \quad (2.2.1)$$

Типові значення часу наростання ДВ і передавальних пристроїв приведені в таблицях Д.4.1 і Д.4.2 відповідно.

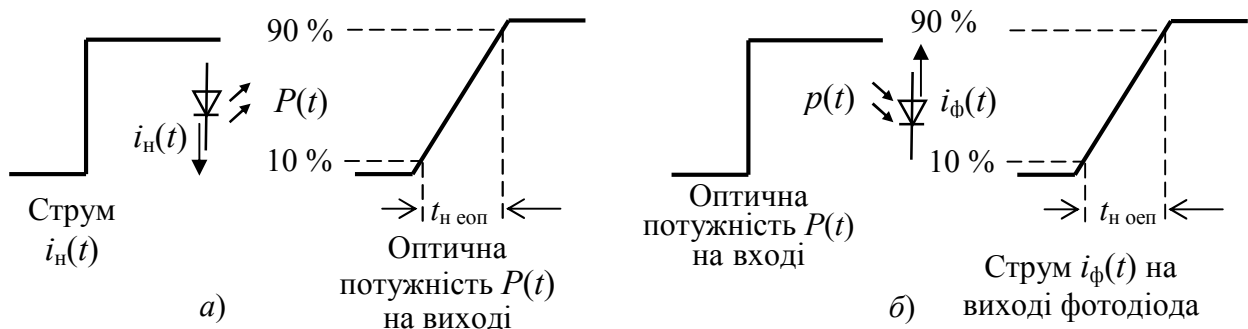


Рисунок 2.2.2 – До визначення часу наростання ЕОП а) та ОЕП б)

Час наростання ОЕП $t_{н\text{ оеп}}$ – це час, протягом якого вихідний струм фотодіода $i_\phi(t)$ нарастає з 10 % до 90 % від сталого значення при ступінчастій зміні вхідної оптичної потужності $P(t)$. Принцип вимірювання часу наростання ПВ подано на рис. 2.2.2, б. Для випадку гауссового імпульсного відгуку ширина смуги пропускання електричного сигналу і час наростання ОЕП за рівнем –3 дБ зв'язані співвідношенням

$$f_{-3\text{дБ}} = 0,35/t_{н\text{ оеп}}. \quad (2.2.2)$$

На цій частоті потужність електричного сигналу в навантаженні ОЕП дорівнює половині від значення, отриманого на дуже низьких частотах модуляції, припускаючи в обох випадках однакову середню потужність оптичного сигналу, що надходить на фотодіод.

Типові значення часу наростання ПВ і приймальних пристроїв наведені в таблицях Д.5.1 і Д.5.2 відповідно.

Інерційним (частотно-обмеженим) елементом лінійного тракту ВОСП є також середовище передавання – оптичне волокно. Нехай в ОВ довжиною L вводиться оптичний імпульс потужністю P_1 і тривалістю t_1 , рис. 2.2.3. На виході ОВ потужність сигналу $P_2 < P_1$ внаслідок загасання, а його тривалість за напіввисотою $t_2 > t_1$. Збільшення тривалості імпульсу при його розповсюдженні по ОВ у ВОСП називають *дисперсією сигналу*. Чим довшим є оптичний тракт, тим більше тривалість сигналу на його виході. При значній дисперсії в цифровому лінійному тракті виникає *міжсимвольна інтерференція* і, як результат, – помилки при регенерації сигналу. У ВОЛТ дисперсія призводить до зміни амплітуди і фази ВЧ складових в енергетичному спектрі сигналу, тобто до *лінійних спотворень*.

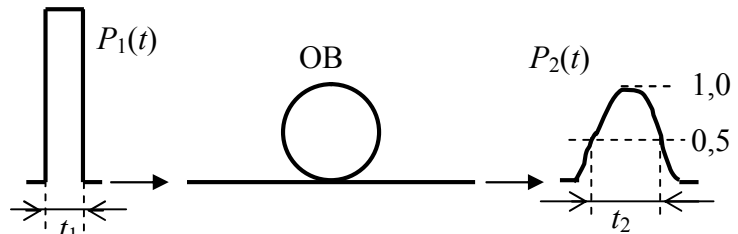


Рисунок 2.2.3 – До пояснення явища дисперсії сигналу

Таким чином, у ВОСП існує обмеження дальності/якості передавання не тільки внаслідок загасання, але і в результаті дисперсії. Тому *довжину ділянки регенерації (підсилення – в аналогових трактах)* при проектуванні ВОЛТ розраховують двічі (за загасанням і за часом наростання) і вибирають менше з набутих значень, аналогічно тому, як це було зроблено у п.1.7.

Дисперсія сигналу має розмірність часу і визначається як середньоквадратичне значення (скз) різниці тривалості імпульсів на виході t_2 і вході t_1 ОВ довжиною L

$$\sigma_{\text{скз}}(L) = \sqrt{t_2^2 - t_1^2}, \text{ с.}$$

У рекомендаціях і стандартах (таблиці Д.6 і Д.5) на робочій довжині хвилі нормуються такі параметри ОВ: а) для БМ ступінчастих (СОВ) і градієнтних (ГОВ) – *коефіцієнт широкосмуговості* K_F , МГц×км; б) для ОМ ОВ – *коефіцієнт дисперсії* σ , пс/(нм×км).

У загальному випадку в ОВ є декілька видів дисперсії (рис. 2.2.4), що викликані такими чинниками:

- *відмінністю траєкторій окремих мод – модова дисперсія* $\sigma_{\text{мод}}$;
- *немонохроматичністю* випромінювання, що розповсюджується по ОВ;
- *хроматична дисперсія* $\sigma_{\text{хр}}$. Немонохроматичність світла впливає двояко: *по-перше*, різні спектральні складові світла розповсюджуються з відмінною фазовою швидкістю, викликаючи *матеріальну дисперсію* $\sigma_{\text{мат}}$; *по-друге*, направляючі властивості ОВ залежать від довжини хвилі випромінювання реального джерела (*хвильоводна дисперсія* $\sigma_{\text{хв}}$);

- *поляризаційна модова дисперсія* $\sigma_{\text{пмд}}$ обумовлена відмінністю у швидкості розповсюдження двох взаємно ортогональних поляризаційних складових основної моди в одномодовому ОВ. Цей вид дисперсії підлягає обліку при швидкості передавання $> 2,5$ Гбіт/с.

У наведеному нижче алгоритмі розрахунку сумарна дисперсія σ (часова область) сигналу в ОВ довжиною L перераховується в три етапи: 1) в

еквівалентну ширину смуги пропускання оптичного сигналу (частотна область); 2) у відповідну ширину смуги пропускання електричного сигналу; 3) в еквівалентний час наростання (часова область). При цьому приймається, що імпульсний відгук довгого ОВ близький до гауссового.

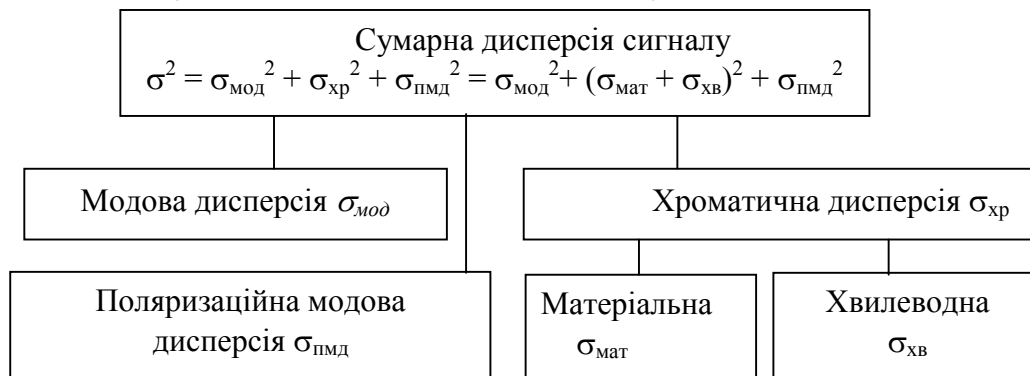


Рисунок 2.2.4 – Складові дисперсії сигналу в оптичному волокні

2.2.2 Алгоритм проектування інерційного лінійного тракту [15]

1. Розрахунок необхідної *ширини смуги пропускання електричного сигналу* за рівнем -3 дБ волоконно-оптичного лінійного тракту (ВОЛТ) цифрової системи передачі (ЦСП) з тактовою частотою $F_{NRZ, RZ, MAN}$ і аналогової системи передачі (АСП) з шириною спектра лінійного сигналу F_A виконується за наступними формулами

$$B_{\text{е сист}} (\text{МГц}) = \begin{cases} [F_{NRZ}(\text{Мбіт/с})]/2 & \text{— для ЦСП з NRZ кодом,} \\ F_{RZ}(\text{Мбіт/с}) & \text{— для ЦСП з RZ кодом,} \\ F_{MAN}(\text{Мбіт/с}) & \text{— для ЦСП з Манчестерським кодом,} \\ F_A (\text{МГц}) & \text{— для АСП.} \end{cases}$$

2. Необхідний час наростання фронту імпульсу (ЧНФІ) за рівнями 0,1...0,9 на аналоговому виході ВОЛТ (вході вирішуючого пристрою)

$$t_{\text{н сист}} (\text{нс}) = 0,35/B_{\text{е сист}} (\text{ГГц}).$$

3. ЧНФІ на виході ЕОП $t_{\text{н еоп}}(\text{нс})$ вибирається з бази параметрів ЕОП (табл. Д.4.1 і Д.4.2) залежно від необхідної швидкості передавання.

4. ЧНФІ на виході ООП (оптичного волокна в кабелі довжиною $L_{\text{ок}}(\text{км})$) $t_{\text{н ооп}}(\text{нс})$, що обумовлений хроматичною і модовою складовими дисперсіями.

4.1. ЧНФІ, що обумовлений *хроматичною дисперсією*,

$$t_{\text{н хр}}(\text{нс}) = \sigma_{\text{хр}}(\text{нс/нм}\cdot\text{км}) \cdot \Delta\lambda(\text{нм}) \cdot L_{\text{ок}}(\text{км}),$$

де $\sigma_{\text{хр}}$ – питома хроматична дисперсія ОВ (див. табл. Д.6.1, Д.6.2) на робочій довжині хвилі λ , $\Delta\lambda$ – ширина спектра випромінювання ЕОП за напіввисотою (див. табл. Д.4.2).

4.2. ЧНФІ, що обумовлений модовою дисперсією $t_{\text{н мод}}(\text{нс})$, розраховується за два етапи.

4.2.1. Оптична ширина смуги пропускання, що обумовлена модовою дисперсією (табл. Д.6.1 та Д.6.2),

$$B_{\text{мод опт}}(\text{МГц}) = \begin{cases} \frac{K_F(\text{МГц} \cdot \text{км})}{L_{\text{ок}}(\text{км})} & \text{для } L_{\text{ок}} < l_6, \\ \left\{ \sum_i \left[\frac{K_F(\text{МГц} \cdot \text{км})}{l_6(\text{км})} \right]^{-1/\gamma} \right\}^{-\gamma} & \text{для } L_{\text{ок}} \geq l_6, \end{cases}$$

де K_F – коефіцієнт широкосмуговості БМ ОВ (табл. Д.6), l_6 – будівельна довжина ОК ($l_6 = 2...7$ км), i – число будівельних довжин кабелю на лінії, γ – показник степеня ($\gamma = 0,5...0,9$) довжини, що вказується виробником ОК для кожного типу БМ ОВ.

4.2.2. Ширина смуги пропускання електричного сигналу ООП (див. Д.7.), що обумовлена модовою дисперсією

$$B_{\text{мод ел}}(\text{ГГц}) = 0,71 \cdot B_{\text{мод опт}}(\text{ГГц}).$$

4.2.3. ЧНФІ на виході ООП, обумовлений модовою дисперсією,

$$t_{\text{н мод}}(\text{нс}) = 0,35/B_{\text{мод ел}}(\text{ГГц}).$$

4.3. ЧНФІ на виході ООП

$$t_{\text{і нн}}^2(\text{нс}^2) = t_{\text{і од}}^2(\text{нс}^2) + t_{\text{і нн}}^2(\text{нс}^2) \quad t_{\text{н ооп}}(\text{нс}) = \sqrt{t_{\text{і нн}}^2(\text{нс}^2)}.$$

5. ЧНФІ на виході ОЕП $t_{\text{н оеп}}(\text{нс})$ вибирається з бази параметрів ОЕП (табл. Д.5.1 і Д.5.2) в залежності від необхідної швидкості передавання.

6. Сумарний час наростання ВОЛТ

$$t_{\text{і нн}}^2(\text{нс}^2) = t_{\text{і нн}}^2(\text{нс}^2) + t_{\text{і нн}}^2(\text{нс}^2) + t_{\text{і нн}}^2(\text{нс}^2).$$

7. Зіставляємо набуте значення $t_{\text{н сум}}(\text{нс})$ та значення необхідного часу наростання системи передачі

$$t_{\text{н сум}}(\text{нс}) \leq t_{\text{н сист}}(\text{нс}).$$

7.1. Якщо нерівність виконується, вибрані компоненти задовольняють системні вимоги за часом наростання, і розраховується запас системи передачі за часом наростання

$$t_{\text{н зап}}^2(\text{нс}^2) = t_{\text{н сист}}^2(\text{нс}^2) - t_{\text{н сум}}^2(\text{нс}^2) .$$

7.2. Якщо нерівність не виконується, то вибрані компоненти не задовольняють системні вимоги за часом наростання, і слід вибрати іншу комбінацію компонентів (ЕОП, ООП і ОЕП) з меншими значеннями часу наростання.

Примітка. За наявності запасу і випадку застосування одномодового ОВ максимально допустима довжина ділянки регенерації за часом наростання

$$L_{\text{р макс}} = \sqrt{t_{\text{н сист}}^2 - t_{\text{н еоп}}^2 - t_{\text{н оеп}}^2} / (|\sigma_{\text{хр}}| \cdot \Delta\lambda) \text{ км.}$$

Нижче наведені приклади розрахунку інерційних ВОЛТ ПЦІ, СЦІ та WDM.

2.2.3 Проектування цифрового тракту з багатомодовими ОВ

Потрібно вибрати компоненти і розрахувати чи забезпечує їх швидкодія (широкосмуговість) працездатність ВОСП ПЦІ в першому вікні прозорості з тактовою частотою $F = 10$ МГц в NRZ-кодi. Довжина ОК складає 3,2 км.

З баз даних (див. таблиці в додатках) вибираємо компоненти з параметрами, що зведені до табл. 2.2.1.

Таблиця 2.2.1 – Параметри компонентів ВОЛТ на робочій довжині хвилі 850 нм

Параметр	Значення
<i>Електро-оптичний перетворювач – світлодіод</i>	
Час наростання ЕОП (включаючи процесор)	$t_{\text{н еоп}} = 12$ нс
Ширина спектру випромінювання за напіввисотою	$\Delta\lambda = 20$ нм
<i>Опто-оптичний перетворювач – багатомодове ГОВ 50/125 (рек. G.651)</i>	
Коефіцієнт широкосмуговості	$K_F = 160$ МГц·км
Хроматична дисперсія	$\sigma_{\text{хр}} = 0,1$ нс/(нм·км)
Показник степеня довжини	$\gamma = 0,5$
Будівельна довжина ОК	$l_0 = 4,4$ км
Довжина ОК (з урахуванням запасу 1,5 %)	$L_{\text{ок}} = 3,2$ км
<i>Опто-електричний перетворювач – кремнієвий p-i-n-фотодіод</i>	
Час наростання (включаючи сигнальний процесор)	$t_{\text{н оеп}} = 20$ нс

Розв'язання

1. Ширина смуги пропускання електричного сигналу системи передачі

$$B_{\text{е сист}} = [F_{\text{NRZ}}(\text{МГц})]/2 = 10/2 = 5 \text{ МГц.}$$

2. Необхідний ЧНФІ системи передачі

$$t_{\text{н сист}} = 0,35/B_{\text{е сист}}(\text{ГГц}) = 0,35/0,005 = 70 \text{ нс.}$$

3. ЧНФІ на виході світлодіода $t_{\text{н еоп}} = 12$ нс згідно з даними табл. 2.2.1.
4. ЧНФІ на виході ООП (БМ ГОВ довжиною 3,2 км), що обумовлений внеском хроматичної і модової складових дисперсії.
 - 4.1. Хроматична дисперсія згідно з даними табл. 2.2.1

$$t_{н\ хр} = \sigma_{хр}[\text{нс}/(\text{нм}\cdot\text{км})]\cdot\Delta\lambda(\text{нм})\cdot L_{ок}(\text{км}) = 0,1 [\text{нс}/(\text{нм}\cdot\text{км})]\cdot 20\text{ нм}\cdot 3,2\text{ км} = 6,4\text{ нс}.$$

4.2. ЧНФІ, що обумовлений модовою дисперсією, розраховується у два етапи.

4.2.1. Ширина смуги пропускання оптичного сигналу, що обумовлена модовою дисперсією, для випадку $L_{ок} < l_6$

$$B_{\text{ііä}} = \frac{K_F(\text{ііä} \cdot \text{іі})}{L_{\text{іі}}(\text{іі})} = 160/3,2 = 42,6\text{ ііä}.$$

4.2.2 Ширина смуги пропускання електричного сигналу ООП, що обумовлена модовою дисперсією,

$$B_{\text{мод ел}} = 0,71 B_{\text{мод опт}} (\text{ГГц}) = 0,71 \cdot 0,0426 = 0,0302\text{ ГГц}.$$

4.2.3. Час наростання ООП, що обумовлений модовою дисперсією,

$$t_{н\ \text{мод}} = 0,35/B_{\text{мод ел}} (\text{ГГц}) = 0,35/0,0302 = 11,6\text{ нс}.$$

5. Сумарний ЧНФІ на виході ООП

$$t_{н\ \text{ооп}}^2 (\text{нс}^2) = t_{н\ \text{хр}}^2 (\text{нс}^2) + t_{н\ \text{мод}}^2 (\text{нс}^2) = 6,4^2 + 11,6^2 = 174,24\text{ нс}^2,$$

$$t_{н\ \text{ооп}} = (174,24)^{0,5} = 13,2\text{ нс}.$$

6. Час наростання ОЕП $t_{н} = 20\text{ нс}$ згідно з даними табл. 2.2.1.

7. Сумарний ЧНФІ на виході ВОЛТ

$$t_{н\ \text{сум}}^2 (\text{нс}^2) = t_{н\ \text{еоп}}^2 (\text{нс}^2) + t_{н\ \text{ооп}}^2 (\text{нс}^2) + t_{н\ \text{оеп}}^2 (\text{нс}^2) = 12^2 + 13,2^2 + 20^2 = 718,24\text{ нс}^2$$

$$t_{н\ \text{сум}} (\text{нс}) = (718,24)^{0,5} = 26,8\text{ нс}.$$

8. Набуте значення $t_{н\ \text{сум}} = 26,8\text{ нс}$ менше за необхідний час наростання системи передачі $t_{н\ \text{сист}} = 70\text{ нс}$. Висновок – вибрані нами компоненти тракту задовольняють за швидкодією системним вимогам.

8.1 Запас системи передачі за часом наростання

$$t_{н\ \text{зап}}^2 (\text{нс}^2) = t_{н\ \text{сист}}^2 (\text{нс}^2) - t_{н\ \text{сум}}^2 (\text{нс}^2) = \sqrt{70^2 - 26,8^2} = 418,1\text{ нс}^2,$$

$$t_{н\ \text{зап}} = (418,1)^{0,5} = 20,45\text{ нс}.$$

Отримані результати розрахунків зведені до табл. 2.2.2.

Таблиця 2.2.2 – Розраховані значення $t_{н}(\text{нс})$

Параметр	Символ	Значення параметра
Системна вимога	$t_{н\ \text{сист}}$	70,0
Час наростання ЕОП (світлодіод)	$t_{н\ \text{еоп}}$	12,0
Час наростання ООП внаслідок:		
хроматичної дисперсії	$t_{н\ \text{хр}}$	6,4
модової дисперсії	$t_{н\ \text{мод}}$	11,6
сумарної дисперсії	$t_{н\ \text{ооп}}$	13,2
Час наростання ОЕП	$t_{н\ \text{оеп}}$	20,0
Час наростання ВОЛТ	$t_{н\ \text{сум}}$	26,8 < 70,0
Системний запас	$t_{н\ \text{зап}}$	20,45

Висновок. Вибрані компоненти ВОЛТ задовольняють системним вимогам зі значним запасом за часом наростання. Можна вибрати менш швидкодіючі компоненти і зменшити вартість обладнання ВОСП.

2.2.4 Проектування аналогового тракту з багатомодовими ОВ

Потрібно вибрати компоненти і розрахувати, чи забезпечують вони необхідну ширину смуги пропускання аналогової ВОСП (система відео спостереження), що працює в першому вікні прозорості. Ширина спектру відеосигналу $F = 10$ МГц. Використовується аналогова модуляція інтенсивності світла. Довжина ОК складає 4,4 км.

З баз даних (див. додатки Д.4...Д.6) вибираємо компоненти з параметрами, що зведені до табл. 2.2.3.

Таблиця 2.2.3 – Параметри компонентів ВОЛТ на робочій довжині хвилі 850 нм

Параметр	Значення
<i>Електрооптичний перетворювач – світлодіод</i>	
Час наростання ЕОП (включаючи процесор)	$t_{н\text{ еоп}} = 5$ нс
Ширина спектру випромінювання за напіввисотою	$\Delta\lambda = 20$ нм
<i>Оптооптичний перетворювач – багатомодове ГОВ 50/125 (рек. G.651)</i>	
Коефіцієнт широкосмуговості	$K_F = 200$ МГц·км
Хроматична дисперсія	$\sigma_{xp} = 0,1$ нс/(нм·км)
Показник ступеня довжини	$\gamma = 0,9$
Будівельна довжина ОК	$l_0 = 2,2$ км
Довжина ОК (з урахуванням запасу 1,5 %)	$L_{ок} = 4,4$ км
<i>Оптоелектричний перетворювач – кремнієвий p-i-n-фотодіод</i>	
Час наростання (включаючи процесор)	$t_{н\text{ оеп}} = 8$ нс

Розв'язання

2. Ширина смуги пропускання електричного сигналу системи передачі

$$B_{е\text{ сист}} = F_{\text{аналог}}(\text{МГц}) = 10 \text{ МГц.}$$

2. ЧНФІ на виході системи передачі

$$t_{н\text{ сист}} = 0,35/B_{е\text{ сист}}(\text{ГГц}) = 0,35/0,01 = 35 \text{ нс.}$$

3. ЧНФІ на виході світлодіода $t_{н\text{ еоп}} = 12$ нс згідно з даними табл. 2.2.3.

4. ЧНФІ на виході ООП $t_{н\text{ ооп}}(\text{нс})$ (оптичного волокна в кабелі довжиною 4,4 км), що обумовлений хроматичною і модовою складовими дисперсії.

4.1. Хроматична дисперсія згідно з даними табл. 2.2.3

$$t_{н\text{ xp}} = \sigma_{xp}[\text{нс}/(\text{нм}\cdot\text{км})]\cdot\Delta\lambda(\text{нм})\cdot L_{ок}(\text{км}) = 0,1 [\text{нс}/(\text{нм}\cdot\text{км})]\cdot 20 \text{ нм}\cdot 4,4 \text{ км} = 8,8 \text{ нс.}$$

4.2. ЧНФІ, що обумовлений модовою дисперсією, розраховується в два етапи.

4.2.1. Ширина смуги пропускання оптичного сигналу, що обумовлена модовою дисперсією для випадку $L_{ок} > l_0$,

$$B_{\text{мод опт}} = \left\{ \sum_i \left[\frac{K_F (\text{МГц} \cdot \text{км})}{l_c (\text{км})} \right]^{-1/\gamma} \right\}^{-\gamma} = \left[(200/2,2)^{-1/0,9} + (200/2,2)^{-1/0,9} \right]^{-0,9} = 48,7 \text{ МГц}.$$

4.2.2 Ширина смуги пропускання електричного сигналу ООП, що обумовлена модовою дисперсією,

$$B_{\text{мод ел}} = 0,71 B_{\text{мод опт}} (\text{ГГц}) = 0,71 \cdot 0,0487 = 0,0346 \text{ ГГц}.$$

4.2.3. Час наростання ООП, що обумовлений модовою дисперсією,

$$t_{\text{н мод}} = 0,35/B_{\text{мод ел}} (\text{ГГц}) = 0,35/0,0346 = 10,1 \text{ нс}.$$

5. Сумарний час наростання ООП

$$t_{\text{н ооп}}^2 (\text{нс}^2) = t_{\text{н хр}}^2 (\text{нс}^2) + t_{\text{н мод}}^2 (\text{нс}^2) = 8,8^2 + 10,1^2 = 179,56 \text{ нс}^2,$$

$$t_{\text{н ооп}} = (179,56)^{0,5} = 13,4 \text{ нс}.$$

6. Час наростання ОЕП $t_{\text{н оеп}} = 8 \text{ нс}$ згідно даних табл. 2.2.3.

7. Сумарний ЧНФІ на виході ВОЛТ

$$t_{\text{н сум}}^2 (\text{нс}^2) = t_{\text{н оеп}}^2 (\text{нс}^2) + t_{\text{н ооп}}^2 (\text{нс}^2) + t_{\text{н оеп}}^2 (\text{нс}^2) = 5^2 + 13,4^2 + 8^2 = 268,56 \text{ нс}^2,$$

$$t_{\text{н сум}} = (268,56)^{0,5} = 16,4 \text{ нс}.$$

8. Зіставляючи отримане значення $t_{\text{н сум}} = 16,4 \text{ нс}$ зі значенням необхідного часу наростання системи передачі $t_{\text{н сист}} = 35 \text{ нс}$, робимо висновок, що вибрані компоненти задовольняють системним вимогам по швидкодії.

8.1. Запас системи передачі за часом наростання

$$t_{\text{і зап}}^2 (\text{нс}^2) = t_{\text{і сист}}^2 (\text{нс}^2) - t_{\text{і сум}}^2 (\text{нс}^2) = 956,44 \text{ нс}^2;$$

$$t_{\text{н зап}} = (956,44)^{0,5} = 30,9 \text{ нс}.$$

Результати розрахунків зведені до табл. 2.2.4.

Таблиця 2.2.4 – Розраховані значення $t_{\text{н}}(\text{нс})$

Параметр	Символ	Значення параметра
Системна вимога	$t_{\text{н сист}}$	35,0
Час наростання ЕОП (світлодіод)	$t_{\text{н еоп}}$	5,0
Час наростання ООП внаслідок:		
хроматичної дисперсії	$t_{\text{н хр}}$	8,8
модової дисперсії	$t_{\text{н мод}}$	10,1
сумарної дисперсії	$t_{\text{н ооп}}$	13,4
Час наростання ОЕП	$t_{\text{н оеп}}$	8,0
Час наростання ВОЛТ	$t_{\text{н сум}}$	16,4 < 35,0
Системний запас	$t_{\text{н зап}}$	30,9

Висновок. Вибрані компоненти ВОЛТ задовольняють системним вимогам зі значним запасом за часом наростання. Можна вибрати менш швидкодіючі компоненти і зменшити вартість обладнання ВОСП.

2.2.5 Проектування цифрового тракту рівня STM-1 з одномодовими ОВ

Потрібно вибрати компоненти синхронного ВОЛТ і розрахувати чи забезпечує їх швидкодія працездатність системи передачі, що працює в другому вікні прозорості з тактовою частотою $F = 155,52$ МГц в NRZ-кодi. Довжина ОК складає 50 км.

З баз даних (див. таблиці у додатках Д.4...Д.6) вибираємо компоненти з параметрами, що зведені до табл. 2.2.5.

Таблиця 2.2.5 – Параметри компонентів ВОЛТ рівня STM-1 на $\lambda = 1310$ нм

Параметр	Значення
<i>Електрооптичний перетворювач – світлодіод</i>	
Час наростання ЕОП (включаючи процесор)	$t_{н\text{ еоп}} = 2$ нс
Ширина спектра випромінювання за напіввисотою	$\Delta\lambda = 20$ нм
<i>Оптооптичний перетворювач – стандартне одномодове ОВ (рек. G.652)</i>	
Матеріальна дисперсія	$\sigma_{\text{мат}} = -0,006$ нс/(нм·км)
Хвильоводна дисперсія	$\sigma_{\text{хв}} = 0,005$ нс/(нм·км)
Довжина ОК (з урахуванням запасу 1,5 %)	$L_{\text{ок}} = 50$ км
<i>Оптоелектричний перетворювач – германієвий p-i-n-фотодіод</i>	
Час наростання (включаючи сигнальний процесор)	$t_{н\text{ оеп}} = 1$ нс

Розв'язання

1. Ширина смуги пропускання електричного сигналу для системи передачі

$$B_{\text{е сист}} = [F_{\text{NRZ}}(\text{МГц})]/2 = 155,52/2 = 77,76 \text{ МГц.}$$

2. ЧНФІ на виході системи передачі

$$t_{н\text{ сист}} = 0,35/B_{\text{е сист}}(\text{ГГц}) = 0,35/0,07776 = 4,5 \text{ нс.}$$

3. ЧНФІ на виході ЕОП $t_{н\text{ еоп}} = 2$ нс згідно з даними табл. 2.2.5.

4. Час наростання на виході ОМ ОВ завдовжки 50 км, що обумовлений внеском матеріальної і хвильоводної складових хроматичної дисперсії.

4.1. Хроматична дисперсія згідно з даними табл. 2.2.5

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{хр}} &= \sigma_{\text{мат}}[\text{нс}/(\text{нм}\cdot\text{км})] + \sigma_{\text{хв}}[\text{нс}/(\text{нм}\cdot\text{км})] = \\ &= -0,006 \text{ нс}/(\text{нм}\cdot\text{км}) + 0,005 \text{ нс}/(\text{нм}\cdot\text{км}) = -0,001 \text{ нс}/(\text{нм}\cdot\text{км}). \end{aligned}$$

4.2. Час наростання ООП, що обумовлений хроматичною дисперсією

$$\begin{aligned} t_{н\text{ ооп}} &= t_{н\text{ хр}} = |\sigma_{\text{хр}}[\text{нс}/(\text{нм}\cdot\text{км})]| \cdot \Delta\lambda(\text{нм}) \cdot L_{\text{ок}}(\text{км}) = \\ &= |-0,001 [\text{нс}/(\text{нм}\cdot\text{км})]| \cdot 20 \text{ нм} \cdot 50 \text{ км} = 1,0 \text{ нс.} \end{aligned}$$

5. Час наростання ОЕП $t_{н\text{ оеп}} = 1$ нс згідно з даними табл. 2.2.5.

6. Сумарний час наростання ВОЛТ

$$\begin{aligned} t_{н\text{ сум}}^2(\text{нс}^2) &= t_{н\text{ еоп}}^2(\text{нс}^2) + t_{н\text{ ооп}}^2(\text{нс}^2) + t_{н\text{ оеп}}^2(\text{нс}^2) = 2^2 + 1^2 + 1^2 = 6 \text{ нс}^2; \\ t_{н\text{ сум}} &= (6)^{0,5} = 2,45 \text{ нс.} \end{aligned}$$

7. Зіставляючи отримане значення $t_{н\text{ сум}} = 2,45$ нс зі значенням необхідного часу наростання системи передачі $t_{н\text{ сист}} = 4,5$ нс, робимо висновок, що вибрані компоненти задовольняють системним вимогам по швидкодії.

7.1. Запас системи передачі за часом наростання

$$t_{i \text{ çàì}}^2 (\text{íñ}^2) = t_{i \text{ ñèñò}}^2 (\text{íñ}^2) - t_{i \text{ ñòì}}^2 (\text{íñ}^2) = 4,5^2 - 2,45^2 = 14,25 \text{ íñ}^2;$$

$$t_{\text{н зап}} = (14,25)^{0,5} = 3,775 \text{ нс.}$$

8. Максимально допустима довжина ділянки регенерації ВОСП за часом наростання

$$L_{\text{р іаєñ}} = \sqrt{t_{i \text{ ñèñò}}^2 - t_{i \text{ еї}}^2 - t_{i \text{ іеї}}^2} / (\sigma_{\text{од}} \cdot \Delta\lambda) = \sqrt{4,5^2 - 2^2 - 1^2} / (|-0,001| \cdot 20) = 195,3 \text{ êì}$$

перевищує потрібну з умов завдання у декілька разів.

Результати розрахунків зведені до табл. 2.2.6.

Таблиця 2.2.6 – Розраховані значення параметрів ВОЛТ

Параметр	Символ	Значення параметра
Системна вимога	$t_{\text{н сист}}$	4,5 нс
Час наростання ЕОП (СЛД)	$t_{\text{н еоп}}$	2,0 нс
Час наростання ООП (ОМ ОВ, рек. G.652)	$t_{\text{н ооп}}$	1,0 нс
Час наростання ОЕП (<i>p-i-n</i> -фотодіод)	$t_{\text{н оеп}}$	1,0 нс
Час наростання ВОЛТ	$t_{\text{н сум}}$	2,45 нс < 4,5 нс
Системний запас	$t_{\text{н зап}}$	3,775 нс
Максимально допустима довжина ділянки регенерації за часом наростання	$L_{\text{р макс}}$	195,3 км

Висновок. Вибрані компоненти ВОЛТ задовольняють системним вимогам – є запас за часом наростання. Можна вибрати менш швидкодіючі компоненти і знизити вартість обладнання ВОСП. Підкреслимо, що в даному прикладі застосовано відносно не дорогий світлодіод, а не лазер.

2.2.6 Проектування WDM тракту рівня STM-16

Потрібно спроектувати WDM лінійний тракт довжиною 100 км зі структурною схемою на рис. 2.2.5. По ньому необхідно передавати 8 спектральних каналів кожен зі швидкістю передавання 2,488 Гбіт/с (STM-16). Передбачається використовувати частотний план ITU-T з міжканальними інтервалами 200 ГГц, що дозволяє зменшити нелінійні спотворення і міжканальні переходи. Нижче наведені приклади розрахунку «бюджету потужності» і «бюджету часу наростання» ВОЛТ [14].

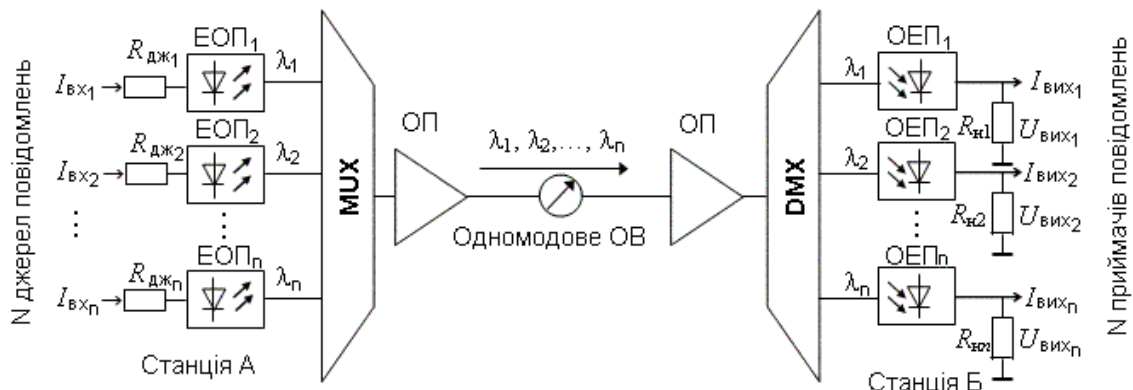


Рисунок 2.2.5 – Структурна схема оптичного тракту з WDM

2.2.6.1 Розрахунок бюджету потужності

Щоб забезпечити необхідну дальність передавання необхідно працювати в третьому вікні прозорості (1550 нм) і встановити на передавальній (або приймальній) стороні оптичний підсилювач (ОпП) з коефіцієнтом посилення за потужністю 17 дБ. Одномодове ОВ на $\lambda = 1550$ нм має коефіцієнт загасання 0,25 дБ/км (включаючи втрати на зварювання при з'єднанні будівельних довжин кабелю). Необхідний за дисперсією тип одномодового ОВ визначимо нижче в ході розрахунку бюджету часу наростання ВОЛТ.

Згідно з рек. G.671 втрати, що вносяться WDM-мультиплексором (демультиплексором) $A_{\text{mux}} = A_{\text{demux}} = 1,51 \log_2 n$, де n – число вхідних портів мультиплексора або вихідних портів демультиплексора. Для $n = 8$ отримуємо $A_{\text{mux}} = A_{\text{demux}} = 4,5$ дБ. Прийемо втрати потужності в оптичному фільтрі $A_{\text{ф}} = 1,5$ дБ. Втрати, що вносяться 8-канальним обладнанням WDM $A_{\text{WDM}} = A_{\text{mux}} + A_{\text{demux}} + A_{\text{ф}} = 4,5 + 4,5 + 1,5 = 10,5$ дБ. Розрахунок бюджету потужності ВОЛТ наведено в табл. 2.2.7. Висновок – енергетичні параметри компонентів забезпечують (є додатковий запас 1,1 дБ) передачу на відстань 100 км.

Таблиця 2.2.7 – Розрахунок бюджету потужності ВОЛТ з WDM

Параметр	Значення	Примітка
Рівень потужності джерела випромінювання	0 дБм	Одномодовий ЛД (згідно з рек. G.957)
Рівень чутливості приймального пристрою для $\text{BER} = 10^{-10}$	-45 дБм	ПрП з $p-i-n$ -діодом і ОпП на вході (-28 дБм – 17 дБ = -45 дБм)
<i>Бюджет потужності апаратури</i>	45 дБ	0 дБм – (-45 дБм) = 45 дБ
<i>Втрати в лінії передавання:</i> Втрати у волокні і в нероз'ємних з'єднувачах будівельних довжин ОК	25,4 дБ	100 км $\times$ 1,015 $\times$ 0,25 дБ/км = 25,4 дБ (враховуючи 1,5 % запасу на довжину ОК)
Втрати в рознімних з'єднувачах ¹⁾	3,0 дБ	0,5 дБ $\times$ 6 = 3,0 дБ
Втрати у WDM-обладнанні	10,5 дБ	4,5 дБ + 4,5 дБ + 1,5 дБ = 10,5 дБ
Експлуатаційний запас за потужністю	4,8 дБ	Згідно з рек. G.957
Загальне загасання ВОЛТ (включаючи експлуатаційний запас)	43,7 дБ	25,4 + 3,0 + 10,5 + 4,8 = 43,7 дБ
Надлишковий запас за потужністю	1,1 дБ	45 – 43,7 = 1,3 дБ

¹⁾ Рознімні оптичні з'єднувачі (6 шт.) знаходяться на: 1) виході ЛД; 2) вході WDM-мультиплексора; 3) виході WDM-мультиплексора; 4) вході волокна у WDM-демультиплексор; 5) виході WDM-демультиплексора; 6) виході оптичного фільтра (вході ОпП, який інтегрований з приймальним пристроєм).

2.2.6.2 Розрахунок бюджету часу наростання

Для проектного в третьому вікні прозорості лінійного тракту з WDM довжиною 100 км потрібно вибрати компоненти і розрахувати, чи забезпечує їх швидкодія працездатність системи. Всі спектральні канали рівня STM-16 працюють з тактовою частотою $F = 2488$ МГц в NRZ-кодi.

Будь-який спектральний канал WDM тракту може розглядатися як індивідуальна ВОСП, що використовує загальне середовище розповсюдження.

Тому вищенаведений алгоритм розрахунку однохвильових ВОСП є придатним і для багатохвильових.

З баз даних (табл. Д.4...Д.6) вибираємо компоненти з параметрами, зведеними до табл. 2.2.8.

Таблиця 2.2.8 – Параметри компонентів ВОЛТ рівня STM-16 на $\lambda = 1550$ нм

Параметр	Значення
<i>Електро-оптичний перетворювач</i> – лазерний діод з резонатором Фабрі-Перро	
Час наростання ЕОП (включаючи процесор)	$t_{\text{н оеп}} = 0,1$ нс
Ширина спектра випромінювання за напіввисотою	$\Delta\lambda_{0,5} = 1$ нм
<i>Опто-оптичний перетворювач</i> – стандартне одномодове ОВ (рек. G.652)	
Матеріальна дисперсія	$\sigma_{\text{мат}}(1550 \text{ нм}) = -0,022$ нс/(нм·км)
Хвильоводна дисперсія	$\sigma_{\text{хв}}(1550 \text{ нм}) = 0,002$ нс/(нм·км)
Довжина ОК (з урахуванням запасу 1,5 %)	$L_{\text{ок}} = 101,5$ км
<i>Опто-електричний перетворювач</i> – германієвий <i>p-i-n</i> -фотодіод	
Ширина смуги пропускання за рівнем –3 дБ (включаючи процесор)	$\Delta f_{\text{оеп}} = 10$ ГГц
<i>Примітка.</i> На вході ОЕП встановлено оптичний попередній підсилювач	Посилення за потужністю 17 дБ

1. Ширина смуги пропускання електричного сигналу для будь-якого спектрального каналу ВОЛТ

$$B_{\text{е сист}} = [F_{\text{NRZ}}(\text{МГц})]/2 = 2488/2 = 1244 \text{ МГц.}$$

2. ЧНФІ на виході системи передачі

$$t_{\text{н сист}} = 0,35/B_{\text{е сист}}(\text{ГГц}) = 0,35/1,244 = 0,281 \text{ нс.}$$

3. ЧНФІ на виході ЕОП $t_{\text{н оеп}} = 0,1$ нс згідно з даними табл. 2.2.8.

4. Час наростання на виході ОМ ОВ завдовжки 101,5 км, що обумовлений внеском матеріальної та хвильоводної складовими хроматичної дисперсії.

- 4.1. Хроматична дисперсія згідно з даними табл. 2.2.8

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{хр}} &= \sigma_{\text{мат}}[(\text{нс/нм}\cdot\text{км})] + \sigma_{\text{хв}}[(\text{нс/нм}\cdot\text{км})] = \\ &= -0,022 [\text{нс/нм}\cdot\text{км}] + 0,002 [\text{нс/нм}\cdot\text{км}] = -0,02 \text{ нс/нм}\cdot\text{км}. \end{aligned}$$

- 4.2. Час наростання ООП1, обумовлений хроматичною дисперсією

$$\begin{aligned} t_{\text{н ооп 1}} &= |\sigma_{\text{хр}}[\text{нс/нм}\cdot\text{км}]| \Delta\lambda(\text{нм}) \cdot L_{\text{ок}}(\text{км}) = \\ &= |-0,02 [\text{нс/нм}\cdot\text{км}]| 1 \text{ нм} \cdot 101,5 \text{ км} = 2,1 \text{ нс.} \end{aligned}$$

5. Час наростання ОЕП при використанні даних табл. 2.2.8 за формулою

$$t_{\text{н оеп}} = 0,35/f_{\text{оеп}} = 0,35/10^9 = 35 \text{ пс} = 0,035 \text{ нс.}$$

6. Сумарний час наростання ВОЛТ

$$\begin{aligned} t_{\text{н сум}}^2 (\text{нс}^2) &= t_{\text{н оеп}}^2 (\text{нс}^2) + t_{\text{н ооп1}}^2 (\text{нс}^2) + t_{\text{н оеп}}^2 (\text{нс}^2) = \\ &= 0,1^2 + 2,1^2 + 0,035^2 = 4,42 \text{ нс}^2, \\ t_{\text{н сум1}} &= (4,2)^{0,5} = 2,1 \text{ нс}. \end{aligned}$$

7. Зіставляючи отримане значення $t_{\text{н сум}} = 2,1 \text{ нс}$ зі значенням часу наростання системи передачі $t_{\text{н сист}} = 0,281 \text{ нс}$, робимо висновок, що вибрані компоненти не задовольняють системним вимогам за швидкодією.

Що можна зробити в такій ситуації? Очевидно, що більший внесок до часу наростання ВОЛТ дає волокно завдовжки 101,5 км ($t_{\text{н ооп1}} = 2,1 \text{ нс}$). Крім тривіального зменшення довжини тракту ($L_{\text{ок}} < 101,5 \text{ км}$), розглянемо такі варіанти: А) застосування ОВ з меншим коефіцієнтом хроматичної дисперсії; Б) використання лазерного діода з меншою шириною спектра $\Delta\lambda_{0,5}$; Г) застосування компенсатора хроматичній дисперсії.

Крок А. Виберемо інший тип волокна, наприклад, ОВ рек. G.653, з хроматичною дисперсією 3,5 пс/(нм·км) в області 1550 нм (див. додаток Д. 6). Для цього типу ОВ

$$\begin{aligned} t_{\text{н ооп2}} &= 3,5 \times 1 \times 101,5 = 355 \text{ пс} = 0,355 \text{ нс}; \\ t_{\text{н сум2}} &= (0,1^2 + 0,355^2 + 0,035^2)^{1/2} = 0,37 \text{ нс}. \end{aligned}$$

Набуте значення $t_{\text{сум2}} = 0,37 \text{ нс} > 0,281 \text{ нс}$, тобто системна вимога не виконується – тракт як і раніше не є працездатним.

Крок Б. Виберемо лазерний діод з розподіленням зворотним зв'язком (РЗЗ) з $\Delta\lambda = 0,2 \text{ нм}$ (табл. Д.4.2). Повторюючи розрахунок для другого типу ОВ (рек. G.653), отримуємо

$$\begin{aligned} t_{\text{н ооп3}} &= 3,5 \times 0,2 \times 101,5 = 71,05 \text{ пс} = 0,07105 \text{ нс}; \\ t_{\text{н сум3}} &= (0,1^2 + 0,07105^2 + 0,035^2)^{1/2} = 0,128 \text{ нс}. \end{aligned}$$

Перевірка $t_{\text{н сум3}} = 0,128 \text{ нс} < 0,281 \text{ нс}$. Нерівність виконується, тобто вибрані компоненти забезпечують необхідну швидкодію.

8. Запас ВОЛТ за часом наростання для цього випадку

$$\begin{aligned} t_{\text{і çàñ}}^2 (\text{íñ}^2) &= t_{\text{і ñèñò}}^2 (\text{íñ}^2) - t_{\text{і ñóì3}}^2 (\text{íñ}^2) = 0,281^2 - 0,128^2 = 0,063 \text{ íñ}; \\ t_{\text{н зап}} &= (0,063)^{0,5} = 0,25 \text{ нс}. \end{aligned}$$

9. Максимальна довжина ділянки регенерації за часом наростання для другого типу ОВ (рек. G.653) і ЛД з РЗЗ

$$L_{\text{р іàèñ}} = \sqrt{t_{\text{і ñèñò}}^2 - t_{\text{і еñ}}^2 - t_{\text{і іеї}}^2} / (\sigma_{\text{дд}} \cdot \Delta\lambda) = \sqrt{0,281^2 - 0,1^2 - 0,035^2} / (|-0,0035| \cdot 0,2) = 371,8 \text{ м}.$$

Крок В. Застосування в лінійному тракті компенсатора дисперсії (разом з ОП, що компенсує загасання в компенсаторі) є альтернативним, проте, найбільш дорогим з розглянутих нами рішень.

Результати розрахунків бюджету часу наростання ВОЛТ наведені в табл. 2.2.9.

Висновок. Вибрані на кроці Б компоненти ВОЛТ задовольняють системним вимогам за часом наростання із запасом 0,25 нс. Максимально допустима довжина ділянки регенерації за часом наростання складає 371,8 км.

Застереження. Реальний тракт складається з послідовно з'єднаних будівельних довжин кабелю (звичайно $l_6 \approx 4$ км.). Дисперсійні параметри індивідуальних будівельних довжин ОК можуть відрізнятися «від барабана до барабана», так, що теоретичні розрахунки не завжди адекватно відображають фактичні параметри довгої лінії. Це може призвести до того, що «працездатний на папері» оптичний тракт може виявитися непрацездатним на практиці.

Таблиця 2.2.9 – Результати розрахунку бюджету ВОЛТ за часом наростання

Компоненти, параметри	Позначення	Значення
Системна вимога на ЧНФІ	$t_{\text{н сист}}$	0,281 нс
ЕОП – ЛД	$t_{\text{еоп}}$	0,1 нс
ООП ($L_{\text{ок}} = 101,5$ км):		
– ОМ ОВ G.652, $\Delta\lambda = 1$ нм (ЛД Фабрі-Перро)	$t_{\text{н ооп 1}}$	2,1 нс
– ОМ ОВ G.653, $\Delta\lambda = 1$ нм (ЛД Фабрі-Перро)	$t_{\text{н ооп 2}}$	0,355 нс
– ОМ ОВ G.653, $\Delta\lambda = 0,2$ нм (ЛД з РЗЗ)	$t_{\text{н ооп 3}}$	0,071 нс
ОЕП ¹⁾ з $\Delta f_{\text{оеп}} = 10$ ГГц	$t_{\text{н оеп}}$	0,035 нс
Час наростання ВОЛТ	$t_{\text{сум 1}}$ $t_{\text{сум 2}}$ $t_{\text{сум 3}}$	2,1 нс ($\Delta\lambda = 1$ нм) 0,37 нс ($\Delta\lambda = 1$ нм) 0,128 нс ($\Delta\lambda = 0,2$ нм)
Системний запас (для ОВ рек. G.653)	$t_{\text{зап}}$	0,25 нс ($\Delta\lambda = 0,2$ нм)
Максимально допустима довжина ділянки регенерації за часом наростання	$L_{\text{р макс}}$	371,8 км (для ОВ рек. G.653, $\Delta\lambda = 0,2$ нм)
<i>Примітка.</i> ¹⁾ Наявність ОпП в тракті не впливає на його швидкодiю.		

На рис. 2.2.6 подана графічна інтерпретація «бюджету часу наростання» лінійного тракту.

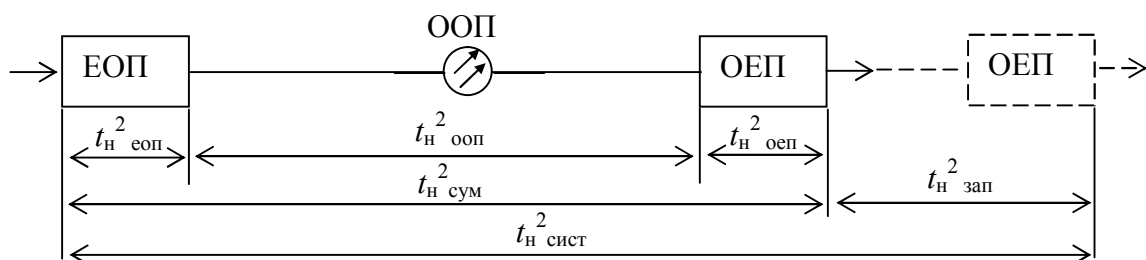


Рисунок 2.2.6 – Графічне подання «бюджету часу наростання» ВОЛТ.

Якщо $t_{\text{н сум}} \leq t_{\text{н сист}}$, тобто $t_{\text{н зап}} \geq 0$, – система передачі є працездатною

ВИСНОВКИ

В процесі дипломного проектування волоконно-оптичної мережі вирішуються наступні задачі: вибір траси прокладання та типу оптичного кабелю, станційного та лінійного обладнання, розраховується довжина регенераційної (підсилювальної) ділянки, розробляються схеми організації зв'язку, захисту на випадок аварії, синхронізації мережі та інші.

При виконанні дипломних та магістерських робіт дослідження лінійних трактів оптичних мереж виконується в два етапи.

На *першому етапі розраховують енергетичні* (сигнальні і шумові) *параметри* ВОЛТ – так званий «бюджет» потужності ВОСП. Надані приклади застосування цього методу для проектування лінійного тракту із топологією «точка-точка» і оптоелектронного ретранслятора. Розрахункові формули можна застосувати для аналізу пасивних оптичних мереж доступу (PON), де дисперсія оптичного сигналу не є суттєвою.

На *другому етапі розраховують* «бюджет» ВОСП за параметром *час наростання фронту імпульсу* та визначають придатність вибраних компонентів для виконання системних вимог до лінійних спотворень. В процесі проектування, після виконання розрахунку довжини ділянки підсилення (регенерації) за загасанням, мають бути вибрані компоненти лінійного тракту зі значеннями часу наростання, що забезпечують необхідну швидкодію проектуємого лінійного тракту ВОСП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей: Учеб. пособ. [для вузов] / [Е.Б. Алексеев, В. Н.Гордиенко, В.В.Крухмалев и др.]; под ред. В. Н.Гордиенко и М.С. Тверецкого. – М.: Горячая линия- Телеком, 2008.
2. Корнейчук В. И. Измерение параметров компонентов и устройств ВОСП: учеб. пос. / Корнейчук В. И. – Одесса: УГАС им. А. С. Попова, 2000.
3. Слепов Н.Н Синхронные сети SDH / Слепов Н.Н – М.: ЭКОТRENДЗ, 1997.
4. Хмелёв К.Ф. Основы SDH: Монография / Хмелёв К.Ф. – К: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2003.
5. Брескін В. О. Проектування фрагмента транспортної мережі SDH / Брескін В. О. Пашолок П. О., Чистяков Ю. І – Одеса: ОНАЗ, 2001.
6. Фокин В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учеб. пос. / Фокин В. Г. – М.: Эко-Трендз, 2008.
7. Корнейчук В.И. Волоконно-оптические системы передачи: учебник / Корнейчук В.И., Панфилов И.П. – Одесса: “Друк”, 2001. – 436 с.
8. Корнейчук В. И. Проектирование волоконно-оптических систем передачи: учеб. пос. / Корнейчук В. И., Макаров Т.В., Панфилов И. П. – Одесса: ОЭИС, 1991. – 118 с.
9. Корнійчук В.І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі / Корнійчук В.І., Мосорін П.Д. – Одеса: Друк, 2001, – 367 с.
10. Корнейчук В.И. Метод анализа оптоэлектронных цепей / Корнейчук В.И. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. –2001. –№3. –С. 42-48.
11. Корнейчук В.И. Расчет энергетических параметров волоконно-оптической линии передачи / Корнейчук В.И., Мосорин П.Д. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. –2001. – № 2. –С. 68-73.
12. Корнейчук В.И. Моделирование энергетических процессов в волоконно-оптической линии передачи/ Корнейчук В.И., Васильев В.А., Швайко И.Г. // Праці УНДІРТ. – № 1 (37). – Одесса, 2004. –С. 51-55.
13. Стерлинг Д. Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. / Стерлинг Д. Дж. / –М.: Изд. “ЛОРИ”, 1998. – 288 с.
14. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. / Фриман Р.; пер. с англ. под ред. Н.Н. Слепова. –М.: Техносфера, 2003. – 440 с.
15. Корнейчук В.И. Алгоритм и программа расчета бюджета времени нарастания ВОЛП / Корнейчук В.И., Заяц С.А. // VII Международная НПК [«Системы и средства передачи и обработки информации»] – Одесса; 2003. С. 89-90.

ДОДАТКИ

Д.1 Оптичні кабелі виробництва ВАТ «Одескабель»

Таблиця Д.1.1 – Оптичні кабелі виробництва ВАТ «Одескабель»

Марка кабеля	Кількість ОВ, шт
ОКЛ-3-ДА1 - 1×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-4/0	4
ОКЛ-3-ДА1 - 2×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-8/0	8
ОКЛ-3-ДА1 - 3×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-12/0	12
ОКЛ-3-ДА1 - 4×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-16/0	16
ОКЛ-3-ДА1 - 4×4Е +1×2Е - 0,40Ф3,5/0,30Н19-18/0	18
ОКЛ-3-ДА1 - 6×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-24/0	24
ОКЛ-3-М1 - 1×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-4/0	4
ОКЛ-3-М1 - 2×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-8/0	8
ОКЛ-3-М1 - 3×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-12/0	12
ОКЛ-3-М1 - 4×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-16/0	16
ОКЛ-3-М1 - 4×4Е + 1×2Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-18/0	18
ОКЛ-3-М1 - 6×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-24/0	24
ОКЛБ-3-ДА4 - 1×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-4/0	4
ОКЛБ-3-ДА4 - 2×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-8/0	8
ОКЛБ-3-ДА4 - 3×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-12/0	12
ОКЛБ-3-ДА4 - 4×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-16/0	16
ОКЛБ-3-ДА4 - 4×4Е +1×2Е - 0,40Ф3,5/0,30Н19-18/0	18
ОКЛБ-3-ДА4 - 6×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-24/0	24
ОКЛБ-3-М4 - 1×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-4/0	4
ОКЛБ-3-М4 - 2×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-8/0	8
ОКЛБ-3-М4 - 3×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-12/0	12
ОКЛБ-3-М4 - 4×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-16/0	16
ОКЛБ-3-М4 - 4×4Е +1×2Е - 0,40Ф3,5/0,30Н19-18/0	18
ОКЛБ-3-М4 - 6×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-24/0	24
ОКЛБГ-3-ДА12 - 1×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-4/0	4
ОКЛБГ-3-ДА12 - 2×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-8/0	8
ОКЛБГ-3-ДА12 - 3×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-12/0	12
ОКЛБГ-3-ДА12 - 4×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-16/0	16
ОКЛБГ-3-ДА12 - 4×4Е +1×2Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-18/0	18
ОКЛБГ-3-ДА12 - 6×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-24/0	24
ОКЛБГ-3-М12 - 1×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-4/0	4
ОКЛБГ-3-М12 - 2×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-8/0	8
ОКЛБГ-3-М12 - 3×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-12/0	12
ОКЛБГ-3-М12 - 4×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-16/0	16
ОКЛБГ-3-М12 - 4×4Е +1×2Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-18/0	18
ОКЛБГ-3-М12 - 6×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-24/0	24
ОКЛК-3-Д6 - 1×4Е- 0,40Ф3,5/0,30Н19-4/0	4

ОКЛК-3-Д6 - $2 \times 4E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-8/0$	8
ОКЛК-3-Д6 - $3 \times 4E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-12/0$	12
ОКЛК-3-Д6 - $4 \times 4E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-16/0$	16
ОКЛК-3-Д6 - $4 \times 4E + 1 \times 2E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-18/0$	18
ОКЛК-3-Д6 - $6 \times 4E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-24/0$	24
ОКЛКК-3-Д6 - $1 \times 4E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-4/0$	4
ОКЛКК-3-Д6 - $2 \times 4E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-8/0$	8
ОКЛКК-3-Д6 - $3 \times 4E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-12$	12
ОКЛКК-3-Д6 - $4 \times 4E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-16/0$	16
ОКЛКК-3-Д6 - $4 \times 4E + 1 \times 2E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-18$	18
ОКЛКК-3-Д6 - $6 \times 4E - 0,40\Phi 3,5/0,30H19-24$	24

Д. 2 Узагальнена функціональна схема мультиплексора

Розглянемо узагальнену функціональну схему мультиплексора STM-N (рис. Д.2.1) і перетворення сигналу, що передається по тракту нижчого порядку (наприклад, потік E1).

Сигнал PDH надходить на блок PPI (PDH Physical Interface – фізичний інтерфейс PDH), а потім на блок LPA (Lower order Path Adaptation – адаптація тракту нижчого порядку). Ці блоки забезпечують мережний цифровий стик і вводять навантаження в контейнер. Наступний блок – LPP (lower order Path Protection – резервування тракту нижчого порядку) – забезпечує можливість відгалуження сигналу на позиції іншого тракту нижчого порядку з метою резервування.

Після чого сигнал поступає на блок LPT (Lower Order Path Termination – закінчення тракту нижчого порядку), який додає трактовий заголовок контейнера VC-m. Блоки (PPI, LPA, LPP, LPT) – це LOI (Lower Order Interface – інтерфейс нижчого порядку).

Потім сигнал надходить на блок LPC (Lower Order Path Connection – з'єднання трактів нижчого порядку), який дозволяє здійснювати гнучке з'єднання контейнерів VC-m, тобто розподіляє ці контейнери в трактах вищого порядку.

Блок LUG (Lower Order Path Unequipped Generator – генератор сигналу необладнаного тракту нижчого порядку) – у разі «невикористовуваного» з'єднання генерує контейнер VC-m з позначкою сигналу «необладнаний».

Блок LPOM (Lower Order Path Overhead Monitor – контроль заголовка тракту нижчого порядку) – контролює трактовий заголовок контейнера VC-m без його зміни.

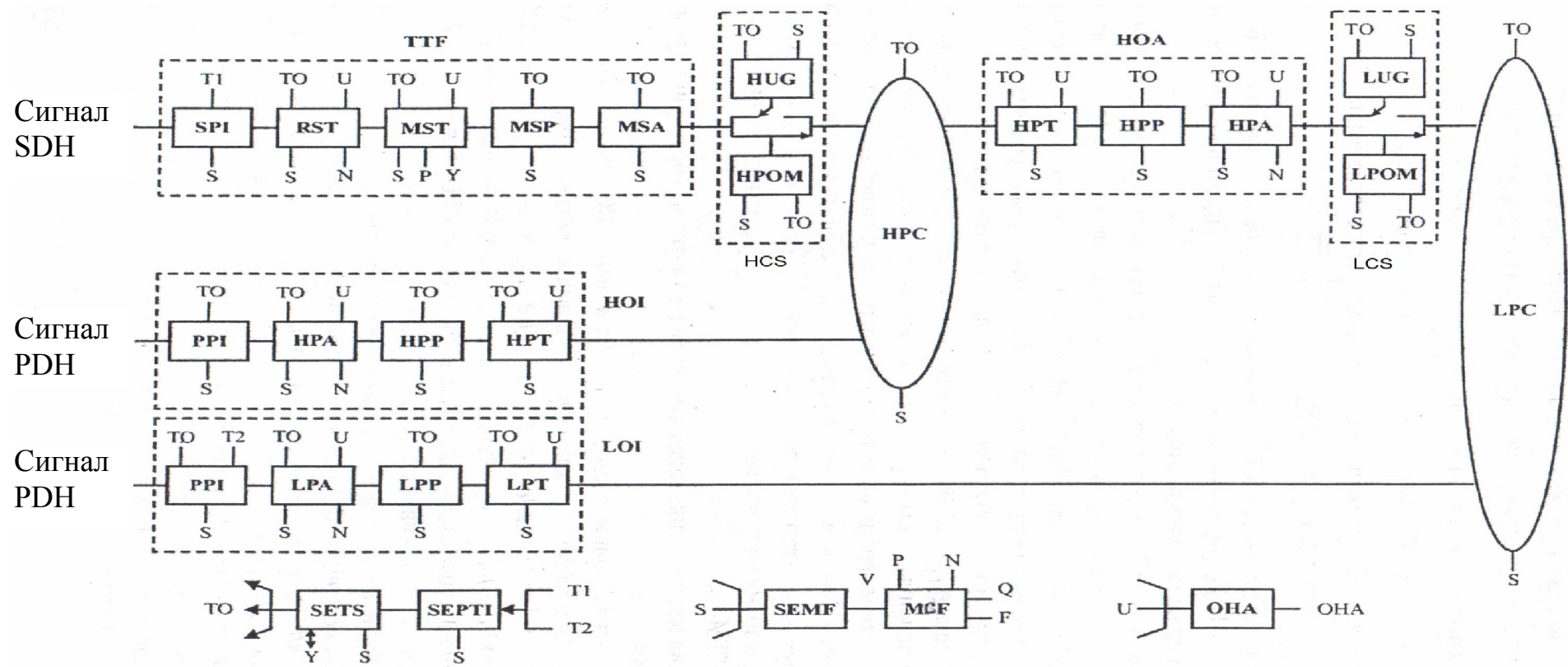


Рисунок Д.2.1 – Узагальнена функціональна схема мультиплексора

Блоки (LUG, LPOM) це LCS (Lower Order Connection Supervision – контроль з'єднання нижчого порядку).

HPA (Higher Order Path Adaptation – адаптація тракту вищого порядку) здійснює оброблення покажчика блока TU для індикації фази першого байта заголовка VC-*m* щодо першого байта заголовка віртуального контейнера вищого порядку VC-*n* і формує повний контейнер VC-*n*.

HPP (Higher Order Path Protection – резервування тракту вищого порядку) забезпечує можливість відгалуження сигналу на позиції іншого тракту вищого порядку для резервування.

HPT (Higher Order Path Termination – закінчення тракту вищого порядку) додає трактовий заголовок контейнера VC-*n*.

Блоки (HPA, HPP, HPT) – це HOA (Higher Order Assembler – складання контейнерів вищого порядку).

HPC (Higher Order Path Connection – з'єднання трактів вищого порядку) дозволяє здійснювати гнучке з'єднання трактів VC-*n*.

HUG (Higher Order Path Unequipped Generator – генерація сигналу необладнаного тракту вищого порядку) у разі «невикористовуваного» з'єднання генерує контейнер VC-*n* з позначкою сигналу «необладнаний».

HPOM (Higher Order Path Overhead Monitor – контроль заголовка тракту вищого порядку): контролює трактовий заголовок контейнера VC-*n* без його зміни.

Блоки (HUG, HPOM) це HCS (Higher Order Connection Supervision – контроль з'єднання вищого порядку).

MSA (Multiplex Section Adaptation – адаптація мультиплексної секції) – обробляє покажчик блока AU-4 для індикації фази заголовка VC-*n* щодо заголовка STM-N (SOH). Здійснює об'єднання груп адміністративних блоків (AUG) по байтах для формування повного циклу STM-N.

MSP (Multiplex Section Protection – резервування мультиплексної секції) – забезпечує можливість відгалуження сигналу на інше лінійне обладнання для резервування.

MST (Multiplex Section Termination – закінчення мультиплексної секції) генерує і додає ряди 5...9 заголовка SOH.

RST (Regeneration Section Termination – закінчення регенераційної секції) генерує і додає ряди 1...3 заголовка SOH; потім сигнал STM-N скремблюється за винятком ряду 1 заголовка SOH.

SPI (SDH Physical Interface – фізичний інтерфейс SDH): перетворює сигнал STM-N внутрішнього логічного рівня в сигнал стику STM-N. Таким сигналом може бути або агрегатний оптичний сигнал, або компонентний, як електричний (тільки для $N = 1$), так і оптичний.

Блоки (MSA, MSP, MST, RST, SPI) це TTF (Transport Terminal Function – функція транспортного терміналу).

Сигнал вищого порядку (наприклад, E4) надходить на обладнання HOI (Higher Order Interface – інтерфейс вищого порядку), який містить блоки PPI, HPA, HPP, HPT, що описані вище.

При проходженні сигналу в зворотному напрямку (від синхронної мережі до мережі доступу), в основному, всі операції є зворотними. Виняток становить блок адаптації тракту нижчого порядку (LPA), який забезпечує буферну пам'ять і згладжування для зменшення фазового тремтіння хронуючого сигналу, яке виникає в процесі групоутворення і зміщення покажчика.

Відмінність передавання сигналу в зворотному напрямку полягає:

SPI – фізичний стик SDH – перетворює сигнал стику STM-N в сигнал STM-N внутрішнього логічного рівня і виділяє хронуючий сигнал з лінійного.

RST – закінчення регенераційної секції: визначає синхросигнал циклу STM-N, дескремблює сигнал і здійснює оброблення рядів 1...3 заголовка SOH.

Призначення блока OHA (Over Head Access) – функція доступу до заголовка.

U – еталонні точки доступу до заголовка.

MCF (Message Communications Function – функція обміну повідомленнями).

SEMF (Synchronous Equipment Management Function – функція управління синхронною апаратурою).

Q – інтерфейс для підключення мережного менеджера (NM).

F – інтерфейс для підключення елемент-менеджера (EM).

N – еталонна точка регенераційної секції каналу передавання даних.

P – еталонна точка секції групоутворення каналу передавання даних.

V – еталонна точка інтерфейсу між SEMF і MSF.

S – еталонні точки керування.

T, T1, T2, T0 – еталонні точки хронування.

SEPTI (Synchronous Equipment Timing Physical Interface – фізичний інтерфейс тактового генератора).

SETS (Synchronous Equipment Timing Source – тактовий генератор).

Y – еталонна точка стану синхронізації.

Слід зазначити, що звичайно мультиплексор не виконує всі функції, які описані вище. При проектуванні ВОЛП визначаються функції, що виконуються кожним мультиплексором, і здійснюється конфігурація.

Д. 3 Інтерфейс G.703

Інтерфейс G.703 використовується в ЦСП ПЦІ та СЦІ.

Розглянемо фізичні й електричні характеристики інтерфейсу G.703, які регламентовані рек. ITU-T G.703 для забезпечення можливості з'єднання елементів цифрових мереж з метою формування міжнародних ліній передавання.

Наведені характеристики інтерфейсів для швидкостей передачі даних американської, європейської, японської ієрархій та для першого рівня синхронної ієрархії зі швидкістю передавання 155,52 Мбіт/с.

Для сигналів зі швидкостями $n \times 64$ кбіт/с ($n = 2, 3, \dots, 31$), які передаються через обладнання, що специфіковане для первинного рівня 2048 кбіт/с, характеристики інтерфейсу такі ж самі, як і для 2048 кбіт/с.

Основні характеристики інтерфейсу:

- тип організації взаємодії апаратури інтерфейсу;
- швидкість передавання даних і частота синхронізуючого сигналу;
- тип коду або алгоритм його формування;
- форма імпульсу і відповідне поле допуску;
- тип пари, яка використовується для кожного напрямку передавання;
- імпеданс навантаження для коаксіального та симетричного кабелів;
- номінальна пікова напруга імпульсу;
- пікова напруга за відсутності імпульсу;
- номінальна ширина імпульсу;
- відношення амплітуд позитивного та негативного імпульсів;
- відношення ширини позитивного та негативного імпульсів;
- максимальне тремтіння фази на вихідному порту.

Розглянемо характеристики інтерфейсу G.703.

Тип організації взаємодії апаратури інтерфейсу

Ця характеристика регламентована для швидкості 64 кбіт/с, за якої через інтерфейс передаються три типи сигналів: інформаційний сигнал 64 кбіт/с і два синхронізуючих (тактових) 64 кГц і 8 кГц.

Стандартом передбачено три типи організації взаємодії термінальної приймально-передавальної апаратури між двома термінальними пристроями: співспрямований (CCI), різноспрямований (PCI), з центральним тактовим генератором (ЦТГ).

Співспрямований тип інтерфейсу (codirectional interface) – тип, за якого як інформаційний, так і тактовий сигнали спрямовані в одну сторону: термінали рівноправні та симетричні, обидва сигнали передаються від кожного терміналу до кожного, рис. Д.3.1.

Різноспрямований тип інтерфейсу (contradirectional interface) – тип, за якого термінали нерівноправні і діляться на керувальні та керовані.

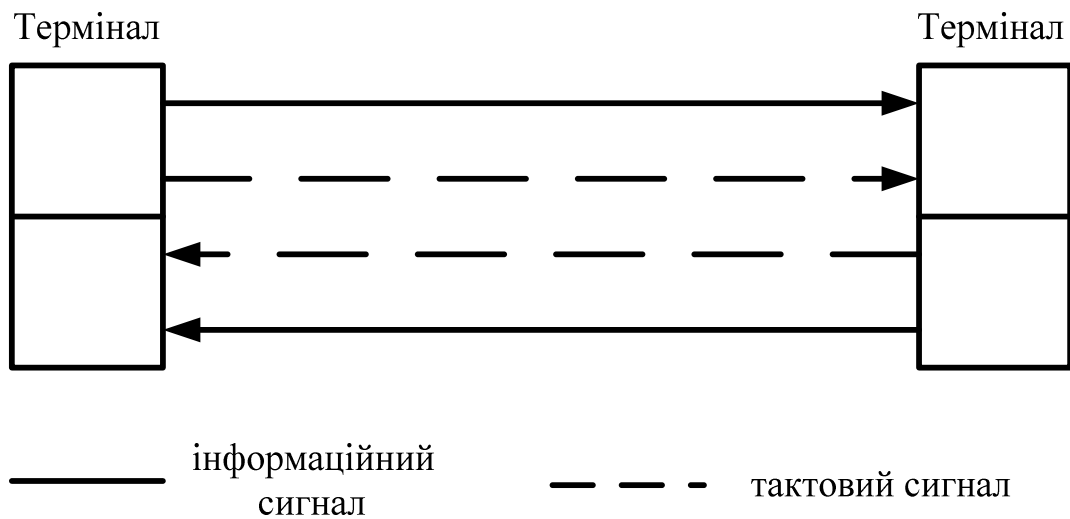


Рисунок Д.3.1 – Співспрямований інтерфейс для швидкості 64 кбіт/с

Тактові сигнали направлені від керувального терміналу до керованого, а інформаційний сигнал симетричний, рис. Д.3.2.

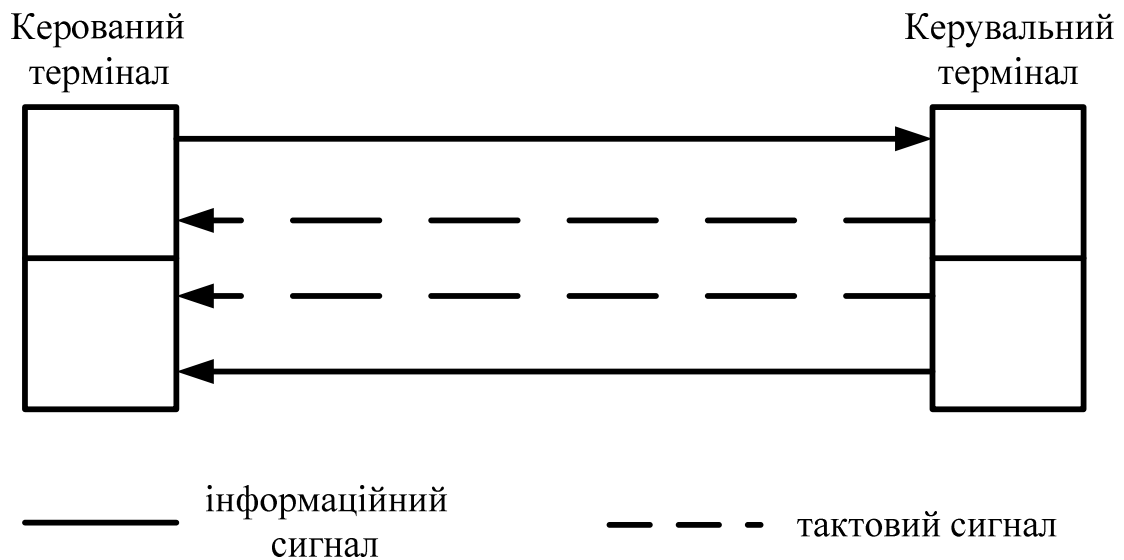


Рисунок Д.3.2 – Різнострумовий інтерфейс для швидкості 64 кбіт/с

Інтерфейс з центральним тактовим генератором (centralized clock interface) – тип, за якого тактові сигнали направлені від центрального тактового генератора до обох терміналів, а інформаційний сигнал симетричний, рис. Д.3.3.

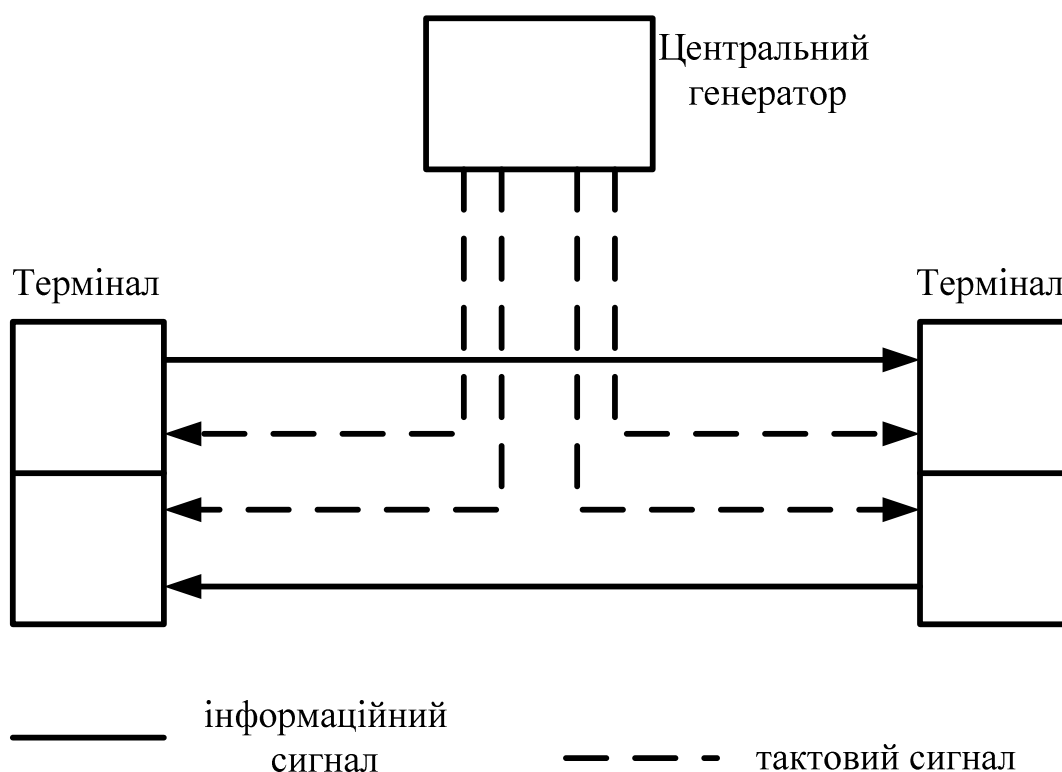


Рисунок Д.3.3 – Інтерфейс з центральним тактовим генератором для швидкості 64 кбіт/с

Швидкість передавання даних і частоти синхронізуючого сигналу

Швидкості передавання даних, в основному, відповідають плезіохронній ієрархії. Тактовий сигнал може передаватися від окремого джерела або формуватися з лінійного інформаційного сигналу.

Частота тактового сигналу може збігатися або не збігатися зі швидкістю передавання даних. Тактова частота може бути в 2, 4, 8 разів менше в залежності від методу кодування, що використовується.

Приклад. Для швидкості 64 кбіт/с номінальною є тактова частота 64 кГц, а може використовуватися і частота 8 кГц (октетна синхронізація).

Тип коду або алгоритм формування

Тип коду залежить не тільки від швидкості передавання даних, але і від типу організації апаратури інтерфейсу.

Якщо код стандартизований (AMI, HDB-3), то вказується його назва або дається короткий опис особливостей.

Якщо код не стандартизований, то опис алгоритму його формування дається у стандарті.

Форма імпульсу та відповідне поле допуску

Форма імпульсу та відповідне поле допуску (маска імпульсу) наведені у стандарті для кожної швидкості передавання та типу організації взаємодії апаратури інтерфейсу для швидкості 64 кбіт/с.

Тип пари, що використовується, та імпедансу навантаження

Використовується коаксіальний кабель або симетрична пара.

При використанні коаксіального кабелю імпеданс навантаження 75 Ом.

При використанні симетричної пари імпеданс навантаження залежить від швидкості передавання і змінюється від 100 до 120 Ом.

Максимальна напруга імпульсу та рівень сигналу в паузі

Максимальна напруга імпульсу та рівень сигналу в паузі залежить від швидкості передавання та відносного рівня шуму.

Слід відзначити, що можливі значення рівнів сигналів і шумів можна оцінити по масках.

Ширина імпульсу

У стандарті наведені або ширина імпульсу даних і ширина тактового імпульсу або тільки номінальна ширина імпульсу даних.

Реалізація інтерфейсу G.703

Основні характеристики інтерфейсу G.703 наведені в табл. Д.3.1.

Таблиця Д.3.1 – Фізичні та електричні характеристики сімейства інтерфейсів G.703

Швидкість, кбіт/с	64 (CCI)	64 (ЦГІ)	64 (РСІ)	2048	8448	34368	139264	155520
Тип коду	спец. код ¹	AMI	AMI	HDB3	HDB3	HDB3	CMI	CMI
Імпеданс (коакс.), Ом				75	75	75	75	5
Імпеданс (сим.), Ом	120	110	120	120				
Амплітуда сигналу, В	1,0	1,1 3,4 ³	1,0	2,37 3,0 ⁵	2,37	1,0	±0,55	±0,55
Амплітуда паузи, В	0,1	0,1 0,5 ³	0,1	0,237 0,3 ⁵	0,237	0,1	±0,05 ⁶	±0,05 ⁶
Ширина імпульсу, мкс/нс	3,9 7,8 ²	15,6 7,8 ⁴	15,6 7,8 ⁴	244	59,0	14,55	3,59	3,216 6,43 ²

У табл. Д.3.1 (відповідно з номерами посилань) вказані для таких параметрів:

- 1 – двочастотний двійковий код;
- 2 – більше значення відповідає ширині подвійного імпульсу (логічна “1”), менше – ширині окремого імпульсу;
- 3 – більше значення рекомендується використовувати у випадку підвищеного рівня шумів;
- 4 – більше значення відповідає ширині імпульсу даних, менше – ширині тактового імпульсу;
- 5 – більше значення відповідає використанню симетричної пари, менше – коаксіальному кабелю;
- 6 – використовується симетричне поле допуску.

Слід відзначити, що в табл. Д.3.1 ширина імпульсів наведена в мкс для швидкості 64 кбіт/с та в нс для інших швидкостей.

Важливо врахувати, що вказані типи коду відносяться тільки до інтерфейсу, а не до лінії передавання в цілому. Для металевих ліній передавання ці коди можуть збігатися, а для ВОЛП, як правило, не збігаються.

Виробники обладнання зв'язку реалізують вказаний стандарт для конкретної швидкості передавання, що використовується, наприклад, 2048 кбіт/с.

Підключення мережі з інтерфейсом G.703 до апаратури користувача

Підключення мережі, розрахованої на використання інтерфейсу G.703, до апаратури користувача залежить від наявності у користувача входу з інтерфейсом G.703, типу кабелю (металевий або оптичний) та його імпедансу (коаксіальний 75 Ом, симетрична пара 100...120 Ом).

Підключення є простою операцією, якщо використовується металевий кабель, а апаратура користувача має вхід з інтерфейсом G.703.

Якщо імпеданс кабелю користувача не відповідає імпедансу лінії передавання, то використовується трансформатор, що узгоджує імпеданси, (наприклад, 120 Ом – симетрична пара / 75 Ом – коаксіальний кабель).

Якщо використовується волоконно-оптичний кабель, то оптичний сигнал перетворюється в електричний на вході апаратури користувача і навпаки – на виході апаратури користувача.

Коли апаратура користувача не має входу з інтерфейсом G.703, а має входи з іншими інтерфейсами, то використовуються спеціальні конвертери інтерфейсів, які дозволяють зістикувати, наприклад, локальні мережі (LAN) з інтерфейсами V.24, V.35, X.21 з глобальними мережами (WAN) з інтерфейсами G.703.

Такі конвертери виробляє ряд компаній, наприклад, компанія RAD DATA Communications, табл. Д.3.2.

Таблиця Д.3.2 – Конвертери інтерфейсів компанії RAD DATA Communications

DCE DTE	G.703				V.35 FE1	X.21 FE1
	64 кбіт/с, CCI	64 кбіт/с, PCI	64 кбіт/с, T1	64 кбіт/с, E1		
V.24/RS232	ITA-703 SPD-703-1 UCI	-	-	-	MIC-24/35 RIC-24/35 UCI	MIC-24T/21C RIC-232/530 UCI
V.35	SPD-703 SPD-703-1 UCI	SPD-703/C	ASM-40 FCD-1 UCI-HS	ASM-40 FCD-2 UCI-HS	-	MIC-35T/21C RIC-232/530 UCI
V.36/V.11	SPD-703 SPD-703-1 UCI	SPD-703/C	ASM-40 FCD-1 UCI-HS	ASM-40 FCD-2 UCI-HS	MIC-36T/35C UCI	CBL-36T/21C UCI
X.21/V.11	SPD-703 SPD-703-1 UCI	SPD-703/C	ASM-40 FCD-1 UCI-HS	ASM-40 FCD-2 UCI-HS	MIC-21T/35C UCI	
RS-530	SPD-703 SPD-703-1 UCI	SPD-703/C	ASM-40 FCD-1 UCI-HS	ASM-40 FCD-2 UCI-HS	MIC-53T/35C UCI	CBL-530T/21C UCI
G.703	-	-	-	-	FCD-20	FCD-20

DCE (Data Circuit Terminating Equipment) – виходи WAN.

DTE (Data Terminal Equipment) – входи LAN.

При використанні таких конвертерів для з'єднання з апаратурою користувача застосовуються відповідні розніми.

Д.4 Параметри ЕОП

Параметри напівпровідникових джерел випромінювання і передавальних пристроїв ВОСП наведені в табл. Д.4.1 і Д.4.2 відповідно.

Таблиця Д.4.1 – Параметри напівпровідникових джерел випромінювання

Параметр	Торцевий світлодіод	Багатомодовий лазерний діод (ЛД)	Одномодовий ЛД
<i>Ширина спектра, нм</i>	20...100	2...10	< 0,2
Час наростання, нс	2...250	0,1...1	0,05...0,1
Ширина смуги частот модуляції, МГц	< 300	2000	6000
Ефективність вводу потужності світла в ОВ	Дуже низька	Середня	Висока
Відповідне ОВ	СОВ ¹⁾ або ГОВ ²⁾	Багатомодове ГОВ, одномодове	Одномодове
Температурна чутливість	Низька	Висока	Висока
Складність схеми	Низька	Висока	Висока
Ресурс роботи, годин	10 ⁵	10 ³ ...10 ⁴	10 ⁴ ...10 ⁵
Вартість	Низька	Середня	Висока
Швидкодія	Середня	Велика	Дуже велика
Дальність	Мала	Середня	Велика
Примітки: ¹⁾ Для систем у першому вікні прозорості; ²⁾ Для систем у другому вікні прозорості.			

Таблиця Д.4.2 – Параметри передавальних пристроїв ВОСП

Модель/Тип резонатора	Швидкість передавання, Мбіт/с	Робоча довжина хвилі, нм	Ширина спектра $\Delta\lambda$, нм	Час наростання, нс	Адреса інтернет-сайта
РОМ-34/ФП ¹⁾	≤50	1310	≤5	1,5	www.fti-optronic.ru
РОМ-155/ФП ¹⁾	2...155	1310	≤5	1,5	
РОМ-155/РОС ²⁾	≤155	1550	≤1,2	1,5	
РОМ-622/ФП ¹⁾	≤622	1550	≤5	1,5	
РОМ-622/РОС ²⁾	≤622	1550	≤1,2	1,5	
PT7827-51-3 ¹⁾	100...1270	1550	1,0	0,26	www.neophotonics.com
FPLD Module ¹⁾	2500	1310/1550	2,0	0,1	www.afop.com
DFBLD Module ²⁾	2500	1310/1550	0,2	0,1	
Примітки. ЛД з резонатором Фабрі-Перро ¹⁾ ; ²⁾ ЛД з резонатором із розподіленим зворотним зв'язком.					

Д.5 Параметри ОЕП

Параметри напівпровідникових приймачів випромінювання і приймальних пристроїв ВОСП наведені в табл. Д.5.1 і Д.5.2 відповідно.

Таблиця Д.5.1 – Параметри напівпровідникових приймачів випромінювання

Матеріал	Структура	Час наростання, нс	Область чутливості, нм	Струмний відгук, А/Вт
Кремній	$p-i-n$	0,5	300...1100	0,5
Германій	$p-i-n$	0,1	500...1800	0,7
InGaAs	$p-i-n$	0,3	900...1700	0,6
Кремній	ЛФД	0,5	400...1000	75
Германій	ЛФД	1,0	1000...1600	35
InGaAs	ЛФД	0,25	1000...1700	12

Таблиця Д.5.2 – Параметри приймальних пристроїв діапазону 1100...1650 нм

Модель	Рівень чутливості ¹⁾ , дБм	Максимальна швидкість прийому, Мбіт/с	Смуга пропускання ²⁾ , МГц	Час наростання, нс	Компанія-виробник, адреса інтернет-сайту
PROM-34	-41	50			www.fti-optronic.ru
PROM-50	-45	34	50	7,0	
PROM-155	-36	155	140	2,5	
PROM-622	-33	622	450	0,9	
PD-250	-21	2500	2000	0,175	TrueLight
PT-9100	-21	2500	2000	0,175	
TMC-1C41-201	-36	125	-	4,5	www.optoway.com
TMC-1C46-000	-32	622	404	0,9	
TMC-1C46-000	-25	1000	—	0,3,0,4	

Примітки: ¹⁾ Для $BER = 10^{-9}$; ²⁾ Якщо вказана смуга пропускання F , тоді $t_H(нс) = 0,35/F(МГц)$.

Д.6 Параметри ООП

Параметри передачі одномодових і багатомодових ОВ і ОК наведені в табл. Д.6.1 і Д.6.2 відповідно.

Таблиця Д.6.1 – Коефіцієнти загасання і хроматичної дисперсії одномодових ОВ і ОК згідно рекомендацій G.652...G.655

Рекомендація	Назва рекомендації	Основні ознаки ОВ (оптичного кабелю)	Коефіцієнт загасання, дБ/км	Коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм·км)
1	2	3	4	5
G.652	Параметри стандартного ОМ ОВ і ОК на його основі	Нульова хроматична дисперсія і довжина хвилі відсікання не зміщені з області 1260...1360 нм	0,35...0,5 в області 1288...1339 нм	$\leq 3,5$ в області 1288...1339 нм
			0,2...0,4 в області 1550 нм	$\leq 18,0$ в області 1550 нм

Продовження таблиці Д.6.1

Продовження таблиці Д.С.1

1	2	3	4	5
G.653	Параметри ОМ ОВ зі зміщеною дисперсією і ОК на його основі	Нульова хроматична дисперсія зміщена в область 1530...1565 нм, коефіцієнт дисперсії монотонно збільшується з довжиною хвилі	0,3...0,35 в області 1525...1575 нм	$\leq 3,5$ в області 1525...1575 нм
G.654	Параметри ОМ ОВ зі зміщеною довжиною хвилі відсікання і ОК на його основі	Нульова хроматична дисперсія в області 1260...1360 нм, мінімальні втрати і довжина хвилі відсікання в області 1530...1565 нм	0,22 в області 1530...1565 нм	$\leq 20,0$ в області 1530...1565 нм
G.655	Параметри ОМ ОВ з ненульовою зміщеною дисперсією і ОК на його основі	Абсолютне значення хроматичної дисперсії більше деякого ненульового значення в усій області довжин хвиль 1530...1565 нм	Тип А (в області 1530...1565 нм)	
			0,35	0,1...6,0
			Тип Б (в області 1530...1565 нм)	
			0,30	1,0...10,0
Примітка. Будівельна довжина оптичного кабелю $l_6 = 2...7$ км.				

Таблиця Д.6.2 – Коефіцієнти загасання і широкосмуговості багатомодових ОВ і ОК згідно рек. G.651 і стандарту IEC 60793-2

Рекомендація (стандарт)/діаметр перетину, мкм	Максимальний коефіцієнт загасання, дБ/км на λ , нм		Мінімальний коефіцієнт широко-смуговості, МГц×км на λ , нм	
	850	1300	850	1300
Рек. G.651/ ОВ 50/125	4,0	2,0	200	200
	3,5	1,5	200	400
	3,0	1,0	200	400
	2,7	0,7	200	400
Стандарт IEC 60793-2/ ОВ 62,5/125	4,0	2,0	150	200
	3,5	1,5	200	400
	3,2	0,9	200	400
	3,0	1,0	200	400
<i>Примітка.</i> Коефіцієнт хроматичної дисперсії БМ ОВ в області довжин хвиль 850 нм дорівнює 100 пс/(нм·км), в області 1300 нм – 3,5 пс/(нм·км).				

Д.7 Ширина смуги пропускання електричного й оптичного сигналів оптичного волокна

Верхня гранична частота смуги пропускання за рівнем -3 дБ у формулі (2.2.2) – це частота, на якій електрична потужність в навантаженні ОЕП знижується до половини від максимального значення, яке спостерігається в НЧ області. Проте, при визначенні ширини смуги пропускання ОВ, враховується зменшення оптичної потужності. Наприклад, ширина смуги пропускання оптичного волокна за рівнем -3 дБ відповідає зменшенню значення модульованої оптичної потужності в два рази.

Розглянемо стандартний метод вимірювання амплітудної модуляційно-частотної характеристики (АМЧХ) ОВ з метою визначення ширини смуги пропускання оптичного сигналу ООП за рівнем -3 дБ. Частота модуляції швидкодіючого джерела випромінювання встановлюється в НЧ області і за допомогою широкосмугового ОЕП вимірюється амплітуда продетектованого синусоїдального струму. Ця амплітуда реєструється і є опорною. Потім частоту модуляції збільшують, контролюючи амплітуду продетектованого струму. Оскільки фотострум є пропорційним оптичній потужності, гранична частота ООП за рівнем -3 дБ буде досягнута, коли значення струму зменшиться до половини від опорного значення. Проте електрична потужність в резисторі навантаження ОЕП є пропорційною квадрату струму. Тому зменшення струму удвічі відповідає зниженню електричної потужності в навантаженні ОЕП в чотири рази. Це відповідає втратам електричної потужності в 6 дБ. Очевидно, що *ширині смуги пропускання оптичного сигналу ООП за рівнем -3 дБ відповідає ширина смуги пропускання електричного сигналу за рівнем -6 дБ.* Взагалі, електричні втрати відповідають подвоєним оптичним втратам, якщо обидві вимірюються в дБ, табл. Д.7.

Таблиця Д.7 – Взаємозв'язок електричних і оптичних втрат

Оптичні втрати, дБ	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Електричні втрати, дБ	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

Щоб скористатися співвідношеннями (2.2.1) або (2.2.2) для розрахунку часу наростання для оптичного волокна необхідно знайти його *ширину смуги пропускання електричного сигналу* за рівнем -3 дБ. Дані табл. Д.7 свідчать, що верхня гранична частота смуги пропускання електричного сигналу ООП відповідає значенню, за якого оптична потужність зменшується на 1,5 дБ. Можна показати, що *ширина смуги пропускання електричного сигналу $f_{-3\text{дБ}}$ (ел.) і ширина смуги пропускання оптичного сигналу $f_{-3\text{дБ}}$ (опт.) для ОВ пов'язані співвідношенням*

$$f_{-3\text{дБ}} (\text{ел.}) = 0,71 f_{-3\text{дБ}} (\text{опт.}).$$

Ця формула використовується в алгоритмі проектування у п. 2.2 для перерахунку ширини смуги пропускання оптичного сигналу ООП в ширину смуги пропускання електричного сигналу ООП і подальшого розрахунку часу наростання для ОВ певної довжини.

Д.8 Застосування логарифмічних одиниць у розрахунках

Основним параметром, вимірюваним в оптичному лінійному тракті, є середнє в часі або імпульсне значення оптичної потужності, Вт. В оптичних системах інтервал значень оптичної потужності дуже великий – від (1...100) мВт на передавальній стороні, до одиниць мкВт і навіть нВт на приймальній стороні. В такій ситуації зручно перейти від мультиплікативних операцій (множення, ділення) з величинами, що виражені в абсолютних одиницях (Вт), до адитивних операцій (складання, віднімання) з величинами, що виражені в логарифмічних одиницях, дБ і дБм.

Д.8.1 Логарифмічна одиниця «дБ»

Децибел (дБ) (десята частина Бела) є зручним загальноприйнятим способом вираження в логарифмічних одиницях відношень напруг, струмів і потужностей. Нехай потужність дорівнює P_1 (Вт) в одній точці і P_2 (Вт) в іншій, більш видаленій по лінії передавання точці. Відношення P_2/P_1 є *коефіцієнтом передачі за потужністю*. Іншими словами P_2/P_1 – ефективність (ККД) передавання по системі або в логарифмічних одиницях

$$A = 10\lg(P_2/P_1) \text{ дБ}, \quad (\text{Д.8.1})$$

де значення P_2 і P_1 треба підставляти в однакових одиницях, наприклад, обидва у Вт або у мВт.

Значення логарифма від числа, меншого за одиницю, є негативним. Тому, у випадку $P_2 < P_1$, значення A (дБ) є негативним. Така ситуація типова для лінії передавання з втратами. Якщо в лінійному тракті включений підсилювач, $P_2 > P_1$ і значення A (дБ) є позитивним. Іноді негативний знак опускають, коли очевидно, що йдеться про втрати. Наприклад, якщо потужність змінилася на -3 дБ, то це можна назвати втратами у 3 дБ. У такій ситуації формулу (Д8.1) можна переписати

$$A = 10\lg(P_1/P_2), \text{ дБ} \quad (\text{Д.8.2})$$

і опустити негативний знак. У наведених нижче викладеннях ми будемо, в основному, мати справу з втратами, тобто $A > 0$ дБ.

Якщо відомі значення A (дБ) і P_1 (або P_2), то значення P_2 (або P_1) може бути знайдене в одиницях P_1 (або P_2) за допомогою операції потенціювання

$$P_2 = P_1 \cdot 10^{A(\text{дБ})/10} \text{ або } P_1 = P_2 / 10^{A(\text{дБ})/10}.$$

Логарифмічні одиниці спрощують розрахунки у випадках, коли компоненти системи з'єднані послідовно. Нехай ВОЛТ складається з трьох компонентів – з'єднувач «джерело-волокно» 1, саме оптичне волокно 2 і з'єднувач «волокно-приймач» 3, рис. Д.8.1. Потужність світла на виході тракту

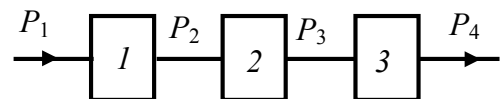


Рисунок Д.8.1 – Каскадне з'єднання пристроїв, що моделюють оптичний тракт

знаходимо перемножуванням коефіцієнтів передачі за потужністю кожного з блоків

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} \cdot \frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{P_2}{P_1}.$$

Відповідні втрати потужності в оптичному тракті на рис. Д.8.1

$$A = 10\lg\left(\frac{P_1}{P_4}\right) = 10\lg\left(\frac{P_3}{P_4} \cdot \frac{P_2}{P_3} \cdot \frac{P_1}{P_2}\right), \text{ дБ.}$$

Враховуючи, що логарифм добутку дорівнює сумі логарифмів,

$$A = 10\lg(P_3/P_4) + 10\lg(P_2/P_3) + 10\lg(P_1/P_2) = A_3 + A_2 + A_1, \text{ дБ.} \quad (\text{Д.8.3})$$

Таким чином, *результуючі втрати передавання (у дБ) дорівнюють сумі втрат (у дБ) в окремих каскадно-з'єднаних компонентах.* Цей приклад ілюструє простоту обчислень в логарифмічних одиницях.

Приклад Д.8.1.

Три елементи на рис. Д.8.1 мають втрати 11, 6 і 3 дБ, відповідно. Знайти результуючі втрати каскадного з'єднання і потужність на виході системи, якщо вхідна потужність 5 мВт.

Розв'язання

Згідно з рівнянням (Д.8.3) результуючі втрати дорівнюють сумі $11 + 6 + 3 = 20$ дБ. Згідно з формулі (Д.8.2) ослаблення 20 дБ еквівалентно відношенню потужностей $P_1/P_2 = 10^{20/10} = 10^2 = 100$. Потужність на виході системи дорівнює $5 \text{ мВт}/100 = 0,05 \text{ мВт}$.

Приклад Д.8.2.

Система має втрати потужності 23 дБ. Обчислити ефективність передачі системи.

Розв'язання

З формули (Д.8.2), використовуючи потенціювання, знаходимо відношення потужностей

$$P_1/P_2 = 10^{A(\text{дБ})/10}.$$

Підстановка дає $P_1/P_2 = 10^{2,3} = 199,52$. Ефективність передавання потужності $1/199,52 = 0,05$ або 0,5 %.

Д.8.2 Логарифмічна одиниця «дБм»

Домовились використовувати логарифмічні одиниці дБм замість абсолютних одиниць потужності (Вт) шляхом порівняння довільного значення потужності P_x з опорним, що дорівнює 1 мВт (типове значення потужності, введеної в одномодове ОВ від лазера). Десять логарифмів відношення довільної потужності P_x у мВт щодо потужності в 1 мВт ($1 \text{ мВт} = 10^{-3} \text{ Вт}$) позначають терміном дБм (читається «де-бе-ем»)

$$p = 10\lg[P_x(\text{мВт})/1 \text{ мВт}], \text{ дБм.} \quad (\text{Д.8.4})$$

Якщо заданий рівень потужності p^* (дБм), то використовуючи потенціювання, знаходимо відповідну (цьому рівню) потужність

$$P_x = 10^{p(\text{дБм})/10}, \text{ мВт.}$$

Отже, дБм – одиниця вимірювання *рівня потужності*.

Приклад Д.8.3

Світлодіод (СД) випромінює потужність 2 мВт. Обчислити рівень цієї потужності в дБм. Потужність СД передається через систему, що має сумарні втрати 23 дБ. Обчислити потужність світла на виході системи.

Розв'язання

Випромінювана потужність дорівнює 2 мВт. Цій потужності відповідає рівень потужності $a = 10\lg(2 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) = 10\lg 2 = 3 \text{ дБм}$. Рівень цієї потужності зменшується внаслідок втрат у тракці на 23 дБ. Тобто вихідна потужність на 23 дБ менша за вхідну потужність (3 дБм – 23 дБ = –20 дБм). Вихідна потужність дорівнює $P_x = 10^{-20/10} = 10^{-2} \text{ мВт} = 10 \text{ мкВт}$.

Взаємозв'язок потужності (мВт) та рівня потужності (дБм) подано в табл. Д.8.1.

Таблиця Д.8.1 – Взаємозв'язок потужності та рівня потужності

Потужність P , мВт	Рівень потужності p , дБм	Потужність P , мВт	Рівень потужності p , дБм
10	10	0,01	–20
1	0	0,001	–30
0,5	–3	0,0001	–40
0,1	–10	0,00001	–50

Д.8.3 «Електричні» й «оптичні» дБ

Розглянемо (рис. Д.8.2), як змінюються значення величин, виражених в логарифмічних одиницях, в різних областях спектра електромагнітних хвиль.

1. *Електрична область*. Нехай P_{e1} і P_{e2} – значення електричної (е) потужності в пристрої, а їх логарифмічне відношення

$$A_e = 10\lg(P_{e1}/P_{e2}), \text{ дБ.} \quad (\text{Д.8.5})$$

Враховуючи, що струм I та напруга U пов'язані з електричною потужністю відомими співвідношеннями $P_e = I^2 R = U^2/R$, де R – активний опір, формулу (8.5) можна записати через відношення квадратів струмів і напруг

$$A_a = \left\{ \begin{array}{l} 10\lg(I_1^2/I_2^2) = 20\lg(I_1/I_2) \\ 10\lg(U_1^2/U_2^2) = 20\lg(U_1/U_2) \end{array} \right\}, \text{ дБ} \quad (\text{Д.8.6})$$

де I_1 , U_1 , і I_2 , U_2 – струми і напруги, що відповідають потужностям P_{e1} і P_{e2} .

* Потужність позначають великою літерою P (мВт), а рівень потужності – малою літерою p (дБм).

2. В оптичній області спектра є тільки потужність випромінювання, і немає величин, еквівалентних електричному струму або напрузі. Нехай P_{o1} і P_{o2} – значення оптичної (о) потужності в пристроях. Логарифмічне відношення цих потужностей

$$A_o = 10\lg(P_{o1}/P_{o2}), \text{ дБ.} \quad (\text{Д.8.7})$$

В оптичній системі передачі (рис. Д.8.2) на *передавальній стороні* електрооптичний перетворювач (ЕОП) лінійно перетворює електричний струм I в оптичну потужність $P_o = R_p I$, де R_p , Вт/А – ватовий відгук ЕОП (див. нижче). На приймальній стороні оптоелектричний перетворювач (ОЕП) лінійно перетворює оптичну потужність P_o в електричний струм $I = P_o R_i$, де R_i , А/Вт – струмовий відгук ОЕП.

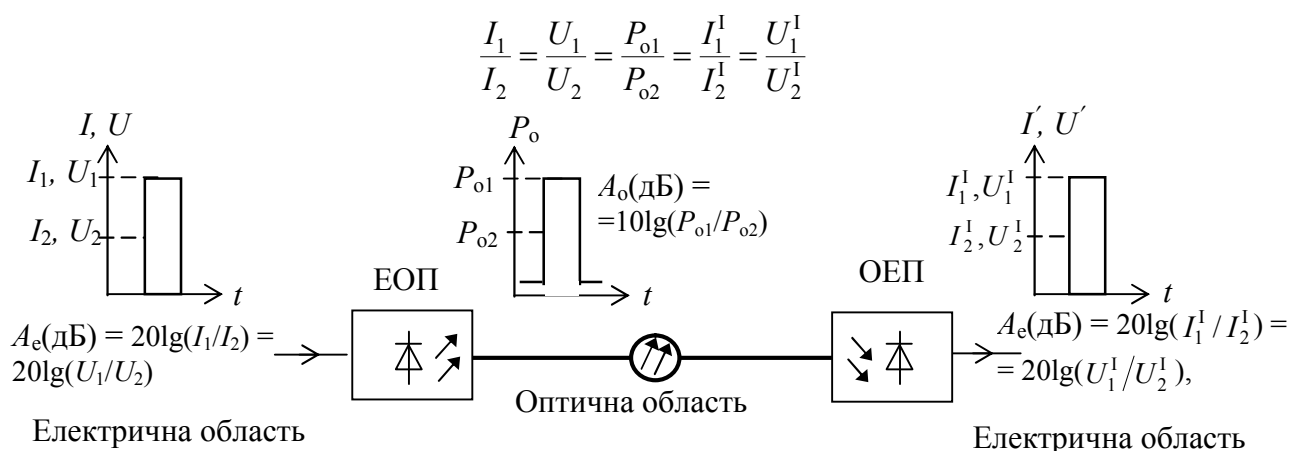


Рисунок Д.8.2 – До розрахунку логарифмічних значень величин в електричній і оптичній областях спектра

Електричні потужності P_{e1} і P_{e2} , що створюються в навантаженні ОЕП внаслідок протікання струмів $I_1 = R_i P_{o1}$ і $I_2 = R_i P_{o2}$, пропорційні квадратам цих струмів, або в логарифмічних одиницях

$$A_e = 10\lg(P_{e1}/P_{e2}) = 10\lg(R_i^2 I_1^2 / R_i^2 I_2^2) = 20\lg(I_1/I_2), \text{ дБ.} \quad (\text{Д.8.8})$$

Порівнюючи формули (Д.8.7) і (Д.8.8) бачимо, що «електричні» дБ у два рази більші за «оптичні» дБ,

$$A_e(\text{дБ}) = 2A_o(\text{дБ}), \quad A_o(\text{дБ}) = A_e(\text{дБ})/2. \quad (\text{Д.8.9})$$

Підтвердимо отримані співвідношення такими прикладами.

Приклад Д.8.4. Розглянемо передавання однакових електричних сигналів спочатку по електричному (рис. Д.8.3), а потім по оптичному (рис. Д.8.4) лінійному тракту. Хай на електричних входах цих трактів присутні два значення струму, наприклад, струм імпульсного сигналу I_c і струм шуму з середньоквадратичним значенням $I_{ш}$. У цифровій системі це можуть бути струми, що відповідають передачі логічних символів 1 і 0. Для простоти приймемо, що відношення сигнал/шум (ВСШ) = $I_c/I_{ш} = 2/1$ або в логарифмічних

одинацях $всш = 20\lg ВСШ = 20\lg(2/1) = 6$ дБ. Відношення електричних потужностей, що створюють ці струми, дорівнює 4:1. У логарифмічних одиницях це відповідає $всш = 10\lg(4/1) = 6$ дБ.

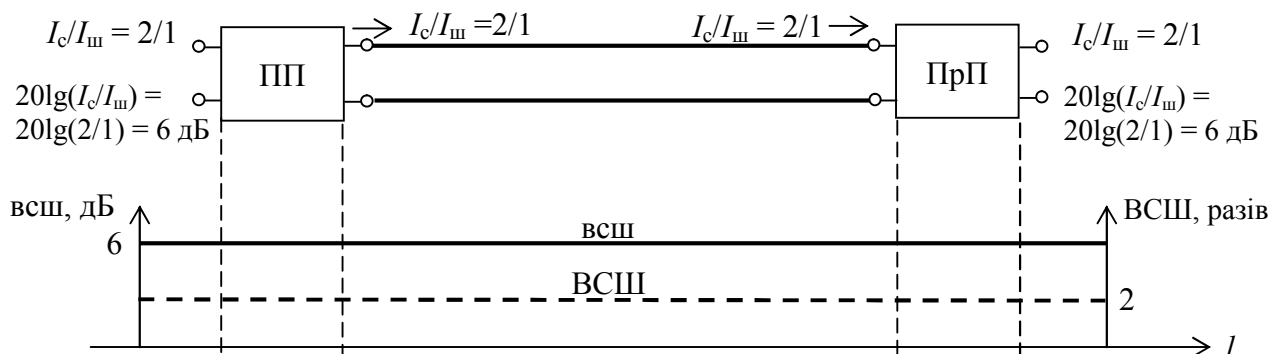


Рисунок Д.8.3 – Схема електричного лінійного тракту (зверху) та діаграма (знизу) ВСШ (разів) і всш (дБ) в ідеальному тракті без власних шумів для випадку, коли на вході $I_c/I_{ш} = 2/1$. ПП та ПрП – передавальний та приймальний пристрої відповідно

Розв'язання.

А. При передаванні по *електричному лінійному тракту* (рис. Д.8.3) без власних шумів значення $ВСШ = 2/1$ (у разях) і в логарифмічних одиницях $всш = 20\lg(2/1) = 6$ дБ не змінюється – відповідні діаграми мають вид прямої лінії.

Б. У разі передавання цих самих сигналів по *оптичному лінійному тракту* (рис. Д.8.4) входні струми в ЕОП лінійно перетворюються в оптичні потужності, так що зберігається відношення оптичних потужностей 2:1 в середовищі передавання (волокні). У логарифмічних одиницях це відповідає $всш = 10\lg(2/1) = 3$ дБ. На виході волокна оптичні потужності в ОЕП лінійно

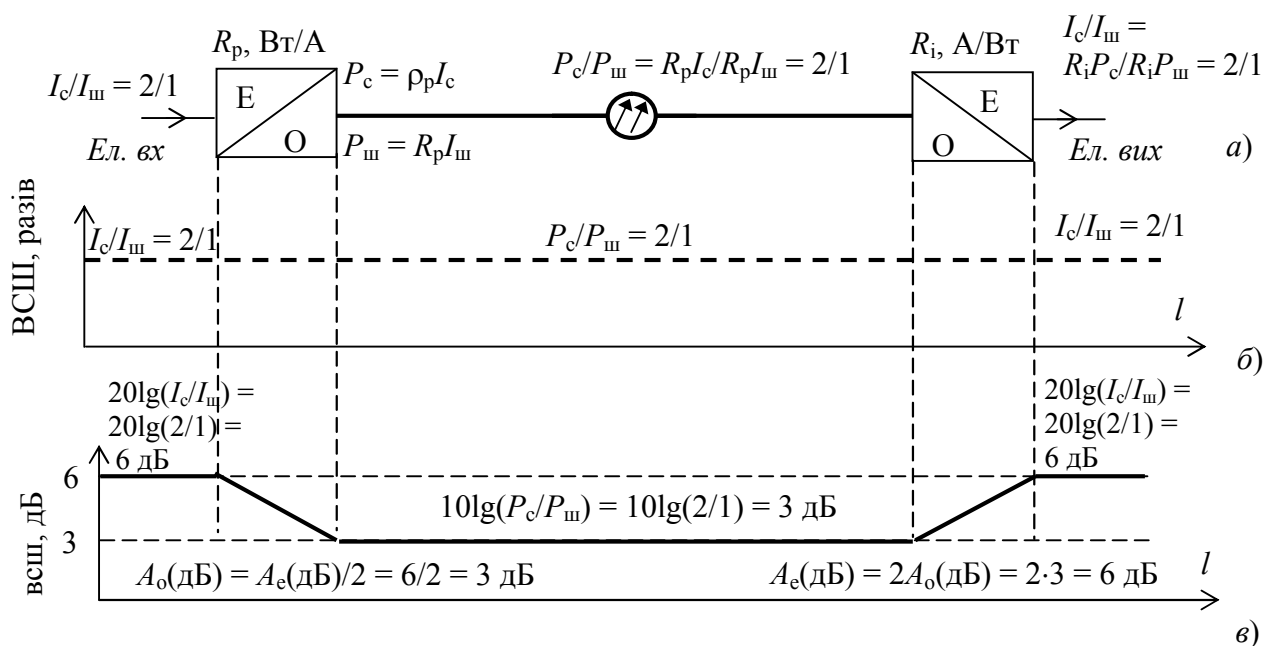


Рисунок Д.8.4 – Схема оптичного лінійного тракту а) та діаграми зміни ВСШ (разів) б) та всш (дБ) в) для ідеального тракту без власних шумів у випадку, коли на вході $I_c/I_{ш} = 2/1$

перетворюються в електричні струми. Графічна ілюстрація цього прикладу наведена на рис. Д.8.4. З діаграми на рис. Д.8.4, б випливає, що при передаванні по ВОЛТ без власних шумів значення $I_{\text{ш}}/I_{\text{ш}}$ в разях не змінюється (чого і слід було чекати). Логарифмічна діаграма (рис. Д.8.4, в) має вид ламаної лінії. При переході з електричної області спектра до оптичної, значення всш (дБ) зменшуються в два рази, а при зворотному переході (з оптичної до електричної) – подвоюються.

Підкреслимо, що в реальних трактах передавання компоненти вносять власні шуми, і аналогічні діаграми матимуть спадаючий характер (ВСП зменшується).

Висновок. При переході від електричної області до оптичної логарифмічні значення ослаблення (підсилення) необхідно зменшити вдвічі, а при переході з оптичної області до електричної – їх необхідно подвоїти.

Приклад Д.8.5. Коефіцієнт загасання α струмопровідних коаксіального (симетричного) кабелів виражається в «електричних» дБ/км, а оптичного – в «оптичних» дБ/км. Розрахуємо значення α електричного (з відношенням $U_1/U_2 = 10/1$) й оптичного (з відношенням $P_{o1}/P_{o2} = 10/1$) кабелів, де U_1 і U_2 – напруги, а P_{o1} і P_{o2} – потужності на початку і кінці обох кабелів довжиною 1 км.

Розв'язання.

Для електричного кабелю $\alpha_e = 20\lg(U_1/U_2) = 20\lg(10/1) = 20$ дБ/км ($\alpha_e = 10\lg(U_1^2/U_2^2) = 10\lg(100/1) = 20$ дБ/км). Для оптичного кабелю $\alpha_o = 10\lg(P_{o1}/P_{o2}) = 10\lg(10/1) = 10$ дБ/км. Висновок – електричний кабель з $\alpha_e = 20$ дБ/км є еквівалентним за втратами потужності оптичному кабелю з $\alpha_o = 10$ дБ/км. Знову приходимо до очікуваного (формула (Д.8.9)) результату – $\alpha_o(\text{дБ/км}) = \alpha_e(\text{дБ/км})/2$.

Д.8.4 Правила виконання розрахунків у логарифмічних одиницях

1. (Тривіальне.) Значення величин, виражених в дБ або дБм, не можна перемножувати і ділити, а тільки підсумовувати і віднімати.

2. Результат C підсумовування (віднімання) двох або більше величин, виражених в дБ, наприклад, A і B , завжди має розмірність дБ (див. формулу (Д.8.3) і приклад Д.8.1)

$$\pm A(\text{дБ}) \pm B(\text{дБ}) = \pm C(\text{дБ}).$$

3. Результат C віднімання двох значень A і B рівнів потужності, виражених в дБм, має розмірність дБ

$$A(\text{дБм}) - B(\text{дБм}) = \pm C(\text{дБ}).$$

Приклад Д.8.6. Потужність передавального пристрою $P_1 = 1$ мВт, чутливість приймального пристрою $P_2 = 1$ мкВт = 0,001 мВт. Визначити бюджет потужності цієї апаратури.

Розв’язання. Відповідні рівні потужності передавального і приймального пристрів дорівнюють $A = 10\lg 1 = 0$ дБм, $B = 10\lg 0,001 = -30$ дБм. Бюджет потужності апаратури $C = A - B = 0$ дБм $- (-30$ дБм) $= 30$ дБм $\equiv 30$ дБ.

Перевірка. $C = A(\text{дБм}) - B(\text{дБм}) = 10\lg(1 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) - 10\lg(0,001 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) = 10\lg(1 \text{ мВт}) - 10\lg(1 \text{ мВт}) - 10\lg(0,001 \text{ мВт}) + 10\lg(1 \text{ мВт}) = 10\lg(1 \text{ мВт}) - 10\lg(0,001 \text{ мВт}) = 10\lg(1 \text{ мВт}/0,001 \text{ мВт}) = 10\lg(1/0,001) = 10\lg 10^3 = 30$ дБ.

4. Підсумовування рівнів потужності (у дБм) суперечить фізичному сенсу. Покажемо це такому прикладі.

Приклад Д.8.7. На кожний з двох вхідних полюсів оптичного суматора без власних втрат (наприклад, розгалужувача Y-типу) подаються потужності $P_1 = P_2 = 10$ мВт. Розрахувати потужність (мВт) і рівень потужності (дБм) на виході суматора.

Розв’язання. Очевидно, слід очікувати на виході суматора $P_3 = P_1 + P_2 = (10 + 10) \text{ мВт} = 20 \text{ мВт}$. Спробуємо розрахувати рівень потужності на виході суматора, користуючись одиницями дБм. Рівні потужності на кожному з вхідних полюсів суматора дорівнюють $A = B = 10\lg 10 = 10$ дБм. Формальний розрахунок рівня потужності на вихідному полюсі суматора дає $C = A + B = 10 \text{ дБм} + 10 \text{ дБм} = 20 \text{ дБм}$. Потенціюванням знаходимо відповідну потужність $P_3 = 10^{C(\text{дБм})/10} = 10^{20/10} = 10^2 \text{ мВт} = 100 \text{ мВт} !!!$. Цей, явно помилковий результат, пояснюється тим, що адитивній операції підсумовування величин, що виражені в логарифмічних одиницях, відповідає мультиплікативна операція множення величин, виражених у фізичних одиницях, а це суперечить умові завдання – підсумовуванню потужностей.

Перевірка. Потужність на виході ідеального суматора $P_3 = P_1 + P_2 = (10 + 10) \text{ мВт} = 20 \text{ мВт}$. Рівень потужності на виході суматора $c = 10\lg[P_3(\text{мВт})] = 10\lg(20) = 10\lg(2 \cdot 10) = 10\lg 2 + 10\lg 10 = 3 \text{ дБм} + 10 \text{ дБм} = 13 \text{ дБм}$ (правильний результат).

Примітка. Операція підсумовування значень в логарифмічних одиницях дБм відповідає операції множення фізичних величин (пристрій множення). В оптичних (фізичних) системах є пристрої, що здійснюють множення і ділення напруженостей електромагнітного поля, але немає фізичних пристроїв, що здійснюють перемножування потужностей.

5. Результат з підсумовування або віднімання двох або більше значень величин, одні з яких виражені в дБм, а інші – в дБ, завжди має розмірність дБм $\pm A(\text{дБм}) \pm B(\text{дБ}) = \pm C(\text{дБм})$.

Приклад Д.8.8. Випромінювання лазера потужністю $P_1 = 2$ мВт вводиться в оптичне волокно (ОВ) з коефіцієнтом загасання $\alpha = 0,2$ дБ/км. Розрахувати рівень потужності на виході ОВ довжиною $l = 100$ км.

Розв’язання. Рівень потужності лазера $A = 10\lg 2 = 3$ дБм. Ослаблення (зменшення потужності) світла в ОВ $B = \alpha l = 0,2 \text{ дБ/км} \cdot 100 \text{ км} = 20 \text{ дБ}$. Рівень потужності на виході ОВ $C = A - B = 3 \text{ дБм} - 20 \text{ дБ} = -17 \text{ дБм}$.

Перевірка. Ослабленню в ОВ в 20 дБ відповідає коефіцієнт передачі за потужністю 10^{-2} . Потужність на виході ОВ $2 \text{ мВт} \times 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ мВт}$. Рівень потужності на виході $c = 10\lg 2 \cdot 10^{-2} = 10\lg 2 - 10\lg 10^{-2} = 3 - 20 = -17 \text{ дБм}$ (правильний результат).

Приклад Д.8.9. Випромінювання лазера потужністю $P_1 = 1 \text{ мВт}$ підсилюється в оптичному підсилювачі в 100 разів. Розрахувати рівень потужності на виході передавального пристрою.

Розв'язання. Рівень потужності лазера $A = 10\lg 1 = 0 \text{ дБм}$. Підсилення оптичного підсилювача $B = 10\lg 100 = 10\lg 10^2 = 20 \text{ дБ}$. Рівень потужності на виході передавального пристрою $C = A + B = 0 \text{ дБм} + 20 \text{ дБ} = 20 \text{ дБм}$.

Перевірка. Потужність на виході передавального пристрою $1 \text{ мВт} \times 100 = 100 \text{ мВт}$. Рівень потужності $C = 10\lg 100 = 10\lg 10^2 = 20 \text{ дБм}$ (вірний результат).

Приклад Д.8.10. Розрахувати коефіцієнт передачі за потужністю ідеального (без втрат) зіркоподібного розгалужувача типу $1 \times N$. Потужність, що надходить на вхідний порт такого розгалужувача, ділиться в рівній мірі між N вихідними портами.

Розв'язання. Коефіцієнт передачі потужності зіркоподібного розгалужувача $1 \times N$ дорівнює $10\lg N$. Його значення для $N = 4 \dots 128$ наведені в табл. Д.8.2.

Таблиця Д.8.2 – Залежність коефіцієнта передачі зіркоподібного розгалужувача від кількості вихідних портів N

N	4	8	16	32	64	128
$A, \text{ дБ}$	6	9	12	15	18	21

Навчальне видання

**Кись О.М.,
Корнійчук В.І.**

**ПРОЕКТУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ
ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ**

Навчальний посібник

з курсового та дипломного проектування

для студентів, що навчаються за напрямом «Телекомунікації»

Редактор

Терземан В.В.

Комп'ютерне верстання
та макетування

Гардиман Ж.А.

Здано до складання 9.07.2014. Підписано до друку 24.08.2014.

Обсяг 5,75 друк. арк. Формат 60x88/16 Зам. №

Наклад 50 прим.

Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO

у друкарні редакційно-видавничого центру ОНАЗ ім. О.С. Попова

Україна, 65029, м. Одеса, вул. Ковалевського, 5

ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014