

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Щекотихін О.В., Дмитренко В.П., Єфименко М.В., Проскурін М.П.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

(частина 1)

Навчальний посібник

для студентів закладів вищої освіти, які навчаються по спеціальностям
«Телекомунікації та радіотехніка», «Комп'ютерна інженерія»,
«Автоматизація та комп'ютерно - інтегровані технології»,
«Комп'ютерні науки та інформаційні технології» і їх суміжним
напрямам.

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2022

УДК 621.391.6 (075.8)
В68

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного університету «Запорізька політехніка»
(протокол № 10 від 29.06. 2022 р.)*

Рецензенти:

Лисенко Г. Л. – кандидат технічних наук, професор;
Корнійчук В.І. – кандидат технічних наук, доцент.

В68

Щекотихін О.В.

Волоконно-оптичні системи передачі інформації (ВОСП):
навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів /
О.В. Щекотихін, В.П. Дмитренко, М.В. Єфименко, М.П.
Проскурін – Запоріжжя. : НУ «Запорізька політехніка», 2022.-
114 с.

ISBN 978-617-529-394-2

Навчальний посібник складено з метою більш глибокого забезпечення аудиторної, дистанційної і самостійної роботи при вивченні дисципліни «ВОСП»; частина1 акцентує свою увагу на розгляді особливостей транспортних (раніш - магістральних) мереж і технологій.

Призначено для студентів закладів вищої освіти усіх форм навчання по спеціальностям 172 - «Телекомунікації та радіотехніка», 123 -«Комп'ютерна інженерія», а також може бути використаний при вивченні відповідних дисциплін спеціальностей 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 122 - «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» і суміжним їх напрямам.

Окрема подяка бувшому колезі к.т.н. В.П. Дмитренку, доц. каф. РТК за поради з якості перекладу навчального посібника на українську мову.

УДК 621.391.6 (075.8)

ISBN 978-617-529-394-2

© Щекотихін О.В., 2022
© Дмитренко В.П., 2022
© Єфименко М.В., 2022
© Проскурін М.П., 2022
© Національний університет
«Запорізька політехніка», 2022

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АМ - амплітудна модуляції
АОЛТ - аналоговий оптичний лінійний тракт
АПД - автономне первинне джерело
АТС - автоматична телефонна станція
АЦП - аналого-цифровий перетворювач
БТ - біполярний транзистор
ВЗЗ - від'ємний зворотній зв'язок
ВКР - вимушене комбінаційне розсіювання (раманівське)
ВМБР - вимушене розсіювання Мандельштамма-Бріллюена
ВОЛЗ - волоконно-оптична лінія зв'язку
ВОП - волоконно-оптичний підсилювач
ВОСПІ - волоконно-оптичні системи передачі інформації
ВП - вирішувальний пристрій
ВСШ - відношення сигнал/шум
ВТЧ - виділення тактової частоти
ДВ - джерело випромінення
ДЖ - дистанційне живлення
ЕОВ - ербієве оптичне волокно
ЕОП - електронно-оптичний перетворювач
ЕРС - електрорушійна сила
КЕМ - квантовий електронний модуль
ККД - коефіцієнт корисної дії
ЛАЦ - лінійно-апаратний цех
ЛД - лазерний діод
ЛП - лінія передачі
ЛТр - лінійний ретранслятор
ЛФД - лавинний фотодіод
МТС - міська телефонна станція
МЧР - мультиплексування з частотним розділенням (FDM)
НПЛП - напівпровідниковий лазерний підсилювач
НРП - необслуговуваний регенераційний пункт
ОА - обмежувач амплітуди
ОБС - одна бокова смуга
ОВ - оптичне волокно
ОД - оптичний демультиплексор

ОЕП - оптоелектронний перетворювач
ОЗ - оптичний змішувач
ОІ - оптичний ізолятор
ОК - оптичний кабель
ОКГ - оптичний квантовий генератор
ОЛТ - оптичний лінійний тракт
ОМ - оптичний модулятор
ОМп - оптичний мультиплексор
ОП - оптичний підсилювач
ОПер - оптичний передавач
ОПпр - оптичний приймач
ОЦК - основний цифровий канал
ПКД - пристрій компенсації дисперсії
ПМД - поляризаційна модова дисперсія
ПО - пристрій об'єднання
ПОМ - пасивна оптична мережа
ПТ - польовий транзистор
ПЦК - первинний цифровий канал
ОРП - обслуговуваний регенераційний пункт
ОС - оптичний солітон
ОЦК - основний цифровий канал (DSO)
ПР - пристрій розділення
РІТЕГ - радіоізотопний термоелектрогенератор
СД - світлодіод
СДЖ - система дистанційного живлення
СОК - станційний оптичний крос
ССВ - солітон-солітонна взаємодія
СЦ - синхронна цифрова ієрархія
ТЕГ - термоелектричний генератор
УЛТ - устаткування лінійного тракту
УБЖ - установка безперебійного електроживлення
ФД - фотодіод
ФСМ - фазова саомодуляція (самофокусування)
ЦАП - цифроаналоговий перетворювач
ЦДМ - цифровий демультимплексор
ЦМ - цифрове мультиплексування

ЦОЛТ - цифровий оптичний лінійний тракт
ЦРт - цифровий ретранслятор
ASE - підсилене спонтанне випромінення (Amplified Spontaneous Emission)
ATM - асинхронний метод переносу повідомлень (Amplified Spontaneous Emission),
DCF - волоконні компенсатори дисперсії (Dispersion Compensation Fifer)
DWDM - щільне спектральне ущільнення (Dence WDM)
EDFA - підсилювач на кремнійовому волокні, легованому ербієм (Erbium Doped Fiber Amplifier)
FBG - волоконно-оптичні брегівські решітки, компенсатори дисперсії (Fiber Bragg Grating)
FDM - частотне мультиплексування (Frequency Division Multiplexing)
HDWDM - високощільне спектральне ущільнення (Higher Dence WDM)
ITU_T - міжнародний комітет з електрозв'язку (International Telecommunication Union _ Telecommunication sector)
MDM - модове ущільнення каналів (Mode Division Multiplexing)
PDH - плезіохронна цифрова ієрархія (Plesiochronous Digital Hierarchy)
PDM - ущільнення за поляризацією (Polarization Division Multiplexing)
PON - пасивна оптична мережа (Passive Optic Network)
SDH - синхронна цифрова передача (Synchronous Digital Hierarchy)
SF - режим «збереження-і-передача» (Store-and-Forward)
SRS - стимульоване раманівське розсіювання (Stimulated Raman Scattering)
STM - синхронний режим передачі (Synchronous Transfer Mode)
TDM - часове розділення каналів (Time Division Multiplexing)
VC - віртуальний канал (Virtual Circuit або Virtual Channel)
WDM - ущільнення за довжинами хвиль (Wavelength Division Multiplexing)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ЕТАПИ РОЗВИТКУ ВОСПІ.....	10
1.1 Історичний нарис.....	10
1.2 Етапи розвитку ВОСПІ.....	18
2 ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ МЕРЕЖІ.....	26
2.1 Приклад пакету послуг, які надає мережа доступу.....	28
3 СХЕМА ВОСПІ, ЇХ РІЗНОВИДИ, СТРУКТУРА І ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ.....	31
3.1 Загальна інформація.....	31
3.2 Структура і основні компоненти ВОСПІ.....	32
3.3 Принципи роботи передавальної частини ВОЛЗ.....	33
3.4 Принципи роботи приймальної частини ВОЛЗ.....	34
4 МАГІСТРАЛЬНІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ВОСПІ.....	35
4.1 Мережі PDH.....	35
4.1.1 Особливості технології PDH.....	36
4.1.2 Плезіохронний метод цифрової передачі інформації..	37
4.1.3 Ієрархія швидкостей передачі.....	38
4.1.4 Схеми плезіохронної цифрової ієрархії.....	40
4.1.5 Обмеження технології PDH.....	43
4.1.6 Вітчизняні ЦВОСПІ другого покоління.....	44
4.2 Мережі SDH.....	46
4.2.1 Особливості синхронної ієрархії.....	47
4.2.2 Переваги та недоліки SDH.....	48
4.2.3 Ієрархія швидкостей.....	49
4.2.4 Синхронізація систем з SDH.....	51
4.2.5 Типові топології SDH.....	54
4.2.6 Типи устаткування систем SDH.....	58
4.2.7 Стек протоколів SDH.....	60
4.2.8 Структура кадру STM-N.....	61
4.2.9 Методи забезпечення живучості мережі.....	64
4.2.10 Переваги мереж SDH перед плезіохронними цифровими системами передачі.....	71

5 МЕРЕЖІ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ УЩІЛЬНЕННЯМ	79
5.1 Класифікація систем з WDM.....	79
5.2 Мережі CWDM	80
5.3 Мережі DWDM	81
5.3.1 Особливості частотного плану систем DWDM	83
5.4 Принципи роботи DWDM систем в складних мережах	84
5.5 Типові топології систем DWDM.....	85
5.6 Особливості устаткування систем DWDM	87
5.6.1 Джерела випромінення.....	88
5.6.2 Мультиплексери вводу/виводу.....	89
5.6.3 Оптичні крос-конектори.....	91
5.6.4 Оптичні транспондери.....	92
5.6.5 Особливості оптичних волокон.....	93
5.6.6 Особливості ретрансляторів і підсилювачів DWDM ..	95
5.7 Технологія OTN і використання DWDM мереж в ній	95
6.1 СОЛІТОННІ МЕРЕЖІ.....	102
6.1.1 Загальні властивості	102
6.1.2 Можливості існування оптичного солітону	103
6.1.3 Принципи побудови солітонних ВОСПІ	107
6.1.4 Перспективи використання солітонних ліній зв'язку	109
6.1.5 Експериментальні солітонні лінії зв'язку.....	111
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	113

ВСТУП

Друга половина ХХ-го сторіччя запам'яталась очевидцям тим, що в галузь електрозв'язку стрімко увірвався новий напрямок, який зв'язано з останніми досягненнями в галузі волоконно-оптичних систем передачі інформації. Це дозволило виготовляти та практично застосовувати засоби зв'язку з практично необмеженою пропускною здатністю і дальністю передавання. Масове їхнє використання призвело до інформаційно-технологічної революції і формування глобального інформаційного суспільства.

В даний час волоконно-оптичні лінії зв'язку міцно займають свої позиції й інтенсивно розвиваються. Видатні технологічні ідеї приходять саме тоді, коли в них виникає практична потреба, і це в значній мірі стосується волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Статистичні дані показують, що при числі каналів більше 10 тисяч ВОЛЗ більш економічні за радіорелейні лінії і супутникові системи зв'язку. На частку ВОЛЗ в системах дальнього зв'язку приходиться 60...70% каналів, а на частку супутникових і радіорелейних ліній – 30...40%.

У світі телекомунікацій відбувається стрімкий перехід від багатомодових до одномодових оптичних волокон (ОВ), збільшується число ОВ у кабелях, розширюється асортимент оптичних елементів. Лінії оптичного зв'язку працюють сучасним станом в інфрачервоному діапазоні здебільше на довжинах хвиль 1,3 мкм та 1,55 мкм. Це дозволяє збільшувати довжину ділянок регенерації та швидкість передавання.

Але наукові дослідження в цій галузі дають обґрунтовані надії на отримання таких параметрів ліній передачі на основі оптичних волокон, які раніше могли сприйматися лише як наукова фантастика. Зокрема, дослідження по переходу в далекий інфрачервоний діапазон з довжинами хвиль більше 2 мкм та застосуванням скла з добавками рідкоземельних хімічних елементів, показують принципову можливість суттєвого (до десятків і сотень раз) зменшення втрат в світловодах. Це дасть можливість будувати оптичні лінії навіть досить далекого зв'язку

взагалі без застосування регенераційних пунктів на трасі. Такі лінії оптичного зв'язку будуть мати якісні економічні параметри як в плані здешевлення апаратурної частини, так і в плані їх технічного обслуговування.

Стрімкими темпами йде заміна кабелів з металевими жилами на волоконно-оптичні кабелі на всіх ділянках мереж, у тому числі і на абонентських лініях міста і села. Перспективними є наземні і підводні ВОЛЗ. Тривалий термін служби (25 років і більше) та підвищена захищеність системи зв'язку від несанкціонованого доступу та метеорологічних умов також є перевагами ВОЛЗ.

У глобальній мережі зв'язку 60% ліній займають наземні і підводні ВОЛЗ. Обсяг використання різних видів кабелів і проводів у світі збільшився за останні роки на 17%, а волоконно-оптичних – на 110%. Більш того, керівними документами деяких розвинених країн взагалі не рекомендовано розробляти нові системи зв'язку (в першу чергу далекого) з використанням металевих кабелів.

Продовжується стрімкий розвиток волоконно-оптичних і квантово-оптичних технологій для ВОЛЗ. Стрімкий розвиток промислової технології оптичних пристроїв дає обґрунтовані надії на те, «що сьогодні ще є наукою, завтра стає вже технікою». Зокрема, в останні роки для збільшення довжини регенераційних ділянок магістральних ВОСПІ активно досліджуються волоконні оптичні підсилювачі та пристрої хвильового ущільнення, проводяться інтенсивні дослідження щодо подальшого розвитку ВОСПІ, впроваджуються в практику нові типи оптичних волокон, фотонних кристалів та солітонних мереж.

Перераховані обставини примушують пред'являти все більш високі вимоги до фахівців, які розробляють, впроваджують і обслуговують сучасне телекомунікаційне устаткування, у тому числі і до молодих фахівців, які отримують освіту у ВНЗ України.

Навчальний посібник складено у відповідності до програми курсу «Волоконно-оптичні системи передачі інформації» (ВОСПІ) для студентів, які навчаються за напрямками «Радіотехніка», «Інформаційні мережі зв'язку» та «Комп'ютерні системи та мережі» .

1 ЕТАПИ РОЗВИТКУ ВОСПІ

1.1 Історичний нарис

В останні два десятиріччя ХХ-го та початку ХХІ-го сторічч відбувається зміна епохи індустріально-технологічного розвитку передових держав світу епохою інформаційно-технічною. Яскравою проявою цього процесу є революційний за швидкістю та результатами прогрес в створенні нових методів та засобів телекомунікацій. Бурхливий розвиток технології виробництва систем та засобів зв'язу з практично необмеженою пропускну здатністю і дальністю передачі та масове їх застосування за сутністю призвели до інформаційно-технологічної революції та формування глобального інформаційного суспільства. Сучасним станом телекомунікації - це одна із швидко розвиваних високотехнологічних та наукоємних галузей світової економіки. Рівень розвитку технологічних розробок, виробництва та впровадження в різні сфери діяльності телекомунікаційних систем багато в чому формують позитивний образ передової держави.

Такий розвиток подій став можливим внаслідок широкого практичного використання досягнень фундаментальних наук - це передусім фізики, хімії та математики, а також комп'ютерних технологій. Створення елементної бази сучасних волоконно-оптичних систем передачі інформації (ВОСПІ) та технології їх серійного виробництва засновано на практичному застосуванні таких відкриттів в області фізики та таких розділів математики, які ще зовсім недавно вважалися прерогативою найбільш високих кіл «чистої науки». На швидке практичне використання цих досягнень не сподівалась ні широка громадськість ні навіть інколи і самі автори цих відкриттів. В дійсності виявилось, що до створення сучасних телекомунікаційних систем та комп'ютерних технологій причетні майже всі відомі фізики минулого та сучасності: від Ньютона і Гюйгенса, Френеля і Декарта до більшості Нобелівських лауреатів по фізиці - від М.Планка і А.Ейнштейна до А.М.Прохорова, Ч.Таунса, Н.Г.Басова та Ж.І.Алферова.

В професійний лексикон фахівців, які працюють в сфері ВОСПІ вийшли такі терміни, як кванти, електрони, фотони, ферміони і бозони, екситони, які раніше в своїй діяльності застосовували лише професійні фізики-теоретики. Сучасні ВОСПІ - це можна сказати концентратор практичного використання самих глибинних досягнень фундаментальних наук, яскрава демонстрація їх практичної необхідності та корисності.

Поштовхом до розвитку ВОСПІ є винахід в 1960 р. А.М.Прохоровим, П.Г.Басовим (СРСР) та Ч.Таунсом (США) квантового генератора оптичного випромінення - лазерів (аббревіатура із перших літер англійської назви оптичних квантових генераторів світла (ОКГ) - Light Amplification by the Stimulation Emission of Radiation). З 1962 р. почалось серійне виробництво ОКГ (так в СРСР називали ці прибори до початку 70-х років), а в 1965 р. в Московську міську телефонну мережу було ввімкнено одну із перших у світі оптичну лінію зв'язку протяжністю 4,7 км між одним із центральних вузлів зв'язку (Зубівська площа) та будівлею МДУ ім. М.В. Ломоносова. По цій лінії за допомогою лазерного проміння з довжиною хвилі 0,628 мкм (червоне світло), який поширювався в атмосфері (повітрі) передавалось методом ІКМ 12 телефонних каналів. За сутністю це була перша оптична з'єднувальна лінія міської телефонної мережі. Устаткування для цієї лінії та систему в цілому було розроблено в Центральному НДІ зв'язку. До початку 70-х років ХХ-го сторіччя в СРСР вже працювало декілька лазерних атмосферних ліній зв'язку. Керівництво розробками та експлуатацією цими лініями здійснювалось також ЦНДІ зв'язку.

В 1970 р. компанією CORNING (США) було створено оптичне волокно з малими (на той час) кілометричними втратами (менше 20 дБ/км на довжині хвилі 0,85 мкм). В цьому ж році співробітниками Ленінградського фізико-технічного інституту під керівництвом Ж.І.Алферова було розроблено напівпровідникові прибори на основі подвійних гетероструктур і в тому числі - напівпровідникові лазери, які працювали в неперервному режимі при кімнатній температурі. З цього моменту почався швидкий розвиток ВОСПІ, як окремої галузі

загальної системи зв'язку. До середини 70-х років ХХ-го сторіччя втрати в оптичних волокнах було знижено до 2,5...3 дБ/км в першому вікні прозорості (780...870 нм) оптичного діапазону та в США, СРСР, Японії, Англії, Франції, Німеччині було побудовано перші комерційні волоконно-оптичні системи (звичайно, цифрового типу) зі швидкостями передачі 2,048, 8,848 та 34 Мбіт/с, а також системи кабельного телебачення. Ці системи працювали в діапазоні 1280...1360 нм по багатомодовим оптичним волокнам. Багатомодові волокна мають досить вузьку смугу пропускання - не більше 1200...1600 МГц/км, що навіть на той час вже було недостатньо. За цією причиною зусилля дослідників було спрямовано на створення одномодових оптичних волокон, які забезпечують набагато ширшу смугу пропускання. В результаті вже в кінці 70-х років було отримано та освоєно в серійному виробництві одномодові волокна зі сталою втрат на рівні 0,2 дБ/км на довжині хвилі 1550 нм (третє вікно прозорості). В цей же період було розроблено та освоєно в серійному виробництві напівпровідникові лазери та фотоприймачі, які працювали в цьому ж вікні прозорості. З такою елементною базою було побудовано магістральні ВОСПІ з довжиною більше 1000 км при швидкості передачі 155 Мбіт/с.

Одночасно з розвитком оптичних та квантових елементів для ВОСПІ швидкими темпами здійснювалось вдосконалення цифрових методів передачі інформації та елементної бази для реалізації цих методів. На основі цієї елементної бази було розроблено плезіохронні системи передачі (PDH), які успішно використовувались до 90-х років ХХ-го сторіччя. Альтернативою плезіохронному методу, який вичерпав свої можливості, стала розробка та впровадження методу синхронної цифрової передачі (SDH). Швидкість 155 Мбіт/с - це перша швидкість з якої почалось впровадження синхронного методу часового ущільнення цифрових сигналів. Потім було досягнуто значення швидкостей передачі 622Мбіт/с, 2,51Гбіт/с, 10Гбіт/с. Сучасним станом швидкість передачі синхронним методом доведено до граничної для електроніки величини 40 Гбіт/с. Для перерахованих швидкостей передачі міжнародним комітетом з

електров'язку - МСЕ-Т (ITU-T) було розроблено наступну класифікацію ієрархій швидкостей: синхронна цифрова ієрархія (СЦІ, або SDH в англійському варіанті) - СТМ-1 (155 Мбіт/с), СТМ-4 (622 Мбіт/с), СТМ-16 (2,5 Гбіт/с), СТМ-64 (10 Гбіт/с), СТМ-256 (40 Гбіт/с). За винятком СТМ-1, всі інші рівні ієрархії СЦІ призначено для передачі тільки по ВОСП. В результаті такого активного розвитку пропускну здатність ВОСП збільшено на декілька порядків. При цьому багатократно зросла і дальність передачі.

Дякуючи різкому покращенню параметрів систем передачі не тільки докорінно зросла якість традиційних послуг галузі зв'язку, але з'явилися і нові послуги: цифрове телебачення покращеної чіткості, інтерактивне кабельне ТБ, відеоконференції, передача технологічної, комерційної, банківської інформації, мережа інтернет, електронна пошта і т.д.. Зростання якості та кількості послуг зв'язку супроводжується експоненційним зростанням кількості користувачів цих послуг - абонентів. Ці фактори призводять до необхідності подальшого підвищення пропускну здатності систем передачі. Повсюдне поширення цих послуг в свою чергу вимагає збільшення дальності передачі.

Окрім того, забезпечення високоякісних послуг зв'язку при постійному збільшенні кількості абонентів робить актуальною проблему підвищення ефективності та гнучкості керування мережами зв'язку. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми виявилася розробка та впровадження асинхронного методу переносу повідомлень - АТМ, який останнім часом отримує все більше поширення як в магістральних транспортних мережах, так і в мережах доступу.

Потреба в подальшому нарощуванні пропускну здатності систем передачі інформації в свою чергу стимулювала дослідження в напрямку пошуку нових методів вирішення цієї задачі. Одним із надзвичайно ефективних вирішень поставленої задачі є збільшення пропускну здатності за допомогою ущільнення оптичних каналів за довжинами хвиль оптичного випромінення - WDM (Wavelength Division Multiplexing), в російській документації - ВОСП-СР. Застосування цього методу

дозволяє підвищити пропускну здатність волоконно-оптичних систем до величини більшої 10 Тбіт/с, що вже перевищує сучасні потреби, отже знімає проблему на найближчі 3...5 років.

В свою чергу, для реалізації ущільнення оптичних каналів за довжинами хвиль (або методу спектрального розділення) було розроблено такі нові оптичні елементи, як оптичні мультиплексори та демультиплексори, оптичні фільтри, напівпровідникові лазери з малою шириною лінії випромінення на заданій довжині хвилі, методи та засоби, які забезпечують необхідну стабільність оптичної частоти, оптичні підсилювачі з широкою смугою підсилення і цілий ряд других елементів.

Вже відмічено, що здійснюється швидке розширення територій, на яких проживають або розміщено користувачів послуг зв'язку. За цією причиною продовжує залишатися актуальною необхідність збільшення дальності передачі. Сучасним станом цю задачу також можна вважати практично вирішеною, дякуючи впровадженню оптичних та квантово-оптичних технологій. Вирішення поставленої задачі здійснювалось за наступними напрямками:

- було розроблено нові типи оптичних волокон з таким значенням сталої затухання, яке є близьким до теоретичної межі, з великою ефективною площею поперечного перетину та малим значенням коефіцієнту хроматичної дисперсії;

- створено та освоєно в серійному виробництві оптичні підсилювачі різних типів, що дозволило різко підвищити потужність оптичних сигналів на лінії і компенсувати втрати в оптичному волокні;

- створено ефективні компенсатори хроматичної дисперсії.

Використання цієї елементної бази дозволяє збільшувати довжину регенераційних ділянок магістральних систем передачі до 1000...1500 км. Вражаючі результати прогресу магістральних ВОСПІ не мали б сенсу без відповідного розвитку мереж доступу різних рівнів, зокрема, абонентські ділянки. Сучасним станом найбільші зусилля дослідників і розробників елементів та обладнання для ВОЛЗ спрямовано на впровадження оптичних технологій в мережі доступу. Незважаючи на те, що історично

міські мережі доступу були першим об'єктом впровадження волоконно-оптичних технологій, на протязі досить тривалого періоду часу основну увагу було прикуто до розвитку магістральних мереж зв'язку. Разом з тим, проблему доведення оптичного волокна (точніше, оптичного кабеля) до абонента, яка виразилася в концепції «волокно в хату» (FTTH), або «остання миля» було поставлено давно, але до кінця навіть сьогодні не доведено. Сучасні мережі доступу розвиваються за двома напрямками: мережі загального користування та корпоративні мережі. Необхідно відмітити, що вирішення проблеми «волокно в хату» сучасним станом стримується головним чином за економічними причинами, оскільки чисто технічних проблем в цьому аспекті практично не існує. В усякому випадку, технічні проблеми в основному зведено до зниження вартості елементної бази, обладнання та зниження вартості робіт при будівництві та налагодженні (інсталяції) систем доступу.

Сучасним станом значні успіхи в використанні оптичних технологій спостерігаються в розвитку корпоративних мереж доступу в порівнянні з абонентами мереж доступу загального користування. В сучасних корпоративних мережах доступу основними протоколами, які забезпечують необхідні послуги зв'язку, є Ethernet, E-mail, IP-телефонія, ширококутний доступ в Internet і телефакс. Необхідно наголосити, що коли в перших комп'ютерних мережах довжини з'єднувальних ліній не перевищували сотні метрів і швидкість передачі біля 10 Мбіт/с, то в сучасних комп'ютерних мережах (Ethernet) їх довжини можуть бути порядку тисяч км, а швидкість передачі досягає 10 Гбіт/с. Очевидно, що такі результати могло бути досягнуто тільки дякуючи застосуванню волоконно-оптичних технологій.

Різке підвищення пропускної здатності з'єднувальних ліній в корпоративних мережах доступу при одночасному збільшенні відстаней здійснюється як шляхом підвищення швидкості електронного мультиплексування за часом, так і при використанні технологій ущільнення оптичних каналів за довжинами хвиль - WDM. Застосування технологій спектрального ущільнення в оптичних мережах доступу не тільки

збільшує пропускну здатність, але і підвищує ефективність та гнучкість керування. Для цього було розроблено відповідні оптичні елементи: оптичні хвильові комутатори, маршрутизатори, хвильові конвертори і другі пристрої, які дозволяють проводити оперативне та гнучке конфігурування оптичних мереж.

Для підвищення економічної ефективності міських оптичних мереж доступу, в тому числі абонентських ділянок в мережах загального користування, активно впроваджується технологія Passive Optical Network (PON) - пасивна оптична мережа (ПОМ). Як витікає із назви, ПОМ складено тільки із пасивних елементів: оптичного кабелю із з'єднувальними муфтами, відгалужувачів, розгалужувачів, оптичних мультиплексорів і демультимплексорів, оптичних фільтрів, оптичних ізоляторів та деяких других елементів. Всі перераховані елементи не вимагають підведення до них електричного живлення і не потребують обслуговування. Окрім того, на відміну від активних елементів (лазерів, оптичних підсилювачів і фотоприймачів), пасивні елементи (частіше всього) відрізняються низькою вартістю.

Для вирішення цієї ж задачі - зниження вартості оптичних мереж доступу - знову все ширше починають використовуватися багатомодові оптичні волокна. Незважаючи на те, що ці волокна дещо дорожчі, ніж одномодові, вони дозволяють використовувати недорогі багатомодові випромінювачі та фотоприймачі. Окрім того, великий діаметр осердя багатомодового волокна суттєво зменшує вимоги на допуски до оптичних з'єднувачів, а в результаті знижується вартість проведення монтажних робіт при прокладанні оптичного кабелю. Багатомодові волокна в оптичних мережах доступу, зокрема в ПОМ, застосовуються в таких з'єднувальних лініях, довжина яких не перевищує декількох км, що звичайно і має місце в міських мережах.

Відродження цікавості до використання багатомодових волокон зумовлено також тією обставиною, що в 70-ті, 80-ті роки ХХ-го сторіччя в містах багатьох країн (в тому числі і в Україні) було прокладено велику кількість оптичних кабелів з

багатомодовими ОВ. Як показали дослідження, виконані деякими компаніями, зокрема, Corning та Lucent Technologies, за 20 років експлуатації параметри волокон в цих кабелях практично не змінилися. Частина з них не завантажено повністю і за цією причиною, враховуючи тенденції розвитку мереж доступу з дільницями ПОМ, використання раніше прокладених оптичних кабелів стає досить актуальним. Окрім багатомодових волокон, відроджується також інтерес до використання першого вікна прозорості (780...850 нм), що також зв'язано з більш низькою вартістю випромінювачів та фотоприймачів, які працюють в цьому діапазоні хвиль. Використання оптичних кабелів з багатомодовими волокнами спрямовано на розвиток перш за все абонентських дільниць мереж загального користування. Разом з тим є намагання до використання найновіших фотонних та солітонних технологій, яке концентрується на впровадженні їх як на корпоративних, так і в мережах доступу загального користування.

Стрімкий розвиток волоконно-оптичних та квантово-оптичних технологій для ВОЛЗ продовжується. В останні 2-3 роки для збільшення довжини регенераційних секцій магістральних ВОСП активно впроваджуються волоконні оптичні підсилювачі новітнього типу. Принцип їх роботи засновано на нелінійному оптичному явищі - вимушеному комбінаційному розсіюванні (в російськомовній літературі радянського періоду - ВКР, в зарубіжній - SRS-Stimulated Raman Scattering). Часто їх звать Раманівськими підсилювачами. Проводяться інтенсивні дослідження нового типу оптичних волокон - це так звані мікроструктуровані волокна та фотонні кристали; прогнозують, що на їх основі буде створено нові типи оптичних елементів.

Сучасним станом в Україні ведеться активне будівництво ВОСП, отримують розвиток як магістральні (зі спектральним розділенням оптичних каналів), так і міські оптичні мережі доступу, в тому числі і ПОМ. Швидкими темпами зростає кількість користувачів Internet та Ethernet. Обладнання, яке надходить в ці мережі, з кожним роком стає все більш

наукоємним, а звідси витікає, що все більш високі вимоги пред'являються до фахівців, які встановлюють, налагоджують та обслуговують як саме обладнання, так і системи в цілому.

1.2 Етапи розвитку ВОСП

Сучасним станом у всьому світі засоби телекомунікації переживають період дуже широкого впровадження ВОЛЗ в практику. Стрімкий процес інформатизації суспільства з'явився головною причиною широкого використання волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) на інформаційних мережах різного призначення. Тут можна виділити декілька етапів розвитку цього напрямку сучасних систем зв'язку; цей напрямок став окремою галуззю сучасного життя людини-користувача послуг зв'язку.

1 етап. В середині 70-х років ХХ-го сторіччя з'явилися напівпровідникові лазери та волоконні хвилеводи з відносно невеликим значенням сталої затухання. Перші лазери для ВОЛЗ працювали на довжині хвилі випромінення 0,85 мкм (перше вікно прозорості) і невисоку ефективність; волоконні світловоди були багатомодовими та мали значення сталої затухання порядку десятків дБ/км. За цією причиною ВОЛЗ, хоча і показали певні переваги перед системами на мідних проводах, але мали швидкості та відстані передачі далекими від очікуваних. Збільшенню швидкості передачі в перших ВОЛЗ заважала модова дисперсія проходження оптичного сигналу по тракту.

2 етап. Наступним етапом розвитку ВОЛЗ стало збільшення дальності передачі інформації. Для цього було необхідно знизити величину сталої затухання оптичного сигналу в волоконному тракту. Розробка приймально-передавальної апаратури, яка працювала у другому вікні прозорості (1,3 мкм) дозволила досить суттєво знизити значення сталої затухання в багатохвильових волокнах зі значення 3 дБ/км (0,85 мкм) до значення 1 дБ/км (1,3 мкм). Одночасно в багатомодових волокнах було збільшено і значення смуги пропускання до 500 МГц/км.

Ці досягнення дозволили замінити в плезіохронних системах передачі (ПСП) мідні проводи на оптоволокна та збільшити довжину регенераційних дільниць. Зауважимо, що зменшення витрат міді на забезпечення потреб галузі зв'язку вже саме по собі є досить позитивним явищем, оскільки запаси міді на планеті Земля стрімко скорочуються, що і зумовлює сучасним станом досить гострий її дефіцит. В той же час, запаси кремнію, який є основою технологічного процесу виробництва оптоволоконних виробів, на планеті Земля практично нічим не обмежено навіть у досить далекій перспективі.

3 етап. Подальший розвиток ВОЛЗ в напрямі забезпечення доктрини «швидко та далеко» міцно зв'язано з одномодовим етапом в історії розвитку ВОЛЗ. Одномодові волокна дозволили значно підвищити швидкість передачі інформації, перш за все за рахунок відсутності міжмодової дисперсії, як явища взагалі. І в той же час, перехід в третє спектральне вікно (1,55 мкм) дозволив знизити значення сталої втрат в одномодових волокнах зі значення 0,7...0,8 дБ/км (друге вікно, 1,31 мкм) практично до значення 0,2 дБ/км в третьому вікні (1,55 мкм).

В результаті вдалося досягти подальшого збільшення довжини регенераційних дільниць. Відкрилися можливості і по нарощуванню швидкості та дальності передачі інформації, що сприяло значному прогресу в розвитку цифрових систем передачі інформації, появі синхронних цифрових систем передачі SDH. Потреба в розвитку таких систем була дуже високою, бо об'єм передаваного трафіку неперервно збільшувався, що і стимулювало роботи по подальшому розвитку та вдосконаленню ВОЛЗ.

4 етап. Цей етап розвитку ВОСПІ зв'язано з появою і використанням оптичних підсилювачів (ОП), які дозволили ефективно збільшувати дальність передачі, замінити оптоелектронні регенератори на ВОЛЗ з оптичними підсилювачами. Волокно типу G.653 забезпечувало передачу інформації зі швидкостями до 40 Гбіт/с на відстань більше 100 км. Розроблені ОП створили умови до появи дуже важливого напрямку в розвитку волоконно-оптичного зв'язку - з'явилися

системи зі спектральним ущільненням, що, в свою чергу, зумовило перехід до етапу 5 в розвитку ВОСПІ.

5 етап. Цей етап зв'язано з появою систем зі спектральним ущільненням. В них застосовано таку властивість волоконних систем, як можливість незалежної передачі інформації по одному ОВ на різних довжинах хвилі. Перші ВОЛЗ зі спектральним ущільненням працювали в різних спектральних вікнах прозорості кремнію (1,31 мкм та 1,55 мкм) - FDM, WDM. Але системи зі спектральним ущільненням найбільш ефективні в 3-му спектральному вікні (1,55 мкм), бо в цьому випадку один ОП підсилює всі інформаційні канали, що розташовані в ньому.

Реалізація унікальних можливостей таких систем (щільного спектрального ущільнення - DWDM та високощільного спектрального ущільнення - HDWDM), в свою чергу поставила вимогу вирішення ще цілого ряду фундаментальних наукових задач.

По-перше, це проблема чотирьоххвильового зміщення. Найбільш ефективний шлях побудови ВОЛЗ зі спектральним ущільненням - збільшення кількості каналів. При збільшенні дальності передачі доводиться підсилювати оптичні сигнали в кожному каналі, і при великій сумарній потужності в волокні починають проявлятися нелінійні ефекти. Для DWDM-систем найбільш суттєвим є ефект чотирьоххвильового зміщення, коли в спектрі сигналів з'являються небажані складові, які призводять до перехресних завад. При спектральному способі дешифрування оптичних сигналів це може привести до значних помилок в передачі інформації. Чотирьоххвильове зміщення найбільш сильно проявляє себе в випадку однаковості швидкостей поширення оптичних сигналів в каналах. За цією причиною оптичні волокна зі зміщеною нульовою дисперсією (G.653) не застосовують в DWDM - системах, а для зменшення впливу чотирьоххвильового зміщення було розроблено волокна зі зміщеною ненульовою дисперсією (G.655) та технологію компенсації хроматичної дисперсії.

6 етап. Окрім спеціальних оптичних волокон для DWDM - систем було розроблено високостабільні лазери з вузькою

спектральною лінією, а також спектральні мультиплексери/демультиплексери. Цей цикл робіт призвів до необхідності значного просунення в фізиці та технології лазерів та інтегрально-оптичних схем. Виникла нова галузь науки - інтегральна оптика.

7 етап. Останнім часом підвищену увагу приділяють не тільки високошвидкісним магістральним ВОЛЗ, але і локальним системам. Річ у тому, що масові локальні ВОСП повинні забезпечити завантаженість регіональних та магістральних ВОЛЗ, підвищити ефективність ВОЛЗ в цілому. При цьому доцільно використовувати вже існуючі багатомодові волоконні світловоди. Поява нових високоефективних лазерів для локальних мереж дозволяє значно підвищити швидкість і дальність передачі інформації в ВОЛЗ на основі багатомодових волокон. Але при цьому з'являється проблема «центрального провалу» в багатомодових волокнах, яку зв'язано з недосконалістю технології виготовлення заготовок для цих світловодів. Значні відхилення профілю показника заломлення від оптимального в центрі волокна викликали різке збільшення дисперсії в випадку використання сучасних лазерів. Цю проблему багатомодового волокна було вирішено, що і відкрило нові можливості в розвитку локальних ВОЛЗ і ВОСП в цілому.

Цей напрям тісно зв'язано зі ще одним досягненням волоконної оптики, до якого можна віднести суттєві успіхи в області побудови мереж доступу, які зв'язують первинні мережі з абонентськими терміналами. Це поява волоконно-коаксіальних мереж доступу та пасивних оптичних мереж - PON.

8 етап. Подальший розвиток волоконної оптики зв'язано зі створенням оптичних волокон зі спеціальними властивостями та цілого ряду нових типів пристроїв на їх основі. В якості прикладу можна навести фотонні кристали, солітони та відповідні типи ВОСП.

Фотонні кристали: проводиться розробка і створення фотонних кристалів і оптичного волокна на їх основі, що стало одним із значних досягнень оптичних технологій останніх років. Виникла ідея використання волоконно-оптичних технологій для

створення фотонних кристалів. Сутність: у кварцову трубку діаметром 20 мм упаковуються капіляри діаметром близько 1 мм із напрямним стрижнем з того ж кварцового скла; цей стрижень розташовано між капілярами. Потім, із отриманої таким чином заготовки, витягується оптичне волокно. Проводиться двоступінчаста перетяжка заготовки, в процесі якої всі розміри зменшуються приблизно в 10000 разів.

Відомо два різновиди волоконних світловодів із структурою фотонних кристалів. Це волоконні світловоди із суцільною світловедучою жилою та волоконні світловоди з порожнистою світловедучою жилою.

Дірчастий світлопровід із суцільною світловедучою жилою має серцевину із кварцового скла в оболонці з фотонних кристалів (кварцове скло з повітряними порожнинами-каналами). Такі одномодові дірчасті волоконні світлопроводи, окрім того, що працюють в дуже широкому спектральному діапазоні, мають ще й незвичайні дисперсійні властивості; вони залежать від розмірів повітряних каналів і їх взаємного розташування. Ці волокна можуть мати аномальну дисперсію в короткохвильовій області спектру, аж до довжин хвиль 0,8 мкм, а залежність дисперсії від довжини хвилі в широкому спектральному діапазоні може бути дуже слабкою. Це дуже цінна якість.

Якщо змінювати однаково всі геометричні розміри структури дірчастого волокна (за умови збереження співвідношення між ними), то можна отримати у волокні одномодовий режим поширення як з малою, так і великою ефективною площею поперечного перетину моди. Тобто, можна створювати дірчасті волокна з діаметром світловедучої жили, що у багато разів перевищує або, навпаки, є меншим за діаметр світловедучої жили стандартного одномодового волокна. При цьому в ньому буде зберігатися одномодовий режим поширення світла.

Солітони: це структурно стійка усамітнена хвиля в нелінійному середовищі, яке має дисперсію. Солітони ведуть себе подібно часткам: при взаємодії між собою вони не руйнуються, а розходяться знову, зберігаючи структуру

незмінною. Цю властивість продемонстровано на рис.1.1а для взаємодії двох солітонів з близькими амплітудами. Дія протікає так, начебто зіштовхнулись та розлетілись дві частки. Тут можна навести аналогію з протоном і нейтроном, а звідси і назва «солітон» від латинського слова *soltis* - один, усамітнений. Виявилось, що солітони можуть зберігати свою структуру досить тривалий час при наявності невеликого затухання. Солітони, як і частки, можуть створювати зв'язані стани із двох або більше імпульсів - рис.1.1б.

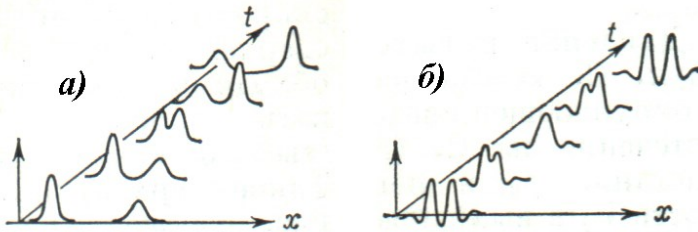


Рисунок 1.1 - До розгляду властивостей солітонів

Теоретичний опис солітонів було дано ще в 1895 р. вченими Д.Кортевегом та Г. де Фрисом. В подальшому солітони спостерігались у плазмі, лініях передачі з напівпровідниковими діодами і ін. Солітони, зближаючись, впливають один на одного, бо в нелінійному середовищі не виконується принцип суперпозиції. Дослідження показали, що з використанням властивостей солітонів можна створювати ОВ зі спеціальними властивостями.

Найбільш детально вивчено (в застосування до солітонів) відомі з фізики рівняння Кортевега - де Фрися, які описують хвилі в середовищах з достатньо малою нелінійністю та дисперсією.

Оптичний солітон (ОС): це імпульс, який являє собою одиночну хвилю дзвоноподібної форми; він створюється в оптичному волокні при наявності деякої нелінійної залежності коефіцієнту заломлення від інтенсивності випромінення когерентного джерела. При цьому коефіцієнт заломлення

повинен зростати з ростом інтенсивності. Тоді високочастотні складові імпульсу начебто зсуваються до його хвоста, а низькочастотні складові - до його голови; внаслідок цього явища придушується дія хроматичної та поляризаційної різновидів дисперсії. Такий імпульс може зберігати свої форму та ширину по всій довжині волоконної лінії. При цьому ця довжина може досягати сотень км (і більше). Формування ОС схематично наведено на рис.1.2.

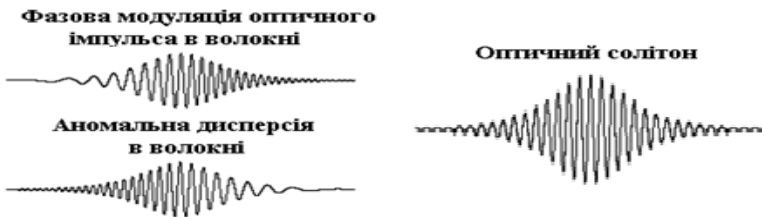


Рисунок 1.2 - Формування оптичного солітону

Солітони можуть поширюватися на значні відстані та зберігати свої властивості при зіткненнях один з одним. Для підтримки енергії солітон повинен отримати підживлення від джерела накачування. Тільки в цьому випадку солітон зберігається.

Таким чином ОС - це хвилі (або хвилеві пакети) спеціальної форми, які збуджуються лазерним джерелом світла в оптичному волокні при сумісній дії дисперсійних та нелінійних ефектів в області аномальної (від'ємної) дисперсії в оптичному волокні. Одна із найважливіших властивостей ОС - це принципова можливість поширення в оптичному волокні на дуже великі відстані (декілька тисяч кілометрів) практично без спотворення своєї форми. Доведено, що ця властивість зберігається і при зіткненнях солітонів один з одним, причому напрямок їх руху, швидкість та амплітуда практично не змінюються. Відмітимо, що ці властивості є характерними для руху деяких часток.

Солітонна система передачі нового покоління Lambda Xtreme Transport компанії Lucent Technologies забезпечує

передачу цифрових даних на швидкості до 2,56 Тбіт/с в режимі DWDM (64 хвилевих канали по 40 Гбіт/с в кожному) на дальність до 4000 км без електричної регенерації сигналу. Для досягнення цих можливостей застосовуються солітонні блоки передачі, раманівські підсилювачі, попередня корекція помилок. Застосовуються імпульси з тривалістю в одиниці пікосекунд.

Детальна інформація по ОС наведена в Додатку 1.

Запитання для самоконтролю

1. Чим обґрунтовано революційний розвиток телекомунікацій ?
2. Які досягнення фундаментальних наук лежать в основі стрімкого розвитку телекомунікацій ?
3. Чому винахід лазера дало поштовх для створення ВОЛЗ ?
4. Які властивості напівпровідникового лазера зумовили його застосування в ВОСПІ ?
5. Чому в ВОСПІ переважно застосовують цифрові сигнали ?
6. Які основні властивості має технологія SDH ?
7. Що таке WDM ?
8. В чому особливості сучасної елементної бази ?
9. В чому особливості сучасних мереж доступу ?
10. В чому особливості Ethernet ?
11. Чим багатомодові ОВ відрізняються від одномодових ?
12. Скільки відомо етапів розвитку ВОСПІ і в чому їх особливості?
5. Яку роль зіграла розробка оптичних підсилювачів для ВОСПІ ?
6. Яку роль зіграла розробка DWDM для ВОСПІ ?
7. З якими новими явищами та ефектами пов'язано подальший розвиток ВОСПІ ?
16. В чому полягає сутність оптичного солітону, як фізичного явища ?
17. Які фізичні аспекти створення оптичного солітону і його особливості

2 ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ МЕРЕЖІ

Телекомунікаційні мережі це узагальнене поняття для телефонних, телевізійних, радіо- та глобальних комп'ютерних мереж. Не дивлячись на всю множину очевидних та менш очевидних відмінностей, в їх структурі можна знайти багато загального, а це перш за все схожість архітектури. Узагальнену структуру будь-якої телекомунікаційної мережі наведено на рис.2.1. В її склад завжди входять наступні компоненти:

- мережі доступу;
- термінальне устаткування користувачів (можливо об'єднаних в локальну мережу);
- магістральна мережа;
- інформаційні центри.

Як мережа доступу, так і магістральна мережа будується на основі комутаторів. Кожен комутатор має в своєму складі деяку кількість портів, які з'єднано з портами інших комутаторів.

Користувач - це термінальне устаткування клієнта, за допомогою якого інформація приймається і передається



Рисунок 2.1 - Узагальнена структура телекомунікаційної мережі

Мережа доступу складає *нижній рівень* ієрархії телекомунікаційної мережі. Основне призначення мережі доступу - *концентрація інформаційних потоків*, які надходять по багатьом каналам зв'язку від устаткування клієнтів та відносно невеликої кількості вузлів магістральної мережі.

В випадку комп'ютерної мережі **термінальним устаткуванням** є комп'ютери. (часто їх об'єднано в локальну мережу), в випадку телефонної мережі - це телефонні апарати, які під'єднано до офісного телефонного комутатора РВХ (Private Branch Exchange).

Магістральна мережа об'єднує окремі мережі доступу, забезпечуючи транзит трафіка між ними по високошвидкісним каналам.

ПРИМІТКА. Легко помітити, що будь-яка національна мережа автомобільних доріг має таку ж ієрархічну структуру, що і крупна телекомунікаційна мережа. Звичайно існує розгалужена інфраструктура невеликих доріг (аналог мережі доступу), які зв'язують села та селища. Ці дороги доволі вузькі, бо інтенсивність трафіку між цими населеними пунктами невисока і немає сенсу робити ці дороги багаторядними. Такі дороги вливаються в більш швидкісні і, відповідно, більш широкі дороги, які, в свою чергу мають з'єднання з національними супермагістралями (аналог магістральної мережі).

Інформаційні центри та центри керування сервісами надають інформаційні послуги мережі. В таких центрах може зберігатися інформація двох типів: інформація користувачів та допоміжна службова.

Інформація користувачів - це інформація, яка безпосередньо цікавить кінцевих користувачів мережі. В комп'ютерних мережах прикладом інформаційних ресурсів такого типу можуть слугувати веб-сайти, на яких розташовано різноманітну довідникову та новинну інформацію, інформацію електронних крамниць, тощо. В телефонних мережах подібні центри надають послуги екстреного виклику (наприклад поліції, швидкої допомоги, тощо) та довідникові послуги різноманітних організацій та підприємств - вокзалів, аеропортів, крамниць, тощо.

Допоміжна службова інформація допомагає постачальнику послуг надавати послуги користувачам, наприклад за допомогою різноманітних систем аутентифікації та авторизації користувачів; організація, яка володіє мережею, перевіряє права користувачів з отримання ними послуг

Більшість телекомунікаційних мереж має в своєму складі **системи керування мережею** (Network Management Systems, NMS), які автоматизують дії адміністраторів по моніторингу становища мережі та конфігурування мережевих пристроїв та сервісів. Такі системи звичайно являють собою складні програмні комплекси, які працюють на виділених комп'ютерах.

2.1 Приклад пакету послуг, які надає мережа доступу

Кінцева мета будь-якої телекомунікаційної мережі - це забезпечення якісного та надійного зв'язку між абонентами. Під зв'язком треба розуміти передачу інформації, яку представлено в будь-якому вигляді і з будь-яким дозволим контентом. Враховуючи надзвичайно широке різноманіття можливих видів переданої інформації, стає очевидною значимість якісної роботи устаткування мереж доступу.

Мережі доступу є найбільш розгалуженою частиною ієрархічних телекомунікаційних систем. Мережі доступу *забезпечують спряження* устаткування користувачів з магістральними мережами, по яким передається інформація чисельним користувачам в вигляді потужних транспортних потоків

Структурно мережі доступу складено із розподільчої частини, що включає в себе систему відповідних розподільчих вузлів, зв'язаних з'єднувальними лініями з вузлами магістральної мережі, а також системи абонентських ліній, по яким здійснюється взаємодія розподільчих вузлів з мережевим устаткуванням користувачів. Мережа доступу повинна забезпечувати надання абоненту надзвичайно широкого пакету послуг.

Розглянемо архітектуру пакету послуг на прикладі системи Triple Play, що засновано на концепції NGN і яку наведено на рис.2.2. Тут застосовано обмеження на трафік користувача та збір облікової інформації. На рівні агрегації застосовано різні політики керування перевантаженнями. Також на вузлах агрегації передбачено можливість організації стикування з другими мережами та стиків з локальними зонами надання послуг. Сервісні маршрутизатори розташовано в районах, які є найбільш зручними для агрегації великої кількості мереж доступу, а місця їх розташування тяжіють до периметру зони обслуговування. Це сприяє кращому охопленню території з високою щільністю розташування потенціальних абонентів.

Зона ядра та зона агрегації разом складають опорну інфраструктуру єдиної мультисервісної мережі. Спрощено, опорна інфраструктура функціонує на третьому рівні, модель ISO/OSI. В GE порти BSR Juniper E-320 ввімкнено за зіркоподібною схемою Uplink порти комутаторів концентрації або суперконцентрації. З метою ефективного використання ВОК на деяких ділянках застосовується спектральне ущільнення cWDM з застосуванням устаткування EDFA FSP-2000.

Деякі концентрувальні комутатори розташовано в одному пристосованому приміщенні, створюючи вузол концентрації. До комутаторів концентрації під'єднано комутатори доступу, створюючи таким чином **мережу доступу**, яка покриває деяку частину району. Типова топологія ланцюжків комутаторів доступу - кільцева, яка забезпечує високий рівень доступності мережі.

Пропускна здатність кільця 1 GE. Мережі доступу, які під'єднано до одного BSR, складають **районну мережу**, а будь-який трафік всередині цієї мережі вважається локальним. Трафік, який існує між користувачами різних районних мереж (під'єднаних до різних BSR), вважаються міжрайонними. Сукупність районних мереж складає **міську мережу**.

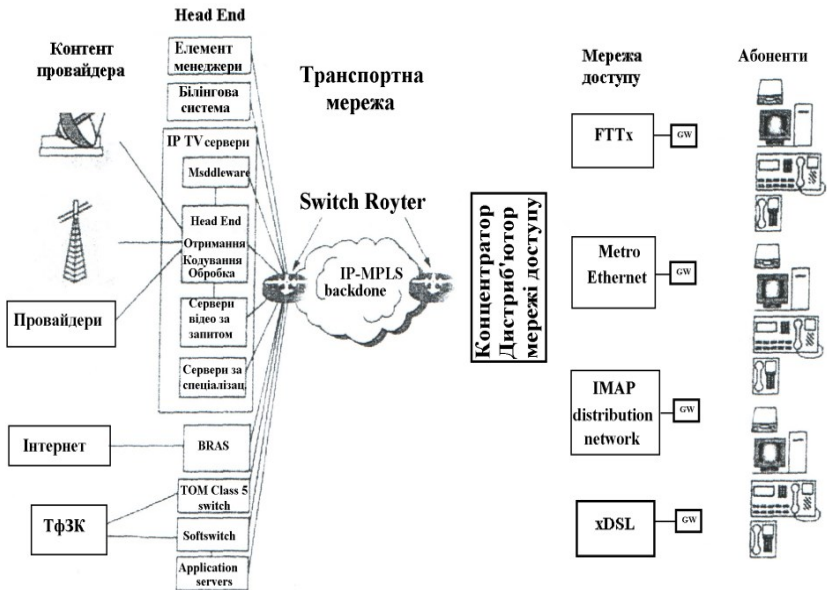


Рисунок 2.2 - Архітектура пакета послуг Triple Play

Запитання для самоконтролю

1. Чому телекомунікаційні системи стали окремою галуззю господарства будь-якої розвиненої країни ?
2. Які компоненти входять в телекомунікаційну мережу ?
3. Що таке магістральна мережа та мережа доступу ?
4. Які задачі у інформаційних центрів та центрів керування сервісами ?
5. Які задачі у системи керування мережею ?
6. Які пакети послуг надає мережа доступу (на прикладі пакета послуг Triple Play) ?
7. Які функції мереж доступу, районної мережі, міської мережі ?

3 СХЕМА ВОСП, ЇХ РІЗНОВИДИ, СТРУКТУРА І ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ

3.1 Загальна інформація

Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) є окремим випадком більш загальної галузі волоконно-оптичних систем передачі інформації (ВОСП).

На практиці роботу практично всіх ВОЛЗ організують за цифровим принципом, що накладає деякі особливості на структуру їх технічних засобів. В цифрових ВОСП застосовуються дискретні методи модуляції, які характеризуються дискретною зміною одного з параметрів переносника сигналу і при цьому область значень вихідного параметру ділиться на достатньо велику кількість рівнів квантування, кожному з яких ставиться в відповідність визначений дискретний сигнал.

При розгляді цього питання не треба забувати про дві важливі обставини, які зумовлено тим, що в більшості випадків кінцевим користувачем системи зв'язку є людина:

- органи мови та слуху людини орієнтовано, відповідно, на генерацію та сприйняття аналогових сигналів;
- технічні засоби ВОЛЗ орієнтовано на передачу цифрових сигналів.

Ці обставини накладають певні особливості на структуру технічних засобів, які реалізують ВОСП і, зокрема, ВОЛЗ.

За призначенням та протяжністю ВОСП підрозділяються на магістральні, зонові, міські та системи розподілу інформації.

Магістральні ВОСП призначено для передачі повідомлень на тисячі кілометрів, зонові - для передачі інформації на відстань до 600 км.

Міські мережі ВОСП призначено для передачі інформації в межах міста (мегаполісу); вони мають довжину до десятків кілометрів. Вони також слугують для ущільнення з'єднувальних ліній МТС. Системи розподілу інформації забезпечують: зв'язок між ЕОМ, мережу кабельного телебачення і т.і. Як правило, ці

системи передають широкосмугові сигнали (телевізійний, відеотелефонний, багатоканальний телефонний, передача зображень і т.і.) і будуються на основі цифрових ВОСП з ретрансляцією. В залежності від призначення ВОЛЗ вони можуть відрізнятися швидкістю передачі інформації.

3.2 Структура і основні компоненти ВОСП

Найпростіші ВОЛЗ передають інформацію між двома точками рис.3.1. В склад ВОЛЗ входять:

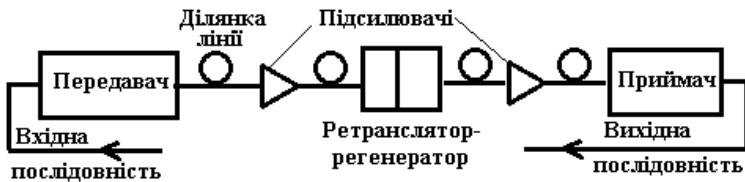


Рисунок 3.1- До розгляду структури і складу ВОЛЗ

- передавач це пристрій, який перетворює вхідні електричні сигнали в таку форму, яка придатна для передачі по ОВ;
- фізичне середовище передачі інформаційних сигналів - ділянки ОВ;
- приймач це пристрій, який перетворює оптичні сигнали в електричні;
- ретранслятор-регенератор (в протяжних за відстанню ВОЛЗ).

Джерелами оптичного промінню є лазери або світлодіоди. Світлові промені в передавачі модулюються і вже в вигляді сигналів вводяться через відповідний роз'єм в ОВ. В кінці лінії світло надходить в фотоприймач, що перетворює його в електричні сигнали, які потім обробляються. Для збільшення відстані передачі застосовують або регенератори, або оптичні підсилювачі.

Регенератори здійснюють детектування оптичних сигналів, перетворення їх в електричні сигнали, відокремлюють шуми, здійснюють підсилення на рівні електричних сигналів, далі - перетворення знову в оптичні сигнали з введенням в оптичне

волокно для подальшої передачі. Регенератори - це досить складні та дорогі пристрої і до того ж вони дозволяють працювати с сигналом лише одного каналу. В оптичних підсилювачах відсутнє перетворення оптичного сигналу в електричний і при цьому є можливість одночасно підсилювати багато (до 160) оптично розділених інформаційних каналів. Недолік: накопичення спотворень сигналу, оскільки тут відсутня операція відновлення форми сигналу.

3.3 Принципи роботи передавальної частини ВОЛЗ

При організації передачі оптичного сигналу аналогові сигнали телефонії надходять на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і далі на устаткування цифрового мультиплексування (ЦМ). Сюди ж можуть надходити сигнали (в цифровій формі) від цифрових терміналів та цифрових станцій в заданому форматі. Задача мультиплексора - об'єднання окремих цифрових сигналів в високошвидкісні цифрові потоки, які подаються на устаткування оптичного лінійного тракту (УЛТ). На комплекти УЛТ можуть також надходити окремі високошвидкісні цифрові потоки від комп'ютерних або телевізійних серверів, причому аналоговий телевізійний сигнал спочатку оцифровується, а потім подається на ЦМ разом з другими цифровими потоками. Схему організації передавальної частини ВОЛЗ наведено на рис.3.2

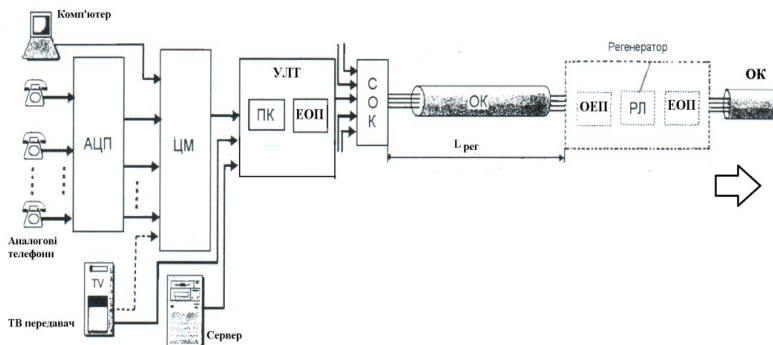


Рисунок 3.2 - Схема організації передавальної частини ВОЛЗ

В устаткуванні УЛТ спочатку виконується перетворення коду (ПК-перетворювач коду) частіше біполярного в однополярний - придатний для передачі в оптичному тракті. Потім електричний сигнал надходить на електронно-оптичний перетворювач (ЕОП) - це лазер або світлодіод, який формує на виході оптичний лінійний сигнал; цей сигнал і надходить в оптичне волокно. Волокна від різних блоків УЛТ вводяться в станційний оптичний крос (СОК), де з'єднуються з допомогою оптичних роз'єм з волокнами оптичного лінійного кабелю.

3.4 Принципи роботи приймальної частини ВОЛЗ

Схему організації приймальної частини ВОЛЗ наведено на рис.2.1. На приймальній стороні, після проходження станційного оптичного кроса (СОК), оптичний сигнал надходить на приймальну частину блоку УЛТ, де після проходження через оптоелектронний перетворювач (ОЕП) знову стає електричним сигналом. В якості ОЕП використовують ФД.

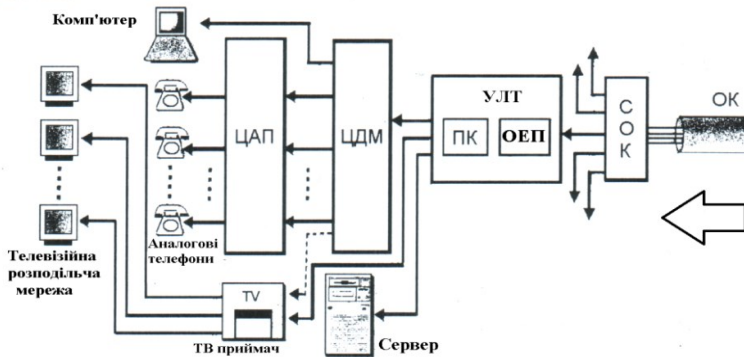


Рисунок 3.3 - Схема організації приймальної частини ВОЛЗ

Таким чином, робота приймальної системи ВОЛЗ практично нічим принципово не відрізняється від роботи звичайного детекторного приймача. Нагадаємо, що з застосування детекторних приймачів починалась ера побутового радіоприйому.

В блоці УЛТ також виконується перетворення коду (ПК), після цього високошвидкісний цифровий потік надходить на цифровий демультіплексор (ЦДМ) або на комп'ютерний чи телевізійний сервер. В блоці ЦДМ здійснюється поділ групового високошвидкісного цифрового сигналу на сигнали з більш низькими швидкостями та окремі цифрові канали, які вже можуть передаватись користувачам. При необхідності, також може виконуватись цифроаналогове перетворення (ЦАП) сигналів (телефонних, телевізійних) з застосуванням відповідних перетворювачів.

При передачі на великі відстані, через визначені проміжки, які звать *регенераційними ділянцями*, встановлюються регенератори. Підкреслимо, що ці дії, тобто власне регенерація, здійснюються на електричному (рис.3.2, блок Регенератор), але не на оптичному рівні.

4 МАГІСТРАЛЬНІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ВОСПІ

Сучасним станом широке поширення отримали три технології мереж зв'язку, які застосовують ОВ в якості середовища передачі:

PDH - плезіохронна цифрова ієрархія;

SDH - синхронна цифрова ієрархія;

WDM - технологія хвильового мультиплексування.

Технології пакетної комутації ATM, Frame Relay, TP і Ethernet вимушені користуватись SDH або WDM для взаємодії з телефонною мережею загального користування. Сьогодні розроблено інтерфейси швидкісного (до 10^{10} біт/с) Ethernet для мультиплексорів SDH, WDM.

4.1 Мережі PDH

Технологію PDH було розроблено в кінці 60-х років ХХ-го сторіччя компанією AT&T для вирішення проблеми зв'язку крупних комутаторів телефонних мереж між собою. Лінії зв'язку FDM, застосовувані раніше для вирішення цієї задачі, вичерпали

свої можливості по організації високошвидкісного багатоканального зв'язку по одному кабелю. В технології FDM для одночасної передачі даних 12 абонентських каналів застосовувалась вита пара, а для підвищення швидкості доводилось прокладати кабелі з більшою кількістю пар проводів або більш дорогі коаксіальні кабелі, та технології з комутацією каналів за допомогою крокових шукачів, які замінили ручну комутацію.

Перехід на технологію PDH знаменував початок нової епохи в телекомунікаційних та телефонних мережах - епохи цифрових комунікацій. Для абонентів це означало високу якість звуку, яка не погіршувалась в міру проходження проміжних комутаторів, як це було в аналогових мережах. Для операторів це означає появу гнучких засобів створення надійних каналів з широким діапазоном швидкостей, від одиниць до сотень Мбіт/с.

4.1.1 Особливості технології PDH

При часовому мультиплексуванні на першому рівні вхідними є сигнали ОЦК зі швидкістю 64 кбіт/с. Вони формують на виході мультиплексера первинний цифровий потік зі швидкістю $n \cdot 64$ кбіт/с.

Для технології Bell D2 $24 \cdot 64$ кбіт/с = 1536 кбіт/с. Для СЕРТ буде $30 \cdot 64$ кбіт/с = 1920 кбіт/с. До них добавляється канал 8 кбіт/с (для D2) або 2 канали ОЦК для СЕРТ, які необхідні для здійснення синхронізації, сигналізації та контролю помилок. Первинний потік складено з повторюваних груп, кожна з яких набирає структуру фрейму/ циклу. В Bell D2 формується фрейм T1-1544 кбіт/с, в СЕРТ фрейм E1- 2048 кбіт/с.

Існує декілька реалізацій ІКМ систем, які визнано в якості стандартних. Це T1 (AT&T, США); Bell D2 (Bell, США); U.K. (Великобританія) та СЕРТ (Європа). Друга та четверта із них діють сучасним станом.

Основні параметри цих систем наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Параметри основних стандартних систем ІКМ

Параметри	Bell D2	CEPT
Частотний діапазон, Гц	300-3400	300-3400
Частота дискретизації, Гц	8000	8000
Квантування: кількість біт на вибірку	8	8
Кількість тайм-слотів на фрейм	24	32
Кількість інформаційних ІКМ каналів на фрейм	24	30
Ємність вихідного агрегатного каналу, кбіт/с	1544	2048
Ємність основного цифр. каналу (ОЦК), кбіт/с	64	64
Сигналізація по загальному каналу, кбіт/с	4	64

4.1.2 Плезіохронний метод цифрової передачі інформації

В результаті перетворення аналогового сигналу в цифрову форму він перетворюється в потік цифрової інформації в вигляді двійкових символів (біт) зі швидкістю передачі 64 кбіт/с. Канал, в якому передається такий цифровий потік, отримав назву «Основний цифровий канал» (ОЦК), а за міжнародною класифікацією DSO. Зрозуміло, що 64 кбіт/с - це швидкість, яка відповідає передачі одного телефонного каналу.

В існуючих лініях та мережах зв'язку передається одночасно велика кількість (група) таких каналів. Отже, по всім лініям, за вилученням абонентської ділянки, передається груповий цифровий сигнал. Він формується методом часового розділення каналів, який полягає у тому, що імпульси основного цифрового потоку DSO квантуються за часом на більш короткі імпульси, які потім з відповідними зсувами за часом розташовуються в один ряд (послідовність), створюючи новий цифровий потік (частота, з якою здійснюється часове квантування, зветься тактовою). Цей процес вже було розглянуто в розділі часового мультиплексування каналів.

4.1.3 Ієрархія швидкостей передачі

Початок технології PDH покладено розробкою мультиплексера T-1, що дозволяє в цифровому вигляді мультиплексувати, передавати та комутувати (на сталій основі) голосовий трафік 24 абонентів. За тією причиною, що абоненти продовжували користуватися звичайними телефонними апаратами, тобто передача голосу йшла в аналоговій формі, то мультиплексери T-1 самі здійснювали оцифровку голосу з частотою 8000 Гц та кодували голос методом імпульсно-кодової модуляції. В результаті кожний абонентський канал створював цифровий потік даних 64 кбіт/с (8 вибірок по 8000 Гц), а мультиплексер T-1 забезпечував передачу $24 \cdot 64 \text{ кбіт/с} = 1,544 \text{ Мбіт/с}$.

Для з'єднання крупних телефонних станцій канали T-1 вже являли собою занадто слабкі та негнучкі засоби мультиплексування, а тому було реалізовано ідею створення каналів з *ієрархією швидкостей*. Сутність: чотири канали типу T-1 об'єднали в канал наступного рівня цифрової ієрархії - канал типу T-2, який передає дані зі швидкістю 6,312 Мбіт/с. В свою чергу, канал T-3, створений об'єднанням 7 каналів T-2, має швидкість 44,736 Мбіт/с. Канал T-4 об'єднує 6 каналів T-3, в результаті його швидкість дорівнює 274 Мбіт/с. Ця технологія отримала назву **системи T-каналів**.

З середини 70-х років XX-го сторіччя виділені канали, які побудовано на основі системи T-каналів, почали здаватися телефонними компаніями в оренду на комерційних умовах, переставши бути внутрішньою технологією цих компаній. Системи T-каналів дозволяють передавати не тільки голос, а і будь-які дані, представлені в цифровій формі - комп'ютерні дані, ТБ, факси.

Технологію систем T-каналів стандартизовано Американським національним інститутом стандартів (ANSI), а пізніше - міжнародним комітетом ССІТТ. При стандартизації вона отримала назву **Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH)** - плезіохронна цифрова ієрархія (*плезіо - майже*). В результаті

внесених комітетом ССІТТ змін виникла несумісність американської і європейської версій стандарту PDH.

Аналогом систем Т-каналів в міжнародному стандарті є канали типу Е-1, Е-2, та Е3. В таблиці 4.2 наведено назви каналів відповідних стандартів. Для порівняння в таблиці 4.3 наведено швидкості передачі в каналах відповідних стандартів.

Таблиця 4.2 - Позначення каналів PDH в різних країнах

Рівень цифрової ієрархії	Позначення		
	Стандарт США (Tx)	Стандарт Японії (DSx)Jx	Стандарт Європи (Ex)
1.первинний	T1	DS1.J1	E1
2.вторинний	T2	DS2.J2	E2
3.третинний	T3	DS3.J3	E3
4.четверинний	T4	DS4.J4	E4
5.п'ятиринний	Не застосов.	DS5.J5	E5

Таблиця 4.3 - Швидкості передачі на різних рівнях ієрархії

Рівень цифрової ієрархії	Швидкості передачі, кбіт/с		
	Стандарт США	Стандарт Японії	Стандарт Європи
1.первинний	1544	1544	2048
2.вторинний	6312	6312	8448(4x2048+256)
3.третинний	44736	32064	34368(4x8448+576)
4.четверинний	274176	97728	139264(4x34368+1792)
5.п'ятиринний	Не застос.	397200	564992(4x139264+7936)

Американська версія стандартів каналів, окрім США отримала поширення також в Канаді та Японії (з деякими змінами), а в Європі застосовують міжнародний стандарт СЕРТ.

Ієрархію цифрових систем передачі, яку прийнято в Європі, наведено на рис.4.1, а прийняту в США, Канаді та Японії (з деякими змінами) наведено на рис.4.2.

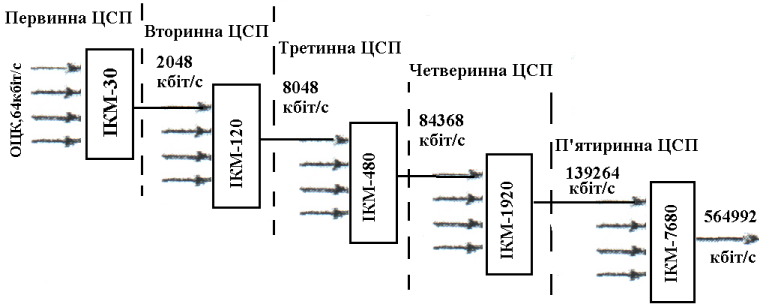


Рисунок 4.1 - Ієрархія ЦСП, прийнята в Європі

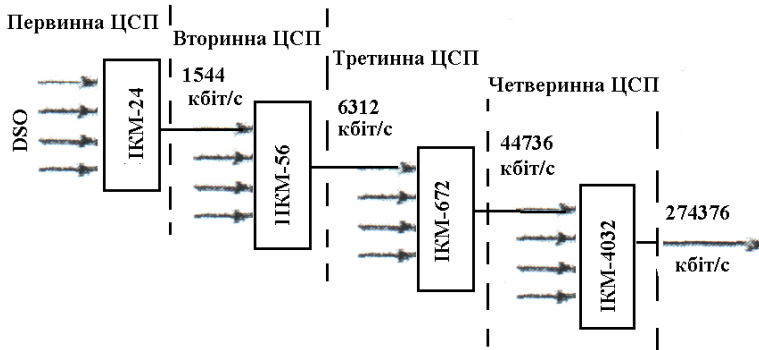


Рисунок 4.2 - Ієрархія ЦСП, прийнята в США, Канаді, Японії

4.1.4 Схеми плезіохронної цифрової ієрархії

Розглянемо три схеми плезіохронної цифрової ієрархії.

В першій схемі, яку розроблено в США та Канаді (АС), в якості швидкості передачі первинного цифрового каналу ПЦК (DS1), породженого першим рівнем мультиплексування, було прийнято швидкість $T_1=1544$ кбіт/с (тобто коефіцієнт первинного мультиплексування $n = 24$. В цьому випадку 24 ОЦК по 64 кбіт/с могло бути застосовано для передачі голосу або даних). В другій схемі, яку було прийнято в Японії (ЯС), в якості швидкості ПЦК також застосовано швидкість 1544 кбіт/с. В третій схемі, яку було

прийнято в Європі та Південній Америці (ЄС) в якості швидкості ОЦК було прийнято швидкість 2048 кбіт/с.

Перша схема (американська, яку далі будемо називати АС) давала послідовність каналів DS1- DS2- DS3- DS4 або швидкостей передачі в вигляді ряду: 1544-6312-44736-274176 кбіт/с (або наближено 1,5-6-45-274 Мбіт/с), що, з врахуванням швидкості DSO, відповідає ряду коефіцієнтів мультиплексування $n=24$, $m=4$, $l=7$, $k=6$. Вказана схема дозволяє передавати, відповідно, 24, 96, 672 та 4032 канали DSO.

Тут та нижче DS0-DS4 будемо називати цифровими каналами 0-го, 1-го, 2-го, 3-го та 4-го рівнів ієрархії. В тій термінології, яка застосовується в галузі зв'язку, це, відповідно: основний цифровий канал (ОЦК), первинний цифровий канал (ПЦК), вторинний цифровий канал (ВЦК), третинний цифровий канал (ТЦК) та четвертинний цифровий канал (ЧЦК).

Друга схема (японська, яку далі будемо називати ЯС) давала послідовність каналів DS1- DS2- DSJ3- DSJ4-DSJ5 або швидкостей 1544-6312-32064-97728-397200 кбіт/с (або приблизно 1,5-6-32-98-397 Мбіт/с), що, з врахуванням швидкості DSO, відповідає ряду коефіцієнтів мультиплексування $n=24$, $m=4$, $l=5$, $k=3$, $i=4$. Вказана схема дозволяє передавати, відповідно, 24, 96, 480, 1440 та 5760 канали DSO. Тут DSJ3-DSJ5 будемо називати цифровими каналами 3,4 та 5-го рівнів японської системи ієрархії PDH. Формально (за термінологією, яка застосовується в галузі зв'язку), це є: третинний цифровий канал (ТЦК), четвертинний цифровий канал (ЧЦК) та п'ятиринний цифровий канал (ПЦК).

Третя схема (європейська, яку далі будемо називати ЄС) давала послідовність каналів E1- E2- E3- E4- E5 або швидкостей передачі в вигляді ряду: 2048-8448-34368-139264-564992 кбіт/с (або приблизно 2-8-34-140-565 Мбіт/с), що відповідає ряду коефіцієнтів мультиплексування $n=30$, $m=4$, $l=4$, $k=4$, $i=4$. Вказана схема дозволяє передавати, відповідно, 30, 120, 480, 1920 та 7680 канали DSO.

Паралельний розвиток трьох різних ієрархій об'єктивно заважає розвитку глобальних комунікацій у світі в цілому, а тому комітетом по стандартизації ІТУ-Т (або МСЕ-Т) було зроблено

кроки по їх уніфікації та можливому об'єднанню. В результаті було розроблено стандарт, загальну схему якого наведено на рис.4.3. Тут стандартизовано три (не рахуючи основного) перших рівня АС (DS1-DS2-DS3), чотири рівня ЯС (DS1-DS2- DSJ3-DSJ4) та чотири рівня ЄС (E1-E2-E3-E4) в якості базових та вказано схеми крос-мультиплексування ієрархій (взаємного переходу із однієї ієрархії в другі), наприклад, із ЄС ієрархії АС (з першого на другий рівень) та навпаки (з третього на четвертий), а також із ЯС ієрархії (з третього рівня) і т.д.. Розглянемо тактові частоти при формуванні групових цифрових сигналів в перерахованих ієрархіях швидкостей передачі. Тактові частоти сусідніх рівнів, а тим більш далеких, не обов'язково повинні бути синхронізованими. Окрім того, частоти дискретизації в різних каналах також можуть дещо відрізнятись одна від одної. Сигнали начебто передаються з середньопіковою номінальною швидкістю, але миттєве значення швидкості передачі внаслідок нестабільності місцевих задавальних генераторів може змінюватися в деяких межах.

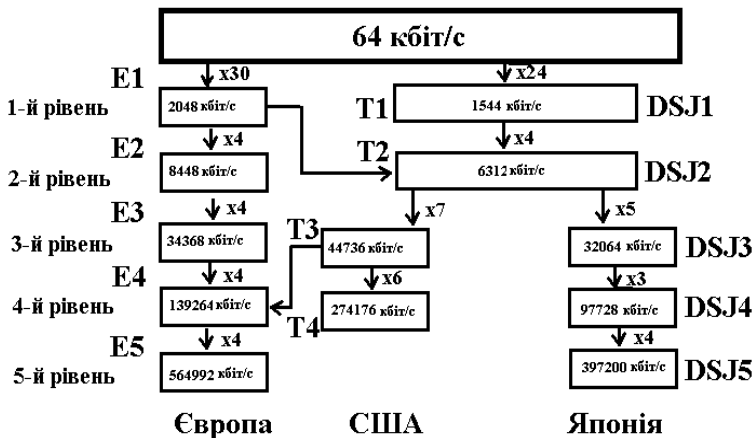


Рисунок 4.3 - Ієрархія плезіохронних систем Європи, США і Японії

З-за нестабільності генераторного обладнання і різниці в швидкостях передачі окремих груп, досить часто виникає потреба узгоджувати потоки на вході обладнання групоутворення з потоком на виході. В таких системах в процесі мультиплексування для вирівнювання швидкостей або тактових частот добавляються (або вилучаються) додаткові біти. В результаті на виході мультиплексера формується синхронізована імпульсна послідовність, швидкість якої в n разів вище, ніж в індивідуальних каналах (n кратно 4). Це і є плезіохронна цифрова система передачі, а цифрова ієрархія - плезіохронна цифрова ієрархія - ПЦІ (PDH).

Відсутність загальної жорсткості синхронізації тактових частот різних рівнів E1-E5, а також добавлення (або вилучення) вставок (стафінгів) в вигляді додаткових біт в відповідний код, для вирівнювання кодових комбінацій, призводять до неможливості виділення на деякому проміжному пункті зonomої або магістральної лінії каналу DSO, або, скажемо, DSI із потоку, наприклад, рівня E3 або E4 без повного демультимплексування групового інформаційного потоку.

4.1.5 Обмеження технології PDH

Як американські, так і міжнародні варіанти технології PDH мають декілька недоліків. Розглянемо їх сутність.

1. Складність та неефективність операцій мультиплексування та демультимплексування даних, які належать користувачам. Сам термін «плезіохронний», який застосовує ця технологія, говорить за причину цього явища - відсутність повної синхронізації потоків даних при об'єднанні низькошвидкісних каналів в більш високошвидкісні. Одвічно асинхронний підхід до передачі кадрів породив вставку біта або декількох бітів синхронізації між кадрами (стафінгів).

В результаті для добування даних користувача із об'єданого каналу необхідно повністю демультимплексувати кадри цього об'єданого каналу. Наприклад, щоб отримати дані одного абонентського каналу 64 кбіт/с із кадрів каналу T3,

необхідно провести демультимплексування цих кадрів до рівня T2, потім до рівня T1, а потім демультимплексувати і власне кадри T. Для переборення цього недоліку в мережах PDH реалізують додаткові прийоми, які зменшують кількість операцій демультимплексування при добутті даних користувача із високошвидкісних каналів.

2. Відсутність розвинутих вбудованих процедур контролю та керування мережею. Службові біти дають мало інформації про стан каналу, не дозволяють його конфігурувати і т.і. Відсутні в технології і процедури підтримки відмовостійкості. Ці процедури дуже корисні для первинних мереж на основі яких і будуються відповідальні міжміські та міжнародні мережі. В сучасних мережах керуванню приділяється багато уваги, причому вважається, що керувальні процедури бажано вбудовувати в основний протокол передачі даних мережі.

3. Занадто низька, за сучасними поняттями, швидкість передачі в ієрархії PDH, бо волоконно-оптичні кабелі дозволяють передавати дані зі швидкостями в декілька Гбіт/с по одному волокну.

4. Відсутність засобів маршрутизації мультимплексованих потоків нижніх рівнів, що край необхідно і важливо для використання систем PDH в мережах передачі даних.

4.1.6 Вітчизняні ЦВОСПІ другого покоління

Застосовувана сучасним станом для міського («Соната-2», ІКМ-120-4/5), зонового («Сопка-2», «Сопка-3») та магістрального («Сопка-4») зв'язку апаратура відносяться до систем першого покоління. До другого покоління ЦВОСПІ можливо віднести такі системи передачі, як «Сопка-Г» (міський зв'язок), «Сопка-3М» (зоновий зв'язок), «Сопка-4М», «Сопка-5» (магістральний зв'язок). Основні характеристики вітчизняних ЦВОСПІ наведено в табл.4.4.

Таблиця 4.4- Характеристики вітчизняних ВОСП

Характеристика	«Сопка-3М»	«Сопка-4»	«Сопка-4М»	«Сопка-5»
Довжина хвилі, мкм	1,55	1,3	1,55	1,55
Кількість каналів	480	1920	1920	7680
Швидкість передачі, Мбіт/с	34,368	139,264	139,264	564,992
Лінійний код	2В4В	СМ1	10В1Р1Р	10В1Р1Р
Стала затух. ОК, дБ/км	0,3	0,7	0,4	0,3
Енерг. потенціал, дБ	38	38	38	-
Довжина регенер. ділянки, км	70	30	70-100	70-100
Максимальна дальність зв'язку, км	600	2500	2500	2500
Марка кабелю	ОМЗКГ, ОКЛ, ОКГ	ОМЗКГ	ОКЛ	ОКЛ
Коефіц. широко-смуговості, МГц/км	-	5000	5000	5000
Будів.довжина, км	2	2	2	2
Електроживлення	ДЖ	Автономне і від електромережі		

Причинами появи ЦВОСПІ другого покоління є наступне:

1. Перехід до оптичного діапазону з довжинами хвиль > 1,3 мкм. В зв'язку з цим почався серійний випуск електрооптичних елементів та ОК в діапазоні довжин хвиль 1,55 мкм. В цьому діапазоні стало затування зменшено до 0,22...0,3 дБ/км, що дозволяє збільшити довжину ділянки регенерації до 70...100 км. В більш довгохвильовому діапазоні (до 10 мкм) за рахунок зменшення величини сталої затування ОВ довжину регенераційної ділянки можливо збільшити до 300...500 км і більше.

2. Збільшення швидкості передачі інформації до декількох Гбіт/с, при застосуванні спектральних методів ущільнення.

3. Застосування більш ефективних методів модуляції оптичного випромінення та когерентних методів прийому сигналу, що дозволило підвищити чутливість ЦВОСП на 5...20 дБ в порівнянні з системами, де застосовується пряме фотодетектування.

Досліджуються системи, в яких реалізуються нелінійні властивості ОВ з метою створення солітонного режиму поширення світлового проміння. В такому режимі швидкість передачі може досягати величини декількох десятків Гбіт/с при довжині регенераційної ділянки до 1000 км.

4.2 Мережі SDH

Дякуючи впровадженню сучасних ВОК, з'явилась можливість досягнення високих (десятки Гбіт/с) швидкостей передачі інформації з одночасним збільшенням довжини регенераційної ділянки (до 100 км). Недоліки використання сучасних асинхронних систем групоутворення цифрових потоків, які є характерними для плезіохронних систем передачі, для отримання високошвидкісних сигналів призводять до громіздких та малонадійних вирішень. В свою чергу, це ускладнює доступ до складових цифрових потоків з метою їх виділення та транзиту.

При порушенні синхронізації групового сигналу досить багато часу витрачається на багатоступеневе відновлення синхронних потоків, які складають груповий сигнал. Окрім того, з-за нестабільності генераторного устаткування систем передачі, виникають втрати отриманої інформації на етапах мультиплексування. Все це призвело до того, що в 1984 р. фахівці Bell Laboratory (США) почали роботу над створенням *оптичної синхронної мережі SONET-synhronus Optikal Network* де всі системи передачі було б узгоджено за часом - *синхронізовано*. В Європі було розроблено Європейський стандарт, який отримав назву *синхронна цифрова ієрархія (SDH)*. Тут за базовий рівень було прийнято швидкість 155,82 Мбіт/с - так званий *синхронний базовий модуль STM-1*, що відповідало четвертому рівню Європейської PDH ієрархії (139,264 Мбіт/с).

4.2.1 Особливості синхронної ієрархії

Як мережу SONET (США), так і ієрархію SDH (Європа) було розраховано на застосування якісного ВОК, як середовища передачі; тут менше значення затухання при більшій допустимій швидкості передачі.

Отже, технологію синхронної цифрової ієрархії (Synchronous Digital Hierarchy, SDH) розроблено для *створення надійних транспортних мереж, які дозволяють гнучко формувати цифрові канали з широким діапазоном швидкостей передачі - від одиниць мегабіт до десятків (сотень) гігабіт в секунду.*

Мережі SDH відносяться до класу мереж з *комутацією каналів*, які застосовують мультиплексування з розділенням за часом (TDM). При цьому в якості адреси інформації від окремих абонентів застосовується *відносне часове положення всередині складеного кадру*, а не явною адресою, як це здійснюється в мережах з комутацією пакетів.

Основна область застосування технології SDH - первинні мережі операторів зв'язку. Але інколи такі мережі будують на великих підприємствах та організаціях, які мають розгалужену структуру підрозділів та філій, що покривають велику територію, наприклад, в мережах енергетичного комплексу або залізничних компаній.

Канали SDH відносяться до класу напівпостійних (semipermanent)-формування (provisioning) каналу здійснюється за *ініціативою оператора мережі SDH, користувачі ж такої можливості не мають*, а тому канали SDH застосовуються для передачі достатньо стійких за часом потоків. Внаслідок напівпостійності характеру з'єднань в *технології SDH частіше використовується термін крос-конект (cross-connect), а не комутація.*

Канали SDH звичайно застосовують для об'єднання великої кількості периферійних (менш швидкісних) каналів, які працюють за технологією PDH, а також низькошвидкісних SDH. Приклад застосування каналів SDH для з'єднання між собою абонентського обладнання різного типу наведено на рис.4.4.

4.2.2 Переваги та недоліки SDH

Головними перевагами SDH є наступні:

1. Гнучка ієрархічна схема мультиплексування цифрових потоків, які можуть мати різну швидкість; це дозволяє вводити (add, insert) в магістральний канал та виводити (drop) із нього інформацію користувачів з будь-яким підтримуваним технологією рівнем швидкості, причому *без необхідності демультимплексації потоку в цілому*. Це означає не тільки гнучкість, але і економію устаткування.

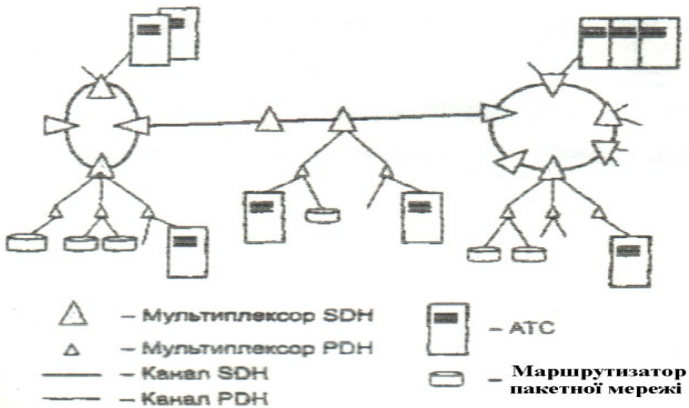


Рисунок 4.4-Застосування технології SDH

2. Відмовостійкість мережі. Мережі SDH володіють високим ступенем «живучості» - технологія передбачує автоматичну реакцію устаткування на такі типові відмови, як обрив кабеля, відмова порту, вихід з ладу мультиплексера, або окремої його карти; при цьому трафік направляється по резервному шляху або здійснюється перехід на резервний модуль. Треба відмітити, що перехід на резервний шлях здійснюється досить швидко - звичайно на протязі 50 мсек, а при цьому користувач і не помічає факту виходу з ладу системи зв'язку.

3. Моніторинг та керування мережею на основі тієї інформації, яку вбудовано в заголовки кадрів. Це забезпечує обов'язковий рівень керованості мережі, який не залежить від виробника устаткування, і створює основу для нарощування функцій менеджменту в фірмових системах керування.

4. Висока якість транспортного обслуговування для трафіка будь-якого типу - голосового, відео та комп'ютерного. Техніка мультиплексування TDM, яка лежить в основі SDH, забезпечує трафіку кожного абонента гарантовану пропускну здатність, а також досить низький та гарантований рівень затримок.

5. Мережі SDH добились міцного положення в телекомунікаційному світі - сучасним станом вони складають фундамент практично всіх крупних мереж - регіональних, національних та міжнародних. Закріплює це положення ще й те, що технологія SDH може легко інтегруватися з технологією DWDM, яка забезпечує передачу інформації по оптичним магістралям з ще більшими швидкостями - сотні Гбіт/сек та вище за рахунок мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі. В магістральних мережах з ядром DWDM мережі SDH *будуть грати роль мереж доступу*, тобто ту ж роль, яку грають мережі PDH по відношенню до SDH.

6. Мережі SDH узгоджуються з локальними мережами Gigabit Ethernet.

У технології SDH є, звичайно, і недоліки. Сучасним станом частіше всього кажуть про її нездатність динамічно перерозподіляти пропускну здатність між абонентами мережі - властивості, яка забезпечується пакетними мережами. Значимість цього недоліку буде збільшуватись із збільшенням частки та цінності трафіку даних по відношенню до стандартного голосового трафіку.

4.2.3 Ієрархія швидкостей

Технології SONET/SDH підтримують визначену ієрархію швидкостей, яку ілюструє табл.4.5. В стандарті SDH всі рівні швидкостей (і, відповідно, формати кадрів для цих рівнів) мають

загальну назву STM-N (Synchronous Transport Module level N). В технології SONET існує два позначення для рівнів швидкостей STS-N (Synchronous Transport Signal level N), яке застосовується в випадку передачі даних електричним сигналом, та OC-N (Optical Carrier level N) - застосовується в випадку передачі даних по ВОК.

Таблиця 4.5 - Ієрархія швидкостей SONET/SDH

Рівень	SDH	SONET	Швидкість
		STS-1, OS-1	51,84 Мбіт/с
1-й рівень	STM-1	STS-3, OS-3	155,520 Мбіт/с
	STM-3	OC-9	466,560 Мбіт/с
2-й рівень	STM-4	OC-12	622,080 Мбіт/с
	STM-6	OC-18	933,120 Мбіт/с
	STM-8	OC-24	1,244 Гбіт/с
	STM-12	OC-36	1,866 Гбіт/с
3-й рівень	STM-16	OC-48	2,488 Гбіт/с
4-й рівень	STM-64	OC-192	9,953 Гбіт/с
5-й рівень	STM-256	OC-768	39,81 Гбіт/с

В Європі визнається існування американського стандарту SONET і передбачається узгодження цифрових потоків різних стандартів при їх мультиплексуванні в стандартний потік SDH. Сучасна ієрархія швидкостей сигналів SDH там має вигляд, який наведено на рис.4.5.

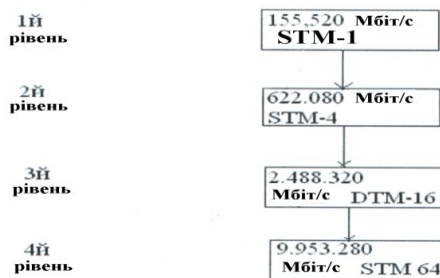


Рисунок 4.5 - Ієрархія швидкостей сигналів SDH

4.2.4 Синхронізація систем з SDH

Стійкість роботи систем SDH залежить від якості синхронізації між її вузлами. В мережі SDH застосовують ієрархічний метод *примусової* синхронізації з парами таймерів «провідний-ведений». Відмовостійкість мереж SDH повинна поширюватись і на відмови джерела синхронізації. Для забезпечення цієї властивості мультиплексор SDH може застосовувати декілька *дублюючих джерел синхронізації* (вже звідси стає зрозумілою важливість правильної синхронізації в мережах SDH). Для синхронізації мереж загального користування характерною є ієрархічність генераторів синхронізації, в якій рівень сигналу кожного генератора синхронізується за еталоном сигналу більш високого рівня, який має більш високу точність.

Ієрархія синхронізувальних джерел - це мережа, яку складено із декількох пластів (як у деякій шаруватій структурі) генераторів, які ще звать *стратум-таймерами* (stratum - пласт). Мережу синхронізації складено із одного генератору пласту Stratum 1 та декількох генераторів пластів більш низького рівня, від Stratum 2 до Stratum 4, як наведено на рис.4.6. Генератор Stratum 1 надсилає сигнали тактової частоти іншим генераторам пласту Stratum 2.

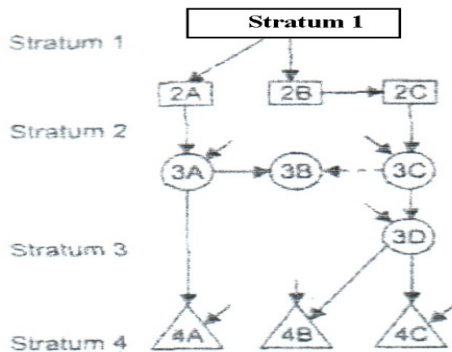


Рисунок 4.6 - Пласти Stratum

Таблиця 4.6 - Вимоги до точності частоти генераторів пластів

Stratum	Мінімальна стабільність
1	$\pm 1 \cdot 10^{-11}$
2	$\pm 1,6 \cdot 10^{-8}$
3	$\pm 4,6 \cdot 10^{-6}$
4	$\pm 20 \cdot 10^{-6}$

В свою чергу, ці генератори надсилають сигнали іншим генераторам пластів Stratum 2 та Stratum 3. Аналогічно, генератори пласту Stratum 3 синхронізують інші елементи пластів Stratum 3 та Stratum 4. Генератори кожного пласту повинні задовольняти стандартним вимогам до точності частоти. Ці вимоги наведено в табл.4.6.

При втраті сигналу синхронізації від генератору більш високого рівня генератори пластів Stratum 2 та Stratum 3 повинні перейти в режим утримання частоти, в якому від них вимагається автономно забезпечувати синхросигнали з визначеною в табл.4.6 точністю на протязі не менш як 24 години після втрати зв'язку з еталонним джерелом більш високого рівня.

Для надійної роботи мережі у кожного мультиплекса SDH повинно бути декілька альтернативних джерел синхронізації, але використовуватися в кожен момент часу повинен тільки один, найбільш точний. При розповсюдженні сигналів синхронізації дотримується визначена ієрархія: від сигналів Stratum 1 синхронізується магістральна мережа, від магістральної - внутрішньозонові, а від внутрішньозонової - місцеві мережі.

4.2.4.1 Резервування джерел синхронізації

При відмові генератора PRC1 мультиплексор M1 переходить в режим утримання частоти внутрішніх генераторів. Точність такого генератору відповідає рівню точності Stratum 4, тому в кадрах STM-N мультиплексор M1 вказує значення QL=11. Кадри з цим значенням розповсюджуються по мережі, але на мультиплексорі M3 цей процес завершується, бо у нього в списку є джерело Ext1 з більш високою якістю QL=4. Тому джерелом синхронізації для кільця стає генератор PRC2, при

цьому мультиплексери M2 та M1 синхронізуються потоками STM-N, які рухаються за стрілкою годинника, а мультиплексор M4 - проти стрілки годинника.

Схему кільця резервування джерел синхронізації наведено на рис.4.7.

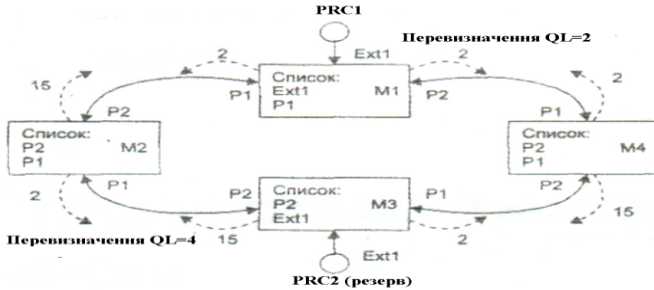


Рисунок 4.7 - Кільце резервування джерел синхронізації

При розповсюдженні сигналів синхронізації додержується визначена ієрархія: від сигналів PRC синхронізується магістральна мережа, від магістральної внутрішньозонової, а від магістральної та внутрішньозонової - місцеві мережі.

Максимальна кількість проміжних мультиплексерів SDH, через які в потоці STM-N передаються синхросигнали від первинного генератора PRC, визначено в стандартах G.803 - це послідовність із 20 мультиплексерів. При більшій кількості проміжних мультиплексерів треба застосовувати зовнішній *ведений задавальний генератор* (ВЗГ), який буде синхронізуватися від первинного та виконувати роль джерела синхронізації для решти мережі. В прикладі на рисунку показано декілька ВЗГ, які синхронізуються від сигналів пласту Stratum 1. *Ведених генераторів, які послідовно синхронізуються один від одного, не повинно бути >10.*

В Україні оператори зв'язку застосовують в якості джерела синхронізації для своїх мереж *первинні еталонні генератори* (ПЕГ), які входять в систему тактової мережевої синхронізації (ТМС) ВАТ «Укртелеком». Відомчі та корпоративні мережі зв'язку можуть користуватися як ТМС «Укртелекому», так і встановлювати свої власні ПЕГ(в випадку специфічних особливостей мережі).

Якщо у декількох джерел, які є в ієрархічному списку, співвідношення значень QL протирічають вказаним в цьому списку пріоритетам джерел, то перевага буде віддаватися джерелу з кращим (меншим) значенням QL (а не джерелу з більш високим положенням в списку).

На рис.4.7 наведено приклад кільця SDH. До кільця під'єднано два ПЕГ - PRC1 та PRC2, при цьому за рахунок відповідного конфігурування всі мультиплексери кільця синхронізуються від PRC1 або безпосередньо, або опосередковано, а генератор PRC2 є резервним.

Безпосередньо від PRC1 синхронізується мультиплексер M1 - через порт Ext1 зовнішньої синхронізації, бо він займає верхній рядок в ієрархічному списку пріоритетів джерел для цього мультиплексера. Для джерела Ext1 задано режим перевизначення QL значенням 2, яке відображає той факт, що джерело має рівень точності Stratum 1. Мультиплексер M1 вказує рівень $QL=2$ в кадрах, які він передає мультиплексерам M2 і M4.

Мультиплексер M2 синхронізується від потоку STM-N, який він отримує по порту P2 (цей порт має найвищий пріоритет в списку M2) від мультиплексера M1, тобто опосередковано - від PRC1. В зворотному напрямку, тобто в напрямку до M1, кадри передаються зі значенням $QL=7$. Мультиплексер M3 обирає в якості джерела синхронізації порт P2 - він і в списку стоїть першим, і якість сигналу від нього ($QL=2$) вища, ніж у зовнішнього порту Ext1 ($QL=4$). І зрештою, мультиплексер M4 обирає для синхронізації сигнали з порту P2, бо цей порт при рівності якостей сигналів з портом P1 стоїть вище в ієрархічному списку.

4.2.5 Типові топології SDH

В мережах SDH застосовуються різні топології зв'язків. Найбільш часто використовують топологію кільця та лінійні кола мультиплексорів. Також застосовують і ячеювув топологію, яка є близькою до повнозв'язаної. Кільце SDH будується із мультиплексорів вводу-виводу, які мають не менш, ніж два агрегатних порту (рис.4.8а). Потоки користувачів вводяться в

кільце та виводяться з кільця через трибутарні порти, створюючи з'єднання типу «точка-точка» (на рисунку 4.8а в якості прикладу наведено таке з'єднання). Кільце є класичною регулярною топологією, яка володіє потенційною відмовостійкістю - при однократному обриві кабеля або виходу з ладу мультиплексера з'єднання збережеться, якщо його направити по кільцю в протилежному напрямі.

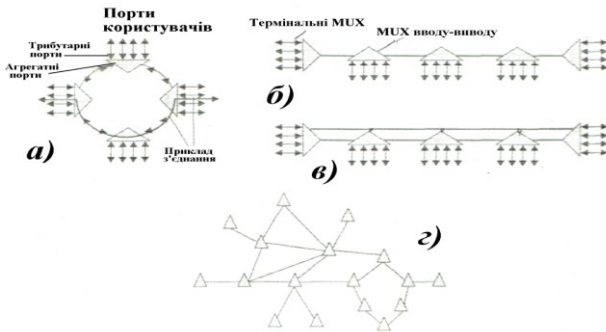


Рисунок 4.8 - Типові топології

Кільце звичайно будують на основі кабеля з двома ОВ, але інколи для підвищення надійності та пропускної здатності застосовують чотири волокна. Коло (рис.4.8б) - це лінійна послідовність мультиплексерів із яких два кінцевих грають роль термінальних, а інші - мультиплексери вводу-виводу. Звичайно мережа з топологією кола застосовується в тих випадках, коли вузли мають відповідне географічне розташування, наприклад, вздовж магістралі залізниці або трубопроводів. В цих випадках можна застосовувати і плоскі кільця (рис.4.8в), які забезпечують більш високий рівень відмовостійкості за рахунок застосування двох додаткових волокон в магістральному кабелі та по одному додатковому агрегатному порту у термінальних мультиплексерів.

Ці базові топології можливо комбінувати при побудові складної та розгалуженої мережі SDH, створюючи ділянки з радіально-кільцевою топологією, з'єднання типу «кільце-кільце» і т.д.. Найбільш загальним випадком є ячeyкова топологія мережі (рис.4.8г), при якій мультиплексери з'єднуються один з одним

великою кількістю зв'язків; за рахунок цього мережа може досягти дуже високого ступеню продуктивності та надійності.

Топологія «точка-точка» є найбільш простим прикладом базової топології мережі SDH. Сегмент мережі, який зв'язує два вузли А та В, наведено на рис.4.10. Цю топологію можна реалізувати за допомогою термінальних мультиплексерів (ТМ) за наступними схемами:

- без резервування каналу прийому-передачі;
- зі 100% -м резервуванням типу 1+1, яка використовує основний та резервний агрегатні виходи (канали прийому-передачі) (рис.4.9).

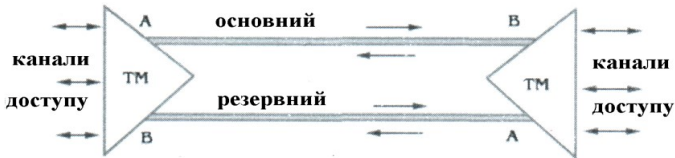


Рисунок 4.9 - Топологія «точка-точка» з застосуванням ТМ без резервування каналу прийому-передачі;

Топологія «послідовне лінійне коло». Ця базова топологія застосовується тоді, коли інтенсивність трафіку в мережі не дуже велика і існує необхідність відгалужень в ряді точок лінії, де можуть вводитися канали доступу. Цю топологію може бути реалізовано в вигляді простого послідовного лінійного кола без резервування (рис.4.10).



Рисунок 4.10 - Топологія «послідовне лінійне коло» на ТМ та ТДМ зі 100% резервуванням типу 1+1, яка використовує основний та резервний агрегатні виходи (канали прийому-передачі);

Більш складний варіант топології «послідовне лінійне коло» з резервуванням типу 1+1 наведено на рис.4.11. Такий варіант топології ще називають «спрощене кільце». Топологія «кільце» з захистом 1+1 (рис.4.12) широко застосовується в побудові мереж SDH перших двох рівнів SDH-ієрархії (швидкості, відповідно, 155 Мбіт/с і 622 Мбіт/с).

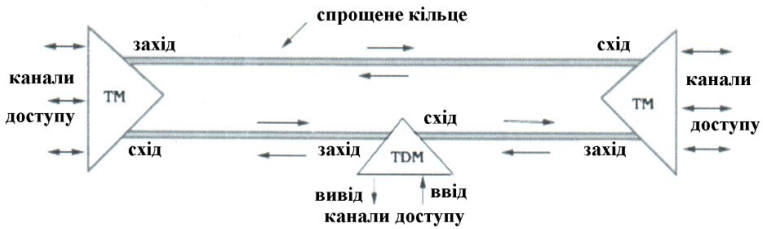


Рисунок 4.11 - Топологія «послідовне лінійне коло» типу «спрощене кільце» з захистом 1+1

Основна перевага цієї топології - це легкість організації захисту типу 1+1, дякуючи наявності в синхронних мультиплексерах SMUX двох пар оптичних каналів прийому-передачі: захід-схід, які дають можливість формування подвійного кільця з зустрічними потоками.

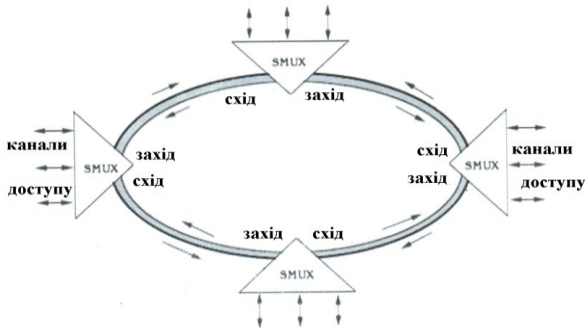


Рисунок 4.12 - Топологія «кільце» з захистом 1+1

На рис.4.13 наведено топологію «зірка». Особливістю цієї топології є застосування мультиплексера (мультиплексер SMUX) в якості концентратора.

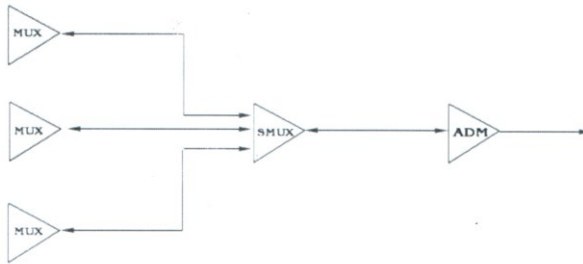


Рисунок 4.13 - Топологія «зірка» з мультиплексером в якості концентратора

4.2.6 Типи устаткування систем SDH

Основним елементом мережі SDH є мультиплексер (рис.4.14). Мультиплексер має деяку кількість портів PDH та SDH, наприклад, порти PDH 2 Мбіт/с, 34 Мбіт/с та порти SDH 155 Мбіт/с STM-1 та 622 Мбіт/с STM-4. Порти мультиплексерів SDH поділяють на агрегатні та трибутарні (триби). Трибутарні порти часто називають також портами вводу-виводу, а агрегатні - лінійними портами.

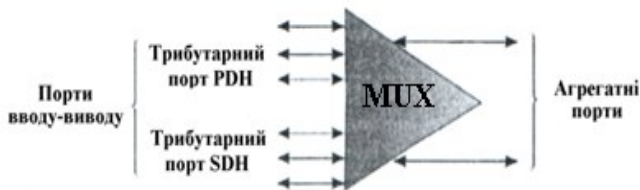


Рисунок 4.14 - Мультиплексер SDH

Ця термінологія відображає типові топології мереж SDH з яскраво вираженою магістраллю в вигляді кола або кільця; через магістраль передаються потоки даних, які надходять від користувачів мережі через порти вводу-виводу, тобто, начебто «втікають, входять» в агрегований потік (tributary - притік) - рис.4.15.

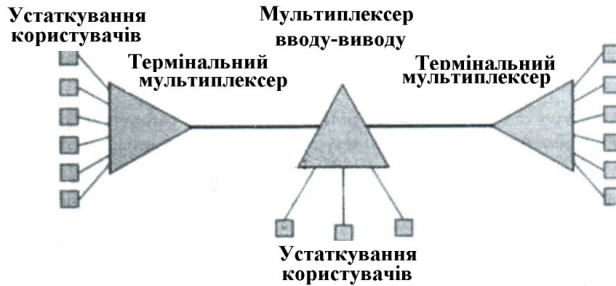


Рисунок 4.15 - Типи мультиплексерів SDH

Мультиплексери SDH звичайно поділяють на термінальні мультиплексери (Terminal Multiplexor - TM) та мультиплексери вводу-виводу (Add-Drop Multiplexor - ADM). Різниця між ними полягає не в складі портів, а в розташуванні мультиплексера в мережі SDH (його положення в мережі). Термінальний мультиплексер завершує агрегатні канали, мультиплексуючи в них велику кількість каналів вводу-виводу (трибутарних). Мультиплексер вводу-виводу транзитом передає агрегатні канали, займаючи проміжне положення на магістралі (в кільці, колі або в змішаній топології). При цьому дані трибутарних каналів вводяться або виводяться в агрегатний канал. Агрегатні порти мультиплексера підтримують максимальний для даної моделі рівень швидкості STM-N, який є характеристикою мультиплексера в цілому, наприклад, STM-4 або STM-64.

Більшість виробників випускає універсальні мультиплексери, які можуть застосовуватися і як термінальні і для вводу-виводу - в залежності від набору встановлених модулів з агрегатними та трибутарними портами. Обмеженням може бути можливість встановлення декількох агрегатних портів. Річ у тому, що виробники часто випускають такі моделі мультиплексерів, які дозволяють встановлювати лише одну агрегатну карту з двома портами - мінімальна конфігурація, яка забезпечує роботу в мережі з топологією кільце або коло. Така побудова мультиплексера знижує його вартість, але може ускладнити проектування мережі, якщо треба реалізувати ячeyкову топологію на максимальній для мультиплексера швидкості.

Окрім мультиплексрів в склад мережі SDH можуть входити регенератори, які необхідні для переборення обмежень за відстанню між мультиплексерами. Сучасним станом регенератори SDH застосовують доволі рідко, бо їх вартість ненабагато менша вартості мультсекції в диплексері, а функціональні можливості неспіврозмірні.

4.2.7 Стек протоколів SDH

В цифровій техніці під стеком розуміють організацію збереження та передачі двійкових даних типу послідовного регістру, наприклад LIFO - Last In First Out. В нашому випадку під стеком будемо розуміти деяку сукупність з чітко визначеною послідовністю дій.

Стек протоколів SDH складено із протоколів 4-х рівнів:

1) Фізичний рівень, який в стандарті звать *фотонним* (photonic), має справу з кодуванням бітів інформації шляхом модуляції світла. Для кодування оптичного сигналу застосовують потенціальний код NRZ.

2) Рівень секції (section) підтримує фізичну цілісність мережі. Секцією в технології SDH називають кожен неперервний відрізок ВОК, який з'єднує пару пристроїв SONET/SDH між собою, наприклад, мультиплексер та регенератор, регенератор та регенератор. Секцію часто називають регенераторною секцією, маючи на увазі, що виконання функцій цього рівня не вимагає, щоб кінцеві пристрої були мультиплексерами. Протокол регенераторної секції має справу з деякою частиною заголовка кадра, яку називають заголовком регенераторної секції (RSOH), і на основі службової інформації може проводити тестування секції та підтримувати операції адміністративного контролю. На рис.4.16 наведено схему стеку протоколів технології SDH.

3) Рівень лінії (line) відповідає за передачу даних між двома мультиплексерами мережі. Протокол цього рівня працює з кадрами рівня STM-N для виконання різних операцій мультиплексування та демультиплексування, а також вставки та видалення даних від користувачів. Протокол лінії також

відповідає за проведення операцій реконфігурування лінії в випадку відмови якого-небудь її елемента - оптичного волокна, порту або сусіднього мультиплексера. Лінію також часто називають *мультиплексною секцією*.

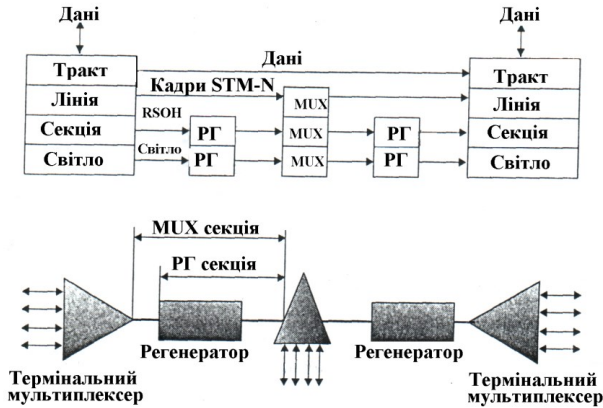


Рисунок 4.16 - Стек протоколів технології SDN: MUX - мультиплексер; РГ - регенератор

4) Рівень тракту (path) відповідає за доставку даних між двома кінцевими користувачами мережі. Тракт (шлях) - це складене віртуальне з'єднання між користувачами. Протокол тракту повинен прийняти дані, які надійшли в форматі користувача, наприклад, в форматі T1, та перетворити їх в синхронні кадри STM-N.

4.2.8 Структура кадру STM-N

Кадри STM-N мають достатньо складну структуру, яка дозволяє агрегувати в загальний магістральний потік потоки SDH та PDH з різними швидкостями, а також виконувати операції вводу-виводу *без повного демультимплексування* магістрального потоку.

Операції мультиплексування та вводу-виводу виконуються з застосуванням віртуальних контейнерів (Virtual Container, VC), які дозволяють переносити через мережу SDH блоки даних PDH.

Віртуальний контейнер містить окрім блоків даних PDH деяку службову інформацію, зокрема, заголовок шляху контейнера (Path OverHead, POH), в якому переноситься статистична інформація про процес проходження контейнера вздовж шляху від його початкової до кінцевої точки, а також інші службові дані, наприклад, індикатор встановлення з'єднання між кінцевими точками. В результаті віртуальний контейнер має розмір, що є більшим, ніж відповідний розмір блоку даних PDH, який він переносить. Наприклад, віртуальний контейнер VC-12, який переносить 32 байти даних потоку E1, складається із 35 байт.

На рис.4.17 наведено схему мультиплексування даних в SDH. На рисунку введено деякі скорочені позначення. VC - Virtual Container, віртуальний контейнер; TU - Tributary Unit, трибутарний блок (триби); AU - Administrative Unit, адміністративний блок; AUG - Administrative Unit Groupe, група адміністративних блоків; C-2, C-3... блоки даних; TUG - Tributary Unit Groupe, група трибутарних блоків. На рис.4.17 структурні одиниці кадру SDH, які мають у своєму складі покажчики, відмічені сірим кольором.

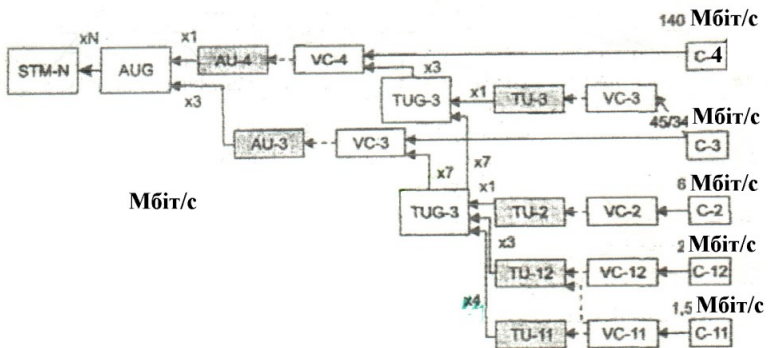


Рисунок 4.17 - Схема мультиплексування даних в SDH

В технології SDH визначено декілька типів віртуальних контейнерів, які призначено для транспортування основних типів блоків PDH: VC-11 (1,5 Мбіт/с) , VC-12 (2 Мбіт/с), VC-2 (6 Мбіт/с), VC-3 (34/45 Мбіт/с), VC-4 (140 Мбіт/с).

4.2.8.1 Комутація в SDH

Віртуальні контейнери є *одиноцею комутації* мультиплексерів SDH. В кожному мультиплексері існує таблиця з'єднань (її ще звуть таблицею крос-з'єднань), в якій вказано, наприклад, що контейнер VC-12 порту P1 з'єднано з контейнером VC-12 порту P5, а контейнер VC-3 порту P8 з'єднано з контейнером VC-3 порту P9. Таблицю з'єднань формує адміністратор мережі за допомогою системи керування або керувального терміналу в кожному мультиплексері так, щоб забезпечити наскрізний шлях для з'єднання кінцевих точок мережі, до яких під'єднано устаткування користувачів.

Для суміщення в рамках однієї мережі синхронної передачі кадрів STM-N з асинхронним характером даних PDH (це можуть бути дані користувачів) в технології SDH застосовують покажчики (pointers). Концепція покажчиків є ключовою в технології SDH; вона замінює процедуру вирівнювання швидкостей асинхронних джерел (технологія PDH) за допомогою додаткових бітів як прийнято в технології PDH. Покажчик визначає розташування віртуального контейнера в структурі більш високого рівня - трибутарному блоці Tributary Unit, TU або адміністративному блоці AU - Administrative Unit. Застосування покажчика дозволяє віртуальному контейнеру «плавати» в деяких межах всередині свого трибутарного або адміністративного блоку, який, в свою чергу займає вже фіксоване положення в кадрі. Основна відміна цих блоків від віртуального контейнера - це додане поле покажчиків. Система покажчиків і дозволяє мультиплексеру знайти положення даних користувачів в синхронному потоці байтів кадрів STM-N і «на льоту» витягати їх звідти; цього не дозволяє той механізм мультиплексування, який прийнято в PDH.

Трибутарні блоки об'єднуються в групи, які всюю чергу, входять в адміністративні блоки. Група із N адміністративних блоків (AUG) і створює корисне навантаження кадру STM-N; окрім того, в кадр входить заголовок з загальною для всіх адміністративних блоків службовою інформацією. На кожному кроці перетворення до попередніх даних добавляється декілька

службових байтів, які допомагають розпізнати структуру групи блоків або блока і потім, за допомогою покажчиків визначити початок тих даних, які належать користувачам.

Схема мультиплексування SDH надає різноманітні можливості і за об'єднаннями PDH потоків користувачів.

4.2.9 Методи забезпечення живучості мережі (резервування)

Однією із сильних сторін первинних мереж SDH є різноманітний набір засобів відмовостійкості, який дозволяє мережі швидко (за десятки мілісекунд) відновлювати роботоздатність в випадку відмови якогось елемента мережі - каналу зв'язку, порту або карти мультиплексера, мультиплексера в цілому.

В SDH в якості назви механізмів відмовостійкості застосовують термін *автоматичне захисне перемикання* (Automatic Protection Switching APS), який відображає факт переходу (перемикання) на резервний шлях або резервний елемент мультиплексера при відмові основного. Мережі, які підтримують такий механізм в стандартах SDH називають «самовідновлюваними» (точніше, «самовиліковними» - selfhealing).

В устаткуванні і мережах SDH застосовують наступні основні види автоматичного захисту, які різняться типом елемента, що захищають:

- 1) Equipment Protection Switching, EPS - захист блоків і елементів устаткування SDH;
- 2) Card Protection, CP - захист агрегатних та трибутарних карт мультиплексера;
- 3) Multiplex Section Protection, MSP - захист мультиплексної секції, тобто ділянки мережі між двома суміжними мультиплексерами SDH;
- 4) Sub-Network Connection Protection, SNC-P - захист шляху (з'єднання) через мережу для визначеного віртуального контейнера;

5) Multiplex Section Shared Protection Ring, MS-SPRing - розділений між з'єднаннями користувачів захист шляхів в кільцевій топології.

В мережах SDH застосовують схеми захисту 1+1, 1:1, 1:N.

Захист 1+1 означає, що резервний елемент виконує ту ж роботу, що і основний. Наприклад, при захисті трибутарної карти за схемою 1+1 трафік проходить як через робочу карту (захищену), так і через захисну (резервну). Захист 1:1 має на увазі, що захисний елемент в нормальному режимі не виконує функції захищеного елемента, а перемикається на них тільки в разі відмови. Захист 1:N передбачує виділення одного захисного елемента із N захищуваних. При відмові одного із захищуваних елементів його функції починає виконувати захисний, при цьому інші елементи залишаються без захисту - до тих пір, поки елемент, який відмовив не буде замінено.

Захист блоків (EPS) застосовується для таких життєво важливих елементів мультиплексера, як процесорний блок, блок комутації (крос-конекта), блок живлення, блок вводу сигналів синхронізації і т.і. EPS звичайно працює за схемою 1+1 або 1:1.

4.2.9.1 Захист карт

Захист карт (CP) дозволяє мультиплексеру автоматично продовжувати роботу в випадку відмови однієї із агрегатних або трибутарних карт. Застосовується захист за схемами 1+1, 1:1 та 1:N. Захист 1+1 забезпечує неперервність транспортного сервісу, бо трафік з'єднань користувачів не переривається при відмові карти.

В наведеному на рис.4.18 прикладі в мультиплексері підтримується захист трибутарних двопортових карт за схемою 1+1. Одна із трибутарних карт є основною (робочою), а друга - захисною. Режим роботи пари карт задається командою конфігурування мультиплексера. В режимі, коли обидві трибутарні карти є роботоздатними, трафік обробляється паралельно кожною картою.

Для перемикання трафіку між трибутарними картами застосовується додаткова карта-перемикач. Вхідний трафік кожного порту надходить на вхідний міст карти-перемикача, який розгалужує трафік і передає його входи відповідних портів

трибутарних карт. Агрегатна карта отримує обидва сигнали STM-N від трибутарних карт та обирає сигнал тільки від активної в даний момент часу карти.

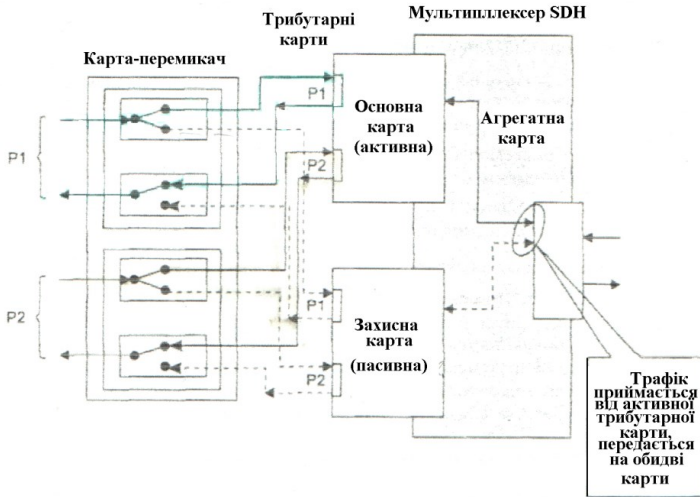


Рисунок 4.18 - Захист трибутарних карт за схемою 1+1

Вихідний трафік від агрегатної карти також обробляється обома трибутарними картами, але карта-перемикач передає на вихід тільки трафік від активної карти. При відмові основної карти (або другій події, яка вимагає переходу на захисну карту - деградація сигналу, помилка сигналу, видалення карти) агрегатна карта за командою від блока керування мультиплексором переходить на прийом сигналу від захисної трибутарної карти. Одночасно карта-перемикач також починає передавати на вихід сигнали вихідного трафіку від захисної карти.

Даний спосіб забезпечує автоматичний захист всіх з'єднань, які проходять через захищену карту. При встановленні СЗ-захисту конфігурація з'єднань робочої карти копіюється для захисної карти.

4.2.9.2 Захист мультиплексної секції

Захист мультиплексної секції (MSP) діє більш вибірково в порівнянні з захистом карт. Захищається секція між двома мультиплексерами, яка має в своєму складі два порти та лінію зв'язку (можливо, в свою чергу, мають в своєму складі регенератори, але не мультиплексери). Звичайно застосовують схему захисту 1+1. При цьому для робочого каналу (верхня частина з'єднаних кабелем портів; схему наведено на рис.11.19) конфігурується захисний канал (нижня пара портів). При встановленні захисту MSP в кожному мультиплексері необхідно виконати конфігурування і при цьому навести зв'язок між робочими та захисним портами. В вихідному стані весь трафік передається як по робочому, так і по захисному каналам.

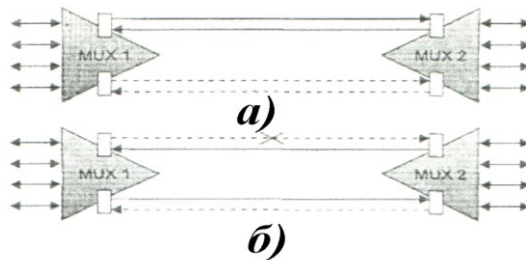


Рисунок 4.19 - Захист MSP

На рисунку наведено схему односпрямованого захисту, але існують і двопрямовані схеми захисту MSP.

Механізм MSP забезпечує захист всіх з'єднань, які проходять через захищену мультиплексну секцію.

Час перемикання захисту MSP, відповідно вимогам стандарту, не повинно перевищувати 50 мсек.

4.2.9.3 Захист з'єднання

Захист з'єднання (SNC-P) забезпечує перемикання визначеного з'єднання користувача на альтернативний шлях при відмові основного шляху. Об'єктом захисту SNC-P є трибутарний трафік, який поміщено в віртуальний контейнер визначеного

типу (наприклад, в VC-12, VC-3 або VC-4). Застосовується схема захисту 1+1.

Захист SNC-P конфігурується в двох мультиплексерах - вхідному, в якому трибутарний трафік із віртуального контейнера розгалужується, а також в вихідному, в якому сходяться два альтернативних шляхи трафіку. Приклад захисту SNC-P наведено на рис.4.20.

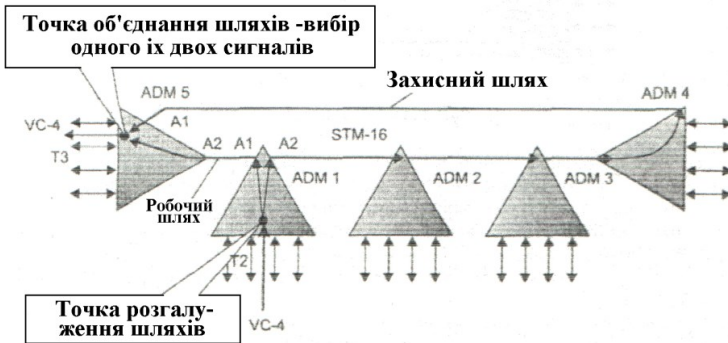


Рисунок 4.20 - Захист SNC-P

В мультиплексері ADM1 для віртуального контейнера VC-4 трибутарного порту T2 задано два з'єднання: з одним із чотирьох контейнерів: VC-4 агрегатного порту A1 і з одним із чотирьох контейнерів VC-4 агрегатного порту A2. Одне із з'єднань конфігурується як робоче, а друге - як захисне, при цьому трафік передається по обом з'єднанням. Проміжні (для цих з'єднань) мультиплексери конфігуруються звичайним чином. В вихідному мультиплексері контейнер VC-4 трибутарного порту T3 також з'єднується з контейнерами - агрегатного порту A1 та агрегатного порту A2. Із двох потоків, які надходять на порт T3 обирається той, у якого вище якість (при однаковій нормальній якості обирається сигнал із агрегатного порту, який при конфігуруванні обрано в якості робочого).

Захист SNC-P працює в будь-яких топологіях мереж SDH, у яких є альтернативні шляхи слідування трафіку (кільцевих та ячeyкових).

4.2.9.4 Захист MS-SPRing

Захист з розділенням кільця (MS-SPRing) забезпечує в деяких випадках більш економічний захист трафіку в кільці. Хоча захист SNC-P цілком підходить кільцевої топології мережі SDH, в деяких випадках її застосування зменшує корисну пропускну здатність кільця, бо кожне з'єднання споживає подвоєну смугу пропускання вздовж всього кільця. Так, в кільці STM -16 можна встановити тільки 16 захищених за SNC-P з'єднань VC-4 (рис.4.21).

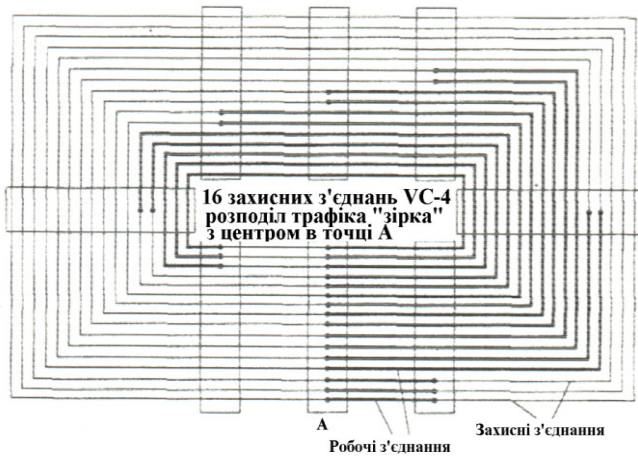


Рисунок 4.21- Захист SNC-P в кільці

Захист MS-SPRing дозволяє використовувати пропускну здатність кільця більш ефективно, бо смуга пропускання не резервується зарані для кожного з'єднання. Замість цього резервується половина пропускну здатності кільця, але ця резервна смуга виділяється для з'єднань динамічно, в міру необхідності, тобто після виявлення факту відмови або лінії або мультиплексера. Степінь економії смуги при застосуванні MS-SPRing залежить від розподілу трафіка.

4.2.9.5 Забезпечення живучості мережі синхронізації

Стійка робота мережі SDH суттєво залежить від якості синхронізації між її вузлами. В мережі SDH застосовується

ієрархічний метод примусової синхронізації з парами таймерів «провідний-ведений». Цей метод застосовується не тільки в мережах SDH, але практично в усіх TDM-мережах: первинних на основі технології PDH та телефонних.

Очевидно, що відмовостійкість мереж SDH повинна поширюватись і на відмови джерела синхронізації. Для забезпечення цієї властивості мультиплексер SDH може застосовувати декілька дублюючих джерел синхронізації. Це може бути:

1) Сигнал зовнішнього мережевого таймера з частотою 2048 кГц, який зветься *первинним еталонним генератором*, ПЕГ (Primary Reference Clock, PRC), в відповідності до рекомендацій G.86. Його точність повинна бути не гірше, ніж $1 \cdot 10^{-11}$. Це дуже висока точність і забезпечити її непросто. Первинний еталонний таймер являє собою хронувальне *атомне джерело* тактових імпульсів (цезієвий або рубіновий годинник). Його калібрують вручну або автоматично за сигналами світового скоординованого часу UTC (Universal Time Coordinated).

2) Сигнал від вторинного задавального генератора (ВЗГ), який є веденим по відношенню до ПЕГ, але може бути і самостійним джерелом.

3) Сигнал від супутника глобальної системи позиціонування (Global Positioning System, GPS).

4) Сигнал внутрішнього таймера вузла SDH. Точність сигналів внутрішнього таймера невелика, порядку $(1 \dots 5) \cdot 10^{-6}$.

5) Сигнал 2048 кГц, який виділяють із лінійного (трибутарного) сигналу STM-N. Точність цього джерела $5 \cdot 10^{-8}$.

6) Сигнал з інтерфейсу PDH користувача (трибутарного).

За тією причиною, що сигнали трибутарних потоків 2 Мбіт/с «плавають» всередині віртуальних контейнерів VC-12, то їх застосування в якості джерел синхронізації недоцільно. Низька точність внутрішнього таймера мультиплексера також не дозволяє добитися доброї синхронізації передавального та приймального вузлів SDH. Тому основними джерелами надійної та точної синхронізації є сигнали ПЕГ та сигнали, які виділяються із кадрів STM-N.

В якості зовнішніх джерел тут виступають як зовнішні таймери, що під'єднуються до спеціальних синхронізувальних входів мультиплексера, так і сигнали STM-N лінійного входу (і трибутарних входів, якщо вони підтримують будь-який рівень STM, а не PDH). Одна схема мультиплексера здійснює вибір джерела синхронізації для внутрішніх елементів мультиплексера, а друга - для зовнішніх.

4.2.10 Переваги мереж SDH перед плезіохронними цифровими системами передачі

Сучасним станом основні проблеми передачі інформації на будь-які відстані (в межах планети Земля) з практично необмеженою швидкістю передачі можна вважати майже вирішеними. До вирішених проблем можливо віднести наступні:

1) Створення універсального середовища передачі в вигляді ОВ (слаба залежність від відстані та швидкості передачі);

2) Розробка методів формування та передачі сигналів, а також відповідної апаратури, які дозволяють на розвиненій мережі обходитися без необслуговуваних регенераторів;

3) Створення універсальної багатофункціональної апаратури в вигляді базового синхронного мультиплексера з програмним керуванням (може конфігуруватися як ТМ, ДІМ, крос-конектор, SLM і регенератор).

4) Збільшення пропускної здатності побудованих волоконно-оптичних ліній передачі без додаткового капітального будівництва шляхом заміни апаратури, тобто мультиплексерів пунктів доступу;

5) Застосування в мережі ПЗ керування (здійснюють автоматичний контроль за функціонуванням мережі, локалізацію виникаючих несправностей елементів мережі та автоматичну маршрутизацію трафіку по резервним трактам), керування конфігуруванням мережі та її елементами, інші функції керування та обслуговування.

Ці вирішення стали можливими дякуючи створенню та широкому впровадженню технологій SDH, яка є черговим етапом

еволюції ЦСП. В 90-і роки ХХ-го сторіччя в розвинених країнах устаткування систем передачі SDH на всіх ділянках телекомунікаційних систем стало основним, а мережі зв'язку почали називатися цифровими транспортними мережами. Таке стрімке та повсюдне впровадження технології SDH пояснюється перевагами систем передачі та мереж SDH перед плезіохронними ЦСП. Розглянемо головні з цих переваг.

1. Застосування синхронного мультиплексування плезіохронних цифрових потоків при формуванні структури циклів передачі STM-1 та наступного синхронного мультиплексування цих потоків при формуванні модулів STM-N (N=4, 16, 64, 256), що забезпечує наступне:

а) спрощення техніки мультиплексування (демультиплексування) порівняно з плезіохронними ЦСП;

б) доступ до компонентних цифрових потоків та можливість їх виділення/вставки в будь-якому пункті лінійного тракту практично без перетворення всього масиву передаваного корисного навантаження;

в) застосування крос-конекторів в трактах різного порядку відповідно до планованої конфігурації транспортної мережі.

2. Висока ефективність використання устаткування лінійного тракту, яка досягається за рахунок наступного:

а) застосування в якості середовища передачі ОВ з параметрами, які забезпечують довжину ділянки регенерації порядку 100...120 км без оптичних підсилювачів та порядку 60...800 км при їх вмиканні в тракт;

б) переходом до передачі по лінійному тракту в основному сигналів високошвидкісних цифрових потоків, які сформовано в мультиплексах верхніх рівнів ієрархії, тобто транспортних модулів STM-64 та STM-256 зі швидкостями передачі 10 та 40 Гбіт/с, відповідно;

в) використання технології DWDM, яка вже сучасним станом в діапазоні хвиль 1530...1612 нм в одному ОВ дозволяє сформувати 192 оптичних трактів (каналів) та передавати по ним сигнали рівню STM-64, що складає сумарну пропускну здатність 1920 Гбіт/с. Приклад-система передачі OPTera 1600G компанії

Nortel, яка забезпечує пропускну здатність одного ОВ до 1600 Гбіт/с.

3. Апаратура систем передачі SDH є багатофункціональною та має високий степінь уніфікації. Її основу складає *базовий синхронний мультиплексер*, який являє собою стандартний блок та комплект базових елементів заміни (ТЕЗ), що забезпечують спряження між електричними та оптичними трактами, а також кросову комутацію. Така побудова апаратури дозволяє виконувати наступні дії:

а) задавати конфігурацію будь-якого елемента системи передачі SDH (термінального мультиплексера, крос-конектора, регенератора і т.і.) в кожному конкретному випадку шляхом вибору визначених ТЕЗ, дякуючи чому система передачі SDH завжди буде відповідати постійно зростаючим потребам оператора зв'язку SDH;

б) легко перебудувати один елемент системи передачі SDH в другий, наприклад, ТМ в ДІМ або локальний (місцевий) крос-конектор, для чого достатньо додати відповідні інтерфейси та змінити конфігурацію за допомогою програмних засобів керування.

4. Можливість централізованого дистанційного моніторингу та керування всіма елементами мережі SDH. Для цих цілей в структурі циклу передачі модуля STM-1(заголовки RSOH та MSOH) виділено байти D1...D12, які створюють канали службового зв'язку з загальною швидкістю передачі 768 кбіт/с. По цих каналах від централізованого пункту керування до всіх елементів мережі (мультиплексери, крос-конектори, регенератори) і назад передається керувальна інформація. Система керування надає не тільки всі можливості по конфігуруванню мережевих елементів, відстежуванню та реєстрації аварій, збору статистики, але і забезпечує керування на мережевому рівні за наступними напрямками:

а) контролює стан елементів мережі, встановлює постійні з'єднання між будь-якими кінцевими точками і в випадку пошкоджень на основних маршрутах; перерозподіляє трафік (на обхідні маршрути);

б) слідкує за роботоздатністю трактів і каналів, контролює проходження по ним (по мережі) «контейнерів» і «модулів», забезпечує якість обслуговування від абонента до абонента;

в) організує керування мережею (реконфігурація, функція самовідновлювальної мережі при аваріях), що створює передумови для досягнення високої надійності та живучості мережі.

5. В рамках технології SDH розроблено не тільки нову ієрархію швидкостей передачі сигналів та схеми мультиплексування цифрових потоків, але і перспективна концепція побудови і розвитку мереж зв'язку. Синхронні мультиплексери (термінальні, виділення/вставки) та крос-конектори конструктивно забезпечують підтримку таких мережевих технологій, як вузлова мережа, лінійна мережа з пунктами виділення/вставки, кільцева топологія мережі, ін.. Що найбільш важливо: розроблено ефективні і повністю автоматичні перемикання на резервній лінійний тракт, що підвищує надійність і живучість мереж SDH.

6. Транспортна мережа SDH має чітку пошарову (пластову) будову, вона вміщує три мережевих пласти: каналів, трактів і середовища передачі. Самий верхній пласт створює мережевий пласт каналів, який обслуговує власне користувачів. Групи каналів об'єднуються в групові тракти, які створюють мережеві пласти трактів вищого та нижчого порядків - це середній пласт. Групові тракти організуються в лінійні тракти, які відносяться до нижчого пласту - мережевому пласту середовища передачі, побудова якого залежить від середовища передачі. Цей пласт підрозділяється на пласти секцій і фізичного середовища. Пласт секцій ділиться на пласт мультиплексних та регенераційних секцій. Кожен пласт має визначені точки доступу та свої засоби контролю, керування та оперативного перемикання. Поділ по мережевим пластам та їх автономність дозволяють втілити наступне:

а) впроваджувати нові технології в кожному мережевому пласті або змінювати устаткування окремих пластів незалежно від ін. пластів;

б) мати в кожному пласті власні засоби контролю, керування та обслуговування, засоби боротьби з відмовами, наприклад, апаратуру оперативних перемикачів (підвищує якість надання послуг, ефективність використання засобів резервування, знижує вплив аварій на ін. пласти).

7. Системи передачі SDH мають вбудовані засоби контролю, керування та боротьби з відмовами. Вони полегшують та прискорюють виявлення несправностей та перемикання устаткування на резервні ємності трактів (або навпаки), що дозволяє побудувати транспортні мережі з високою надійністю та живучістю. Але переваги технології SDH в частині надійності та живучості самі по собі в повній мірі не реалізуються. Хоча апаратура систем передачі SDH досить надійна, необхідно враховувати, що волоконно-оптичні лінійні тракти і особливо лінії передачі мають величезну пропускну здатність. Тому відмова навіть на одній ділянці мережі може призвести до втрати зв'язку між десятками тисяч користувачів та величезним економічним втратам.

Для запобігання подібним випадкам повинно передбачити спеціальні міри по забезпеченню відмовостійкості мереж - це створення резервного устаткування та трактів, процедур реконфігурування мереж в процесі їх експлуатації. Виникла концепція самовідновлювальних, або так званих «самовиліковних» (Self-Healing) мереж. Такі мережі, в випадку виходу з ладу окремих елементів, здатні зберігати роботоздатність або за малий час автоматично відновлювати зв'язок без серйозних наслідків для користувачів.

Побудові самовідновлювальних мереж, які застосовують технологію SDH сприяє ряд наступних факторів:

а) величезна пропускну здатність ВОСП і зниження вартості ВОК;

б) наявність вбудованих засобів контролю, керування та боротьби з відмовами;

в) поділ транспортної мережі на незалежні функціональні пласти;

г) інтелектуалізація мережі SDH, яка має свою інтелектуальну підмережу керування, використовує «інтелектуальні» можливості мультиплексерів та крос-конекторів або апаратури перемикачів.

8. Мережі SDH забезпечують ефективне використання пропускну здатності, підвищену надійність та швидке надання послуг. Одна з переваг транспортної мережі - висока доступність сервісних функцій, яка реалізована шляхом застосування різних схем резервування секцій, трактів і інших елементів мережі. Мережі SDH є більш гнучкими у всіх відношеннях - як в плані надання послуг так і в частині перемаршрутизації цифрових потоків з точки зору користувачів та операторів мережі. Створення нових трактів вимагає менше часу та забезпечується меншою кількістю обладнання. Всі роботи по перемикачів трактів виконуються програмно та дистанційно з центру керування на протязі декількох десятків секунд. Такі можливості було продемонстровано фірмою «Макомнет» в Москві, коли при проведенні будівельних робіт було пошкоджено оптичний кабель. Трафік було автоматично перемкнено на резервну лінію передачі, а користувачі навіть не відчули наслідків аварії.

9. На мережі SDH можна об'єднувати обладнання різних виробників, бо в системах передачі SDH стандартизовано всі оптичні та електричні інтерфейси. Сучасне обладнання SDH має стандартний інтерфейс Q₃ для під'єднання до системи керування мережею TMN.

Розглянуті вище переваги систем передачі та мереж SDH дозволяють зробити висновок, що на базі технології SDH створюється універсальна транспортна мережа, яка є найвищим досягненням для систем з каналним розділенням ресурсів мережі.

Сучасний світовий рівень розвитку цифрових транспортних мереж та глобальна тенденція розширення номенклатури та підвищення якості телекомунікаційних послуг роблять актуальною проблему створення широкосмугових мереж з інтеграцією обслуговування В-ISDN. Основами для їх побудови є наступні:

- сполучення технологій SDH та ATM, коли ячейки ATM транспортуються по мережі SDH в якості навантажень віртуальних контейнерів та їх зчеплень;

- поява технологій POS (Packets over SDH) - пакети поверх SDH та LAPS (Link Procedure for SDH) - процедура доступу до каналу SDH, розміщення сигналів FDDI, які мають швидкість передачі 125 Мбіт/с, в контейнерах VC-4 і ін..

Запитання для самоконтролю

1. Які існують основні технології мереж зв'язку при застосуванні ОВ в якості середовища передачі?
2. За якими причинами виникла технологія PDH?
3. Які особливості і параметри технології PDH?
4. Чим характеризується плезіохронний метод передачі інформації?
5. Як вводиться ієрархія швидкостей передачі? Які її різновиди?
6. Які існують схеми плезіохронної цифрової ієрархії?
7. В чому різниця ієрархій плезіохронних систем Європи, США і Японії?
8. Які обмеження має технологія PDH?
9. Чи була необхідність в розробці синхронної цифрової ієрархії (SDH)?
10. В чому особливості синхронної ієрархії?
11. В чому переваги та недоліки SDH?
12. Якою є ієрархія швидкостей SDH?
13. Як здійснюється синхронізація систем з SDH?
14. Як здійснюється резервування джерел синхронізації?
15. Що таке кільце резервування джерел синхронізації?
16. Які застосовують типові топології SDH?
17. Що таке топологія «точка-точка» з застосуванням термінальних мультиплексерів (ТМ)?
18. Що таке топологія «послідовне лінійне коло» на ТМ та TDM?
19. Що таке топологія «послідовне лінійне коло» типу «спрощене кільце» з захистом 1+1?
20. Що таке топологія «кільце» з захистом 1+1?
21. В чому особливості устаткування систем SDH?

22. Які різновиди мультиплексерів SDH ?
23. Які існують рівні протоколів SDH ?
24. Якою є структура кадру STM-N ?
25. Що таке віртуальний контейнер, яка його структура ?
26. Як здійснюється комутація в SDH ?
27. Які застосовуються методи забезпечення живучості мережі?
28. Які застосовуються схеми захисту в SDH ?
29. Як здійснюється захист карт в SDH ?
30. Як здійснюється захист мультиплексної секції в SDH ?
31. Як здійснюється захист з'єднання в SDH ?
32. Як реалізується забезпечення живучості мережі синхронізації?
33. Які основні проблеми передачі інформації вирішуються при застосуванні мережі SDH ?
34. Чим обґрунтовано можливість централізованого дистанційного моніторингу та керування всіма елементами мережі SDH ?
35. В чому головні переваги мереж SDH перед плезіохронними ?

5 МЕРЕЖІ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ УЩІЛЬНЕННЯМ

ОВ здатне передавати величезну кількість інформації, дякуючи дуже високій частоті світлових хвиль (несівних) - до порядку 10^{14} Гц.

Але практично фізичну швидкодію електронних пристроїв обмежено величиною 40 Гбіт/с. Це обмеження зв'язано з кінцевим значенням рухливості носіїв заряду, швидше електронні і оптоелектронні пристрої (на основі Si) працювати просто не можуть (деяким вилученням з цього твердження є згадані солітонні мережі, де застосовано особливі нелінійні властивості світлових хвиль). Врахування цієї властивості примушує шукати інші шляхи для підвищення пропускну здатності існуючих ВОСП. Ці шляхи тісно зв'язано з застосуванням ущільнення передаваної інформації. Можливість ущільнення напряму зв'язано з властивостями ОВ пропускати надзвичайно велику кількість інформації при мультиплексуванні світлових потоків (променів) з різними параметрами, наприклад, з різними довжинами хвиль. Якщо ОВ є *лінійним* пристроєм, то такі світлові промені будуть поширюватися по ньому *незалежно один від одного*. Для нелінійних ОВ діють інші закони, які вивчаються нелінійною оптикою - солітонні мережі.

В цьому розділі розглянемо основні засади та різновиди методів ущільнення інформації. В ВОСП найширше застосування знайшли системи хвилевого ущільнення WDM (Wave Division Multiplexing).

5.1 Класифікація систем з WDM

Сучасні системи WDM на основі стандартного частотного плану можна підрозділити на наступні групи:

- розріджені, «грубі» WDM (Coarse WDM, скорочено CWDM);
- звичайні WDM (WDM, без додаткових літер в позначенні);
- щільні WDM (dense WDM, скорочено DWDM);
- високощільні WDM (high dense WDM, скорочено HDWDM).

Хоча сучасним станом і не встановлено точних границь поділу між цими типами, але на основі стандартів G.694.1, G.694.2 та історичного досвіду склалися наступні «частотні плани» (і їх так і звать):

- системи CWDM - це системи з кроком +20 нм за довжиною хвилі, які працюють в смузі 1270...1610 нм ;

- системи WDM - це системи з кроком за частотами несівних більше 200 ГГц, які дозволяють мультиплексувати не більше 16 каналів в рамках розширеного частотного плану;

- системи DWDM - це системи з кроком за частотою від 200 до 50 ГГц, які дозволяють мультиплексувати будь-яку кількість каналів в рамках розширеного частотного плану;

- системи HDWDM - це системи з кроком за частотою менше 50 ГГц (25 або 12,5 ГГц), які дозволяють мультиплексувати будь-яку кількість каналів в рамках розширеного частотного плану.

Підкреслимо, що цю градацію систем стандартами не встановлено, але сталося так, що серед фахівців вона є досить усталеною.

5.2 Мережі CWDM

Стандарт визначає область застосування технології CWDM - це міські мережі з відстанями до 50 км, а також встановлює діапазон хвиль 1270...1610 нм з інтервалом 20 нм між каналами.

Основна перевага технології CWDM перед технологією DWDM - це менша вартість. Оцінка, яку виконано фахівцями, показує, що в середньому системи CWDM коштують в 1,5...2,5 рази менше, ніж аналогічні системи DWDM. Зниження ціни зумовлено меншою вартістю компонентів. Зокрема, застосовувані в системах CWDM передавачі не вимагають температурної стабілізації, а в системах DWDM температурна стабілізація лазерів є обов'язковою; вартість CWDM-мультиплексерів нижча вартості DWDM-мультиплексерів і т.і.

Головний недолік технології CWDM полягає в обмежених можливостях масштабування. Для зменшення впливу цього фактору та досягнення більшого ефекту при використанні

спектрального мультиплексування доцільно застосовувати гібридну технологію.

В рамках цієї технології деяку частину всього відведеного спектрального діапазону використовує технологія CWDM, а другу частину всього відведеного спектрального діапазону використовує технологія DWDM. На рис.5.1 наведено можливий частотний план цієї гібридної технології. Тут в діапазоні хвиль 1525...1565 нм застосовано DWDM, а в діапазоні 1270...1610 нм застосовано CWDM. Тоді не існує проблеми масштабування, як в технології CWDM.

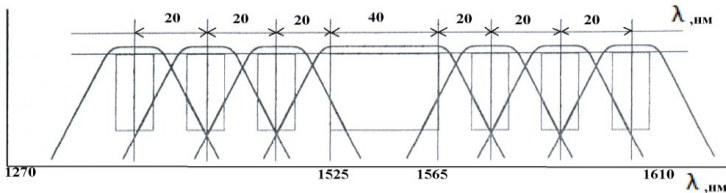


Рисунок 5.1 - Реалізація гібридної технології DWDM та CWDM

5.3 Мережі DWDM

В середині 90-х років внаслідок широкого впровадження оптичних підсилювачів EDFA починає стрімко розвиватися технологія спектрального мультиплексування з щільним розташуванням каналів - технологія DWDM. Економічну ефективність систем DWDM в системах далекого зв'язку різко збільшено при застосуванні оптичних підсилювачів, бо один пристрій (підсилювач) замінює декілька регенераторів на трасі зв'язку.

Технологію ущільненого хвильового мультиплексування DWDM призначено для створення оптичних магістралей нового покоління, які можуть працювати на мультимегабітних та терабітних швидкостях. Такий революційний стрибок продуктивності забезпечує принципово новий метод мультиплексування - тут інформація в ОВ передається одночасно великою кількістю світлових хвиль (довжин хвиль λ_i).

Мережі DWDM працюють за принципом комутації каналів, при цьому кожна світлова хвиля являє собою окремий *спектральний канал* і переносить власну інформація.

$$P_{\Sigma C} \text{ (дБм)} = P_{IC} + 10 \lg m, \text{ дБм,}$$

де m - кількість спектрально ущільнених оптичних каналів в даній системі передачі.

Технології DWDM незамінні в системах далекого зв'язку, де треба передавати величезні потоки інформації на значні відстані.

5.3.1 Особливості частотного плану систем DWDM

В силу того, що основний робочий діапазон підсилювачів EDFA лежить в межах довжин хвиль 1525...1565 нм, з'явилась необхідність помістити в цей проміжок як можливо більше каналів. Найбільш поширеними є ті системи, в яких передбачено розташування каналів з частотним інтервалом $\Delta\omega = 100$ ГГц, що в області 1550 нм відповідає інтервалу $\Delta\lambda = 0,8$ нм. Ведуться роботи по створенню систем з частотним інтервалом 50 ГГц (0,4 нм) і навіть 25 та 12,5 ГГц.

В відповідності до Рек. G.692 до систем передачі з DWDM пред'являються вимоги сумісності за оптичними інтерфейсами з існуючими системами передачі апаратури SDH. Оптичні параметри систем DWDM регламентуються Рек. G.692, в яких визначено довжини хвиль та оптичні частоти для кожного каналу. Відповідно до цих рекомендацій, багатохвильові системи передачі працюють в 3-му вікні прозорості ОВ, тобто в діапазоні довжин хвиль 1530...1565 нм. Для цього встановлено стандарт довжин хвиль, який являє собою сітку оптичних частот, в яких розписано регламентовані значення оптичних частот від 196,1 ТГц до 192,1 ТГц з інтервалом 100 ГГц та довжини хвиль від 1528,77 нм до 1560,61 нм з інтервалом 0,8 нм. Стандарт складено із 41 довжини хвилі, тобто розраховано на 41 спектральний канал. Однак на практиці використовується 39 каналів із рекомендованої сітки, оскільки два крайніх не використовуються, бо вони знаходяться на схилах частотної характеристики тих оптичних підсилювачів, які застосовують в системах DWDM.

5.4 Принципи роботи DWDM систем в складних мережах

Можливості та переваги технології DWDM в ще більшому ступені розкриваються в складних насичених мережах, які мають в своєму складі багато різних вузлів. Характерною ознакою є те, що на проміжних вузлах деякі канали може бути або добавлено або виділено із складного сигналу за допомогою мультиплексерів вводу-виводу в той час як інші канали можуть проходити через вузол без перетворення в електричний сигнал. Також в деяких вузлах за допомогою пристрою оптичної крос-комутації з'являється можливість перенаправляти деяку кількість каналів за новими напрямками (рис. 5.3). Тут OMUX - оптичний мультиплексер, ODMX - оптичний демультиплексер, OADM - мультиплексер вводу/виводу, ОпКом - оптичний крос-комутатор, ОП - оптичний підсилювач, ОВ - оптичне волокно. В складних насичених системах може здійснюватися декілька операцій мультиплексування/демультиплексування, вводу/виводу і багатьох других.

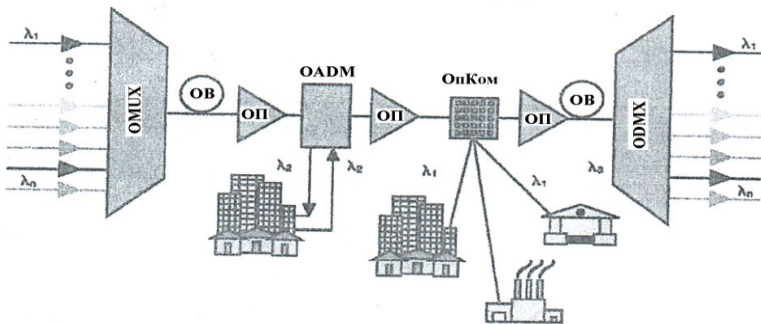


Рисунок 5.3 - Принцип роботи WDM-систем в складних мережах

Всі ці елементи вносять додаткові втрати, а тому з точки зору збереження енергетичного потенціалу оптичної системи в цілому, треба передбачувати наявність системи оптичних підсилювачів.

5.5 Типові топології систем DWDM

Виникнення технології DWDM (як і технології SDH) - відповідь на все зростаючі потреби суспільства в забезпеченні якісним зв'язком і причому з усім спектром сучасних телекомунікаційних послуг. Особливо треба акцентувати на вирішенні проблем відстані - адже абонентів не цікавить, як зв'язкова галузь буде забезпечувати їх зв'язок, наприклад, з Мельбурном, або з Мелітополем.

Хронологічно першою областю застосування технології DWDM стало створення наддалеких високошвидкісних магістралей, які мають топологію двоточкового кола. Для організації такої магістралі достатньо в її кінцевих точках встановити термінальні DWDM- мультиплексери, а в проміжних точках - оптичні підсилювачі, якщо цього вимагає відстань між кінцевими точками.

На рис.5.4 наведено схему дуплексного обміну між абонентами мережі. Дуплексного режиму досягнуто за рахунок односпрямованої передачі всього набору хвиль по двом волокнам, причому кожне в своєму напрямку. Існує і другий варіант роботи мережі DWDM, коли для зв'язку вузлів мережі застосовують одне волокно.

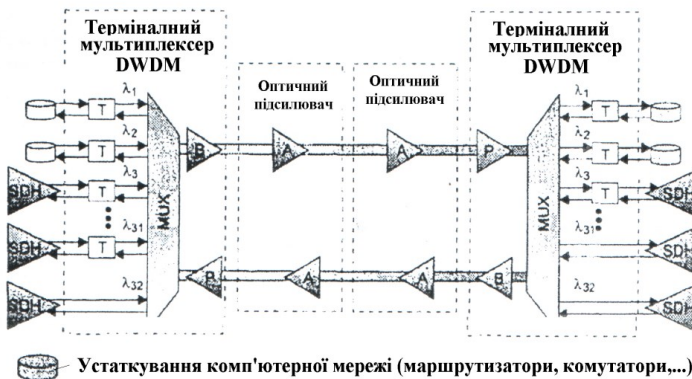


Рисунок 5.4 - Двоточковий зв'язок на основі термінальних мультиплексерів DWDM

Тоді дуплексний режим досягається шляхом спрямованої передачі оптичних сигналів по волокну - половина хвиль частотного плану передають інформацію в одному напрямі, а половина - в зворотному.

Природнім розвитком топології двоточкового кола є коло з проміжними під'єднаннями; в такому колі проміжні вузли будуть виконувати функції мультиплексерів вводу/виводу - рис. 5.5.

Оптичні мультиплексери вводу/виводу (Optical Add-Drop Multiplexer, OADM) можуть вивести із загального оптичного сигналу хвилю визначеної довжини і ввести туди сигнал з цією ж довжиною хвилі, так що спектр транзитного сигналу не зміниться, а з'єднання буде виконано з одним із абонентів, якого під'єднано до проміжного мультиплексера. OADM може виконувати операції вводу/виводу хвиль або оптичними засобами, або шляхом проміжного перетворення в електричну форму. Зазвичай повністю оптичні (пасивні) мультиплексери вводу/виводу можуть відводити лише невелику кількість хвиль, бо кожна операція виводу вимагає послідовного проходження повного оптичного сигналу через оптичний фільтр, який вносить додаткове затухання. Якщо ж мультиплексер виконує електричну регенерацію сигналу, то кількість хвиль, які виводяться, може бути будь-якою в межах наявного набору хвиль, бо транзитний оптичний сигнал попередньо повністю демультимплексується.

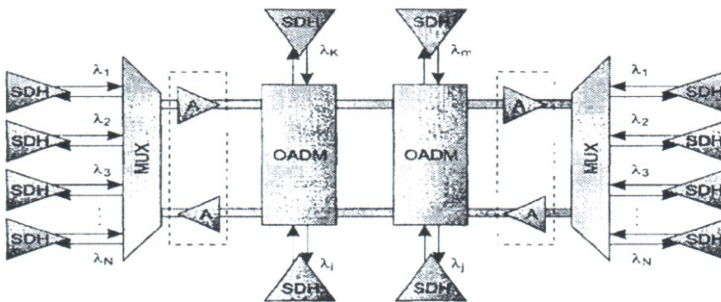


Рисунок 5.5 - Коло DWDM з вводом/виводом в проміжних вузлах

Кільцева топологія (рис. 5.6) забезпечує живучість мережі DWDM за рахунок резервних шляхів. Методи захисту трафіку, які застосовують в DWDM, є аналогом методів, які застосовують в SDH, але треба відмітити, що в DWDM їх поки ще не стандартизовано. Для того, щоб будь-яке з'єднання було захищено, між його кінцевими точками встановлюють два шляхи - основний та резервний. Тоді мультиплексер кінцевої точки порівнює два сигнали та обирає сигнал кращої якості (або той сигнал, який задано за замовчуванням).

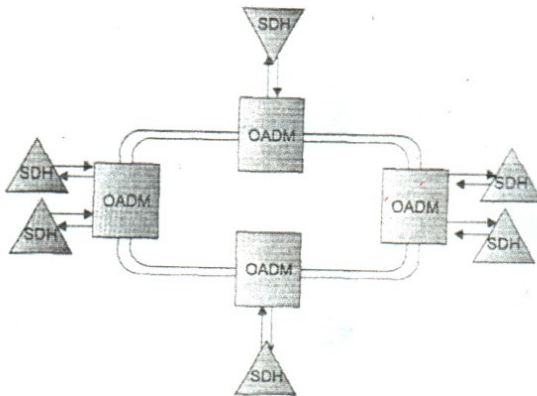


Рисунок 5.6 - Кільце мультиплексерів DWDM

Треба відмітити, що по мірі розвитку мереж DWDM в них все частіше будуть застосовувати ячeyкові топології. Вони забезпечують більшу гнучкість, продуктивність та відмовостійкість, ніж інші топології, але в реалізації звісно ж дорожчі.

5.6 Особливості устаткування систем DWDM

Особливості устаткування систем DWDM в основному зумовлено специфікою цієї технології в частині її частотних властивостей (3-є вікно прозорості, дисперсія і т.і.).

5.6.1 Джерела випромінення

Сучасним станом в системах DWDM застосовують ЛД трьох типів з фіксованою хвилею випромінення та мають:

- розподілений зворотній зв'язок (Distributed FeedBack, DFB);
- розподілену решітку Брегга (Distributed Bragg Reflector, DBR);
- вертикальний резонатор (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL).

В генераторах перших двох типів для отримання випромінення з вузьким спектром застосовують волоконні решітки Брегга (Fiber Bragg Grating, FBG). ОВ, яке леговано деякими елементами (наприклад, германієм), може змінювати свій показник заломлення під впливом ультрафіолетового світла. Якщо опромінити таке ОВ ультрафіолетовим світлом з деякою просторовою структурою, то ОВ перетворюється в своєрідну дифракційну решітку. Таким чином це ОВ буде відбивати світло в деякому діапазоні хвиль та пропускати світло всіх інших хвиль. Тоді відбите світло і є вихідним сигналом генератора.

В генераторах DFB решітка Брегга формується в *активній зоні* лазера і технологія виготовлення пристроїв є досить складною. Ширина спектра подібних генераторів звичайно складає менше 100 МГц. У генераторів DBR решітку розташовано в *неактивній зоні* лазера, а тому ефективна довжина резонатора може бути суттєво більшою, ніж у генератора DFB, а смуга випромінення - вужча, до 1 МГц.

В лазерах VCSEL генерація здійснюється поперек р-п переходу. Перевагою таких генераторів є висока технологічність: на одному чипі можна розмістити матрицю лазерів і кожен із них може випромінювати задану довжину хвилі в відповідності з заданим планом частот.

Окрім фіксованих, існують і перестроювані генератори, які застосовують для тестування систем DWDM, а також для побудови оптичних крос-конекторів. В таких генераторах зазвичай застосовують зовнішній резонатор на основі дифракційної решітки, повертання якої визиває зміну довжини вихідної хвилі.

5.6.2 Мультиплексери вводу/виводу

Термінальний мультиплексер складено з декількох блоків - власне мультиплексер довжин хвиль, бустер (підсилювач), приймальний підсилювач, оптичний транспондер (рис.7.4). Оптичний мультиплексер виконує операції зміщення декількох довжин хвиль в загальний сигнал, а також виділення хвиль з різними довжинами із загального сигналу. Для виділення хвиль в мультиплексерах застосовують наступні механізми:

- тонкоплівкові фільтри, які складено із пластин з багат шаровим покриттям, в якості яких на практиці застосовують торець оптичного волокна, зкошений під кутом $30...45^\circ$ з нанесеним на нього шарів покриття. Перевагою такого підходу є застосування явища інтерференції для фільтрації хвиль з деякою довжиною. Недолік - обмежений перелік таких матеріалів для покриття, які б суміщали потрібні фізичні та оптичні властивості. Такі фільтри застосовують в мультиплексерах, які підтримують відносно невелику кількість довжин хвиль в ОВ (16 або 32). Для систем з більшою кількістю довжин хвиль треба застосовувати інші принципи фільтрації і мультиплексування.

- волоконні решітки Бегга, FBG. Принципи їх дії розглянуто вище. Вони застосовуються звичайно в тих випадках, коли із загального сигналу треба виділити невелику кількість хвиль - для цього застосовують послідовне з'єднання декількох волокон-решіток, кожна з яких виділяє одну хвилю. Оскільки послідовне застосування таких пасивних фільтрів вносить додаткове затухання, їх застосовують для виділення однієї-двох хвиль. Пасивні пристрої, які дозволяють виділити із загального сигналу одну-дві хвилі, звичайно звать *відгалужувачами* (Coupler).

- дифракційні фазові решітки (Diffraction Phase Gratings, DFG), які ще звать також ешелонами Майкельсона, або дифракційними структурами (Arrayed Waveguide Grating, AWG). Принцип дії: світло пропускається через декілька складених строго паралельно пластин з різною довжиною, при цьому різниця довжин є величиною сталою. Складені пластини утворюють єдину прозору

призму. Одна грань структури є плоскою, а протилежна - ступінчаста, з однаковими ступеньками. Пройшовши через всю призму, промені дифрагують, а при цьому кут дифракції залежить від довжини хвилі.

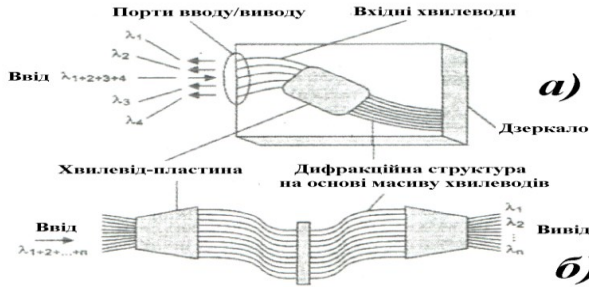


Рисунок 5.6 - Демультіплексер з дифракційною фазовою решіткою

В мультиплексерах DWDM застосовуються фазові решітки в інтегральному виконанні (інтегральна оптика). Функції пластин в них виконують оптичні хвилеводи, або волокна. На рис.5.6 наведено схему повного демультіплексування сигналу за допомогою дифракційної фазової решітки. Мультиплексний сигнал надходить на вхідний порт (рис.5.6а). Потім цей сигнал проходить через хвилевід-пластину і розподіляється по множині хвилеводів, яка являє собою дифракційну структуру AWG. Як і раніше, сигнал в кожному із хвилеводів залишається мультиплексним, а кожен канал ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) залишається представленим у всіх хвилеводах. Далі здійснюється відбиття сигналів від дзеркальної поверхні, а в підсумку світлові потоки знову збираються в хвилеводі-пластині, де здійснюється їх фокусування та інтерференція - створюються просторово рознесені інтерференційні максимуми інтенсивності, які відповідають різним каналам. Геометрія хвилеводу-пластини, зокрема розташування вихідних полюсів, та значення довжини хвилеводів структури AWG розраховуються таким чином, щоб інтерференційні максимуми співпадали з вихідними полюсами. Мультиплексування здійснюється зворотним шляхом.

Другий спосіб побудови мультиплексера базується не на одній, а на парі хвилеводів-пластин (рис.5.6б). Принцип дії такого пристрою є аналогом попереднього, за винятком того, що тут для фокусування та інтерференції застосовано додаткову пластину.

Інтегральні решітки AWG (їх зовуть також фазерами) стали одними із ключових елементів мультиплексерів DWDM. Їх зазвичай застосовують для повного демультимплексування світлового сигналу, бо вони добре масштабуються і потенційно можуть працювати в системах з сотнями спектральних каналів.

DWDM-мультиплексери є чисто пасивними пристроями і вони вносять велике затушення в сигнал - до 0..12 дБ. З-за досить великих втрат часто виникає необхідність в застосуванні оптичного підсилювача перед DWDM-мультиплексером або після нього.

5.6.3 Оптичні крос-конектори

В мережах з ячеюватою топологією необхідно забезпечити гнучкі можливості для зміни маршруту слідування хвилевих з'єднань між абонентами мережі. Такі можливості надають оптичні крос-конектори, які дозволяють направити будь-яку із хвиль вхідного сигналу кожного порту в будь-який із вихідних портів (звісно, при умові, що ніякий другий сигнал цього порту не використовує цю хвилю, бо інакше необхідно виконати трансляцію довжини хвилі).

Існують оптичні крос-конектори двох типів:

- з проміжним перетворенням в електричну форму;
- повністю оптичні без проміжних перетворень.

Історично першими з'явилися більш традиційні оптоелектронні крос-конектори і за ними *закріпилась* назва *оптичні крос-конектори*. За цією причиною виробники повністю оптичних пристроїв цього типу прагнуть застосовувати для них такі назви, які вже застосовано для попереднього варіанту. Застосовувані назви - фотонні комутатори (Photonic Switches), або маршрутизатори хвиль (Wave Routers, або Lambda Routers).

Але у оптичних крос-комутаторів є *принципове обмеження* - вони добре працюють лише до швидкості 2,5 Гбіт/с, але, починаючи зі швидкості 10 Гбіт/с і вище, габарити і споживання енергії стають недопустимими.

Фотонні комутатори вільні від таких обмежень. В фотонних комутаторах застосовано різні оптичні механізми, зокрема, дифракційні фазові решітки і мікроелектронні механічні системи (Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS).

Система MEMS являє собою набір рухомих дзеркал з дуже маленькими розмірами (діаметр менше 1мм, рис.5.7). Комутатор MEMS застосовується після демультиплексера, коли вихідний (початковий) сигнал вже розділено на складові хвилі. За рахунок повороту мікродзеркала на заданий кут вихідний промінь визначеної хвилі направляється в відповідне вихідне волокно. Потім всі промені мультиплексуються в загальний вихідний сигнал.



Рисунок 5.7 - Мікроелектронна механічна система крос-комутації

5.6.4 Оптичні транспондери

Оптичні транспондери (транслятори) потрібні для зміни довжини хвилі оптичного сигналу. Зазвичай ці пристрої застосовують в термінальних мультиплексерах (рис.5.4) для перетворення сигналів, які надходять від устаткування користувачів (SDH, комутатори-маршрутизатори пакетних мереж), в стандартних вікнах 850, 1300 або 1550 нм в сигнал однієї із хвиль частотного плану ІТУ-Т (і зворотного

перетворення). Транспондери одночасно є і регенераторами сигналів, бо частіше всього зміна довжини хвилі сигналу відбувається за рахунок його перетворення в електричну форму.

Існують також повністю оптичні перетворювачі довжини хвилі, які звать оптичними конверторами (Optical Converter), або оптичними обмінниками (Optical Changer, OX), термін Optical Translator залишено за оптико-електричними перетворювачами. Повністю оптичні перетворювачі довжин хвиль може бути створено на основі різних принципів, зокрема, з застосуванням міжфазової модуляції в волоконному підсилювачі, коли вхідна хвиля застосовується для модуляції тієї хвилі, що виходить.

В повністю оптичні мережі, де застосовуються оптичні перетворювачі, розрізняють два види сервісу:

- хвильовий шлях (Wavelength Path);
- світловий шлях (Light Path).

Останній часто звать віртуальним хвильовим шляхом. В першому випадку інформація передається через мережу без зміни довжини хвилі, у другому - довжина хвилі може змінюватися в залежності від наявності вільних хвиль на даній ділянці мережі. Відмітимо, що при складній топології мережі прокласти хвильові шляхи для всіх користувачів може виявитися неможливо навіть при самому ретельному плануванні, а тому застосування оптичних транспондерів або конверторів стає необхідним.

5.6.5 Особливості оптичних волокон

Мережі DWDM можуть працювати як на стандартних одномодових ОВ, так і на спеціальних типах волокна, які спеціально розроблено з врахуванням вимог DWDM. Ці вимоги стосуються особливостей частотного плану технології DWDM, за які вже не раз наголошувалось.

Стандартне бездисперсійне одномодове волокно (Non-Dispersion Shifted Fiber, NDSF, або Standard Single Mode Fiber, SSMF) було досліджено і розроблено технологію його масового виробництва в «епоху 3-го вікна прозорості 1310 нм»; воно має нульову дисперсію в цьому районі спектру. За тією причиною,

що технологія DWDM сучасним станом застосовує 3-тє вікно прозорості 1550 нм, то застосування стандартного волокна вже не є найкращим варіантом - хроматична дисперсія в вікні 1550 нм цього ОВ є додатною і досягає значних величин. Це призводить до серйозних обмежень на дальність передачі без підсилення сигналу.

Існує другий тип одномодового волокна - зі зміщеною нульовою дисперсією (Zero Dispersion Shifted Fiber, ZDSF). У такого волокна нульове значення дисперсії приходить на діапазон 1535...1565 нм, але застосовувати його має сенс тільки для тих систем, які передають інформацію на хвилі з одною довжиною із цього діапазону, наприклад, для SDH, бо для частини хвиль DWDM в цьому вікні дисперсія буде ненульовою і від'ємною, а для другої частини - ненульовою і додатною, а тому компенсувати її є дуже непростою задачею.

Найбільш відповідним для застосування з сучасними системами DWDM виявилось ОВ зі зміщеною ненульовою дисперсією (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber, NZDSF). У такого волокна нульова дисперсія приходить не на середину інтервалу (1550 нм), а зміщена за його межі, тобто довжина хвилі, для якої дисперсія є нульовою, або менше 1530 нм, або більше 1560 нм. Дякуючи цьому, для хвиль третього вікна прозорості таке ОВ, з однієї сторони, має малу дисперсію, а з другої - ця дисперсія має один і той же знак для всіх хвиль і до того ж вона слабо схильна до нелінійних ефектів, що полегшує її компенсацію.

Для компенсації хроматичної дисперсії застосовують модулі, які мають у своєму складі відрізок ОВ з такою характеристикою дисперсії, яка є протилежною застосованому в ВОЛЗ ОВ. Сумарний ефект ОВ основного кабеля та компенсатора повинен вирівняти швидкості поширення хвиль з різною довжиною.

Поляризаційна дисперсія сигналу, яка позначається на його якості при швидкостях 10 Гбіт/с і вище, таким чином скомпенсованою бути не може, для її зменшення треба зменшувати бюджет лінії.

5.6.6 Особливості ретрансляторів і підсилювачів DWDM

Регенератор має в своєму складі наступні елементи:

- блок демультимплексування комбінованого оптичного сигналу;
- блок перетворення оптичного сигналу кожної довжини хвилі в електричний сигнал (фотодіоди, які повинні бути чутливими до визначеної довжини хвилі);
- блок електричної регенерації, який відновлює форму сигналу та його тактову частоту;
- блок перетворення електричного сигналу в оптичний сигнал (лазерний генератор);
- блок мультимплексування, який виробляє комбінований оптичний сигнал.

Сучасним станом в мережах DWDM повсюдно застосовують оптичні підсилювачі типу EDFA. Частоти накачування з довжинами хвиль 980 нм та 1480 нм. На відміну від регенераторів, оптичні підсилювачі вносять додатковий шум і відповідно для них вводиться коефіцієнт шуму. Ця властивість накладає деякі обмеження на максимальну довжину лінії та кількість підсилювачів в ній.

Нові дослідження в області EDFA привели до появи підсилювачів, які працюють в L-діапазоні, 4-е вікно прозорості від 1570 до 1650 нм. Це дозволить забезпечити передачу трафіка зі швидкостями до 1,5 Тбіт/с в одному напрямі по одному ОВ.

З успіхами DWDM зв'язано ще один перспективний напрям роботи - повністю оптичні мережі (All Optical Networks). В таких мережах всі операції по мультимплексуванню/демультимплексуванню, вводу/виводу, крос-комутації/маршрутизації інформації користувачів виконуються без перетворення сигналів із оптичної форми в електричну (такі пристрої і мережі мають позначення «О-О-О» (аббревіатуру «О-Е-О» збережено для оптико-електронних пристроїв).

5.7 Технологія OTN і використання DWDM мереж в ній

Оптична транспортна мережа (Optical Transport Networking, OTN), також звана **технологією цифрової упаковки** - це

протокол промислового стандарту нового покоління, який використовується як ефективний і загальноприйнятий спосіб мультиплексування різних послуг на оптичних світлових шляхах. В умовах різкого збільшення цифрового трафіку, пов'язаного з розвитком мультимедійних, мобільних і хмарних додатків, соціальних мереж і IP-телефонії, галузь телекомунікацій в цілому і мережі постачальників послуг зокрема вимагають швидкого розвитку. Крім того, на ринку з'явилося безліч програм, що вимагають великої пропускнуої здатності.

Раніше основну частку мережевого трафіку постачальників послуг становили голосові виклики. Цей трафік передавався по мережах з кільцевою топологією між парами кінцевих точок на основі передбачуваного мережевого з'єднання. Сьогодні велика частина мережевого трафіку передається в пакетах і формується безліччю різних послуг і додатків на основі миттєвих, непередбачуваних маршрутів передачі з різними вимогами до ємності каналу і швидкості передачі даних.

OTN упаковує корисне навантаження клієнта в контейнер для передачі по оптичних мережах, зберігаючи вихідну структуру клієнта, дані синхронізації і адміністративну інформацію. За рахунок розширених можливостей мультиплексування OTN різні типи трафіку (включаючи Ethernet, трафік систем зберігання даних, цифрове відео і SONET / SDH, ін.) можна передавати в одному кадрі транспортної одиниці оптичного каналу.

Оскільки OTN - повністю прозорий протокол, то адаптувати існуючі послуги не складе труднощів. OTN дозволяє зберегти наявні рішення OSS / BSS без змін, використовує всі доступні інструменти і засоби автоматизації і практично не вимагає перенавчання персоналу. Завдяки економічній ефективності, зручності реалізації і простоті OTN надає компаніям зрозумілий і доступний спосіб задовольнити зростаючі потреби мережі.

OTN-магістралі і базові міські мережі забезпечують значні переваги в порівнянні з традиційними мережами на основі WDM, в тому числі підвищення ефективності і надійності і можливість надання приватних послуг на базі спектральних каналів.

Інфраструктура IP на базі OTN також підвищує ефективність управління і моніторингу, скорочує число переходів, збільшує безпеку послуг і знижує витрати на обладнання. Крім нарощування швидкості до 100G і вище, OTN грає ключову роль в перетворенні мережі в відкриту і програмовану платформу, завдяки чому транспорт може стати такою ж важливою частиною інтелектуальної мережі ЦОД, як системи обчислення і зберігання. OTN пропонує ряд переваг, включаючи наступні:

- скорочення витрат на транспорт: завдяки можливості передачі декількох клієнтів на одній довжині хвилі OTN надає економічний механізм для заповнення спектральних каналів оптичних мереж;

- ефективне використання оптичного спектру: OTN забезпечує ефективне використання потужності каналів DWDM, підтримуючи узгоджену швидкість заповнення в масштабі мережі з використанням комутаторів OTN в оптичних переходах;

- детермінізм: OTN виділяє певну настроюється швидкість передачі для кожної послуги, групи послуг або сегмента мережі, гарантуючи для кожного клієнта певну пропускну здатність і продуктивність без конфліктів між одночасно працюють послугами або користувачами.

- віртуалізовані мережеві операції: нові технології віртуалізації, такі як «Оптичні віртуальні приватні мережі» (Optical Virtual Private Networks - O-VPN), дозволяють надати клієнту виділений набір мережевих ресурсів, що не залежить від решти мережі;

- гнучкість: мережі OTN надають операторам можливість використовувати необхідні технології, дозволяючи адаптувати їх відповідно до вимог бізнесу;

- безпечність моделі: мережі OTN забезпечують високий рівень конфіденційності і безпеки шляхом жорсткої розбивки трафіку по виділених ланцюгів;

- надійність і простота операцій: адміністративні дані мережі OTN передаються по окремому каналу, який повністю ізольований від даних користувача додатків. Це означає, що через інтерфейсний порт клієнта складніше отримати доступ до налаштувань мережі OTN і змінити їх;

- OTN будуються з набору оптичних мережевих елементів (Network Elements - NE), з'єднаних оптоволоконними каналами, здатними забезпечити такі функції, як транспорт, мультиплексування, маршрутизація.

Відмінною характеристикою OTN є її здатність транспортувати будь-який цифровий сигнал незалежно від специфіки клієнта. Це забезпечується тим, що межа OTN розташовується між рівнем клієнта і оптичним каналом (рис. 5.8) таким чином, щоб включити сервер-специфічні процеси і виключити клієнтські. В контексті структури протоколу такий поділ досягається за рахунок загортання (wrapping) даних клієнта в цифровий конверт зі службового (overhead - OH) інформації. Тому стандарт ITU-T G.709, що описує технологію OTN, часто називають Digital Wrapper (DW). Як видно з рис. 5.8, транспортний рівень OTN розділяється на три складові. Його елементами є оптичні канали (Optical Channel - OCh), секції оптичного мультиплексування (Optical Multiplexing Section layer - OMS) і секції оптичної передачі (Optical Transmission Section layer - OTS). На кожному з рівнів з'єднання між двома кінцевими точками, називані доріжками (trail), містять дані про вищележачому рівні, а також службову інформацію, необхідну для завершення доріжки і локалізації помилок.

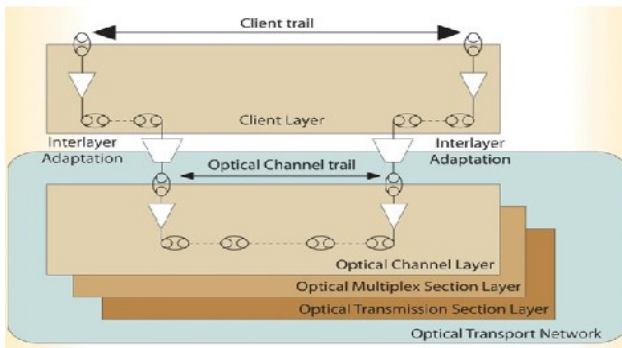


Рисунок 5.8 - Багаторівнева структура ONT

В OTN, як і в SONET, визначена ієрархія мережі, звана ієрархією оптичної передачі (Optical Transport Hierarchy - OTH).

Точно так само як SONET будується на Інкремент STS-1 (Synchronous Transport Signals), які можуть об'єднуватися для створення з'єднань з великою пропускну здатністю, OTN будується на базових одиницях, що називаються модулями оптичної передачі (Optical Transport Module - OTM). Однак між ними є і суттєва відмінність - OTN може об'єднувати безліч хвильових каналів, кожен з яких здатний працювати з різною швидкістю. Сьогодні OTN, як правило, надає дві швидкості передачі даних. Один інтерфейс має пропуску здатність 2,7 Gbps, що дозволяє прозоро передавати сигнал SONET OC-48 або сигнал SDH / STM-16. Другий підтримує 10,7 Gbps, що, в свою чергу, забезпечує прозору передачу сигналів OC-192 / STM-64 або WAN-інтерфейс 10 Gbps. Він може бути модифікований таким чином, щоб передавати також трафік LAN 10 Gbps, який поступає від комутаторів і маршрутизаторів IP/Enternet. Розглянемо трохи докладніше, як виконується процедура інкапсуляції клієнтських даних (рис. 5.9).

На першому етапі до них додається якась порція службової інформації (OH), яка формує Optical channel Payload Unit (OPU).

Цей блок використовується для підтримки різних клієнтських сигналів. Він регулює відображення (перетворення) безлічі клієнтських сигналів і забезпечує інформацію про тип транспортуемого сигналу.

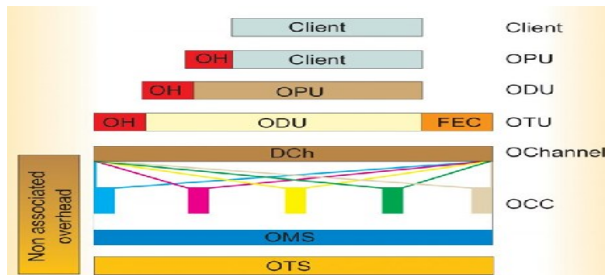


Рисунок 5.9 - Базова транспортна структура OTN

Стандарт ITU-T G.709 на даний момент підтримує як асинхронне, так і синхронне відображення клієнтських сигналів на секцію корисного навантаження.

Далі шляхом додавання до OPU другого набору ОН утворюється Optical channel Data Unit (ODU). Він дозволяє користувачеві здійснювати моніторинг парного з'єднання (Tandem Connection Monitoring - TCM), моніторинг шляху (Path Monitoring - PM) і ряд інших функцій.

Нарешті, до ODU додаються третій набір службових даних та інформація для прямого виправлення помилок (без вимоги повторної передачі) FEC (Forward Error Correction), в результаті чого виходить Optical channel Transport Unit (OTU). Цей блок використовується для підтримки транспортування через один або більше оптичних каналів. Він також містить в якості своєї частини секцію вирівнювання кадру FAS (Frame Alignment Section), інформація з якої застосовується при функціонуванні мережі. Подальше додавання ОН створює OCh для світлової хвилі довжиною λ (один колір). При використанні технології WDM можна (за допомогою додавання необхідної ОН) організувати OMS для мультиплексування потоків даних на декількох кольорах. В результаті всіх модифікацій виходить OTS (рис.5.10).



Рисунок 5.10 - Структура OCh

На рис. 5.10 представлена структура OCh, що складається з секції службової інформації, клієнтських даних і FEC. Насправді області OPU, ODU і OTU мають досить складну структуру, на якій ми не будемо детально зупинятися. Замість цього наведемо рис. 5.11, що ілюструє загальну схему функціонування OTN. Отже, підбиваючи підсумки, можна стверджувати, що оптична транспортна мережа призначена для забезпечення не тільки високих швидкостей передачі даних, а й гнучкого і надійного адміністрування. OTN дозволяє управляти DWDM-мережами, що застосовують для передачі кілька довжин хвиль, так само

ефективно, як це виконується в мережах SONET / SDH для однієї довжини хвилі.



Рисунок 5.11 - Загальна схема функціонування OTN

Крім того, до числа основних переваг OTN можна віднести повну зворотну сумісність з SONET / SDH і прозорість для існуючих комунікаційних протоколів, а реалізація механізму FEC дозволяє мережевим операторам використовувати наявні мережі більш ефективно.

Запитання для самоконтролю WDM

1. В чому є особливості систем з WDM?
2. Якою є класифікація систем з WDM?
3. В чому є особливості систем з CWDM?
4. В чому є особливості мереж з DWDM?
5. В чому є особливості частотного плану систем з DWDM?
6. Якими є принципи роботи DWDM систем в складних мережах?
7. В чому є особливості типових топологій систем DWDM?
8. Як реалізуються джерела випромінення систем DWDM?
9. Які дії виконують мультиплексери вводу/виводу систем DWDM?
10. Якою є структура мультиплексеру вводу/виводу систем DWDM?
11. Які функції мають оптичні крос-конектори систем DWDM ?
12. Які функції мають оптичні транспондери систем DWDM ?
13. В чому є особливості ОВ для систем DWDM ?
14. В чому особливості ретрансляторів, оптичних підсилювачів DWDM?
15. Що таке повністю оптичні мережі та як їх зв'язано з DWDM ?

6.1 СОЛІТОННІ МЕРЕЖІ

6.1.1 Загальні властивості

На перший погляд параметри нової технології передачі даних здаються фантастикою, але вони - реальність, яку доведено випробуваннями в лабораторіях передових країн всього світу. Вчені - фізики добились передачі даних практично без втрат при швидкості 5 Гбіт/с на відстань до 15 тис.км, 10 Гбіт/с - 11 тис.км, 40 Гбіт/с - 700 км та 80 Гбіт/с - 50 км. Але за прогнозами - це ще й не межа. Такі вражаючі результати стали можливими, дякуючи солітонній передачі даних. В багатьох відношеннях вона схожа на звичайну передачу по ВОК. За сутністю, це той же жмуток світла, який проходить по кварцовому ОВ, але в процесі передачі він знає не властиві звичайному методу зміни.

При солітонній передачі використовуються властивості того матеріалу, з якого виготовлено волокно. При достатній інтенсивності жмутка світла оптичні властивості волокон змінюються та впливають на сам жмуток. Змінюючи параметри волокна (це технологія) та тривалість жмутка (це техніка), можна добитися такої бажаної зміни при якій досягається нейтралізація небажаних процесів, які обмежують параметри передачі. Другими словами - «обернути шкоду на користь». Тоді, замість кольорової дисперсії (коли жмуток розпадається на широкий спектр і кожна довжина хвилі продовжує рух зі своєю швидкістю), передача окремих кольорів або прискорюється, або уповільнюється, дякуючи чому досягається однакова швидкість всього жмутка- спектральних складових.

Відповідно ліквідується нерівномірна затримка, яка створюється між надходженням сигналів з різною довжиною хвилі; цей ефект стає особливо відчутним при високих швидкостях передачі.

В порівнянні з традиційними оптичними сигналами солітони набагато надійніші. До того ж вони дають менші розсіювання при передачі на великі відстані. Як наслідок, при

використанні солітонних каналів вимагається менша кількість проміжних ретрансляторів.

Як і інші різновиди сигналів, солітони можна ущільнювати. Шляхом ущільнення дослідницька група компанії Nippon Telegraph and Telecommunications добилась швидкості передачі 80 Гбіт/с (8 каналів по 10 Гбіт/с) на відстань більше 500 км. Один із авторів проекту ESTHER - Національний центр по дослідженням в області телекомунікацій компанії France Telecom (CNET) . Сучасним станом CNET працює як над технологіями передачі даних на великі відстані, так і над підвищенням швидкості передачі на короткі відстані. Сучасним станом в CNET добились швидкості передачі 40 Гбіт/с на відстані 10000 км при рівні помилок менше $9 \cdot 10^{-100}\%$.

Не дивлячись на ці досягнення, в найближчому майбутньому солітони не зможуть витіснити традиційні канали, хоча б ті, які з'єднують віддалені точки - це думка керівника лабораторії CNET Патріка Вандама: «ми вважаємо, що використання солітонів стане доцільним лише в наступному поколінні систем, де пропускну здатність буде підвищено з 2,5 Гбіт/с до 10-20 Гбіт/с.». На його думку, солітонні канали зможуть знайти застосування в високошвидкісних системах передачі на короткі відстані. Зокрема, CNET сучасним станом випробовує канал зі швидкістю до 200 Гбіт/с.

Окрім того, Центр проводить дослідження в області оптичної комутації на базі солітонів. Спеціаліст Херман Хаус висловив думку: «коли ми будемо мати справу зі зв'язком на терагерцових швидкостях, нам знадобляться комутатори, які здатні працювати з таким темпом. Єдиним реальним засобом в цьому випадку буде солітонна комутація.»

6.1.2 Можливості існування оптичного солітону

Процес і особливості формування оптичного солітону вже наведено на рис.1.2 (розділ 1). Розглянемо детально нелінійні оптичні ефекти в скловолокні та можливості існування оптичного солітону.

В достатньо довгих волоконних світловодах можуть проявлятися наступні нелінійні оптичні ефекти:

- вимушене раманівське (комбінаційне) розсіювання (ВКР);
- вимушене розсіювання Мандельштамма-Бріллюена (ВМБР);
- фазова самомодуляція (самофокусування); чотирьохфотонне або чотирьоххвильове змішування.

Вимушене розсіювання світла зумовлено нелінійною взаємодією сильного електромагнітного поля випромінення з електромагнітним полем атомів фізичного середовища (в нашому випадку - в скловолокні). Світло розсіюється на елементарних неоднорідностях параметрів волокна, індукованих (створюваних) розсіювальним середовищем. При збудженні (індукуванні) середовища потужним світловим джерелом виникає модуляція його параметрів, яка призводить до появи в ньому нових спектральних компонентів - фононова взаємодія. Фононом називають квант енергії, який виникає в процесі розсіювання фотона світла. Найбільш важливими видами розсіювання є ВКР та ВМБР.

ВКР зв'язано зі збудженням нових коливних рівнів часток середовища (електронів) і в меншому ступені - обертанням енергетичних рівнів цих часток. ВМБР призводить до появи в середовищі гіперзвукових хвиль, у яких інтенсивність залежить від частоти слідування імпульсів накачування і для тих імпульсів, які є коротшими 10 нс може майже зникнути. На відміну від ВКР, випромінення, розсіяне за механізмом Мандельштамма-Бріллюена, поширюється тільки в напрямі, який є протилежним падаючому.

ВКР спостерігається при потужності накачування більше 1 Вт. ВМБР спостерігається вже при потужності більше 1 мВт.

Явище фазової самомодуляції (ФСМ) або самофокусування, або фазової крос-модуляції (ФКМ) викликано залежністю показника заломлення сердцевини волокна, тобто фази вихідного сигналу від інтенсивності оптичного сигналу:

$$n'_1 = n_1 + \Delta n(E^2), \quad (6.1)$$

де n_1 - показник заломлення сердцевини волокна при відсутності зовнішнього електромагнітного поля,

E^2 - параметр потужності світлової хвилі,

Δn - приріст показника заломлення, який визвано зовнішнім електричним полем з напруженістю E ($\sim 10^{10}$ В/м).

Відмітимо, що при потужності сигналу >10 мВт в стандартному одномодовому ОВ виникає ФСМ, яка сприяє стисненню імпульсів (сигнал впливає сам на себе, скорочуючи різницю фазових швидкостей спектральних складових). Але створення ФКМ може призводити при передачі кількох оптичних каналів до їх взаємних впливів.

Чотирьоххвильове зміщення полягає в тому, що при наявності двох супутних хвиль (2-х каналів) з частотами f_1 та f_2 ($f_1 \neq f_2$), виникають ще дві хвилі з частотами $2f_1 - f_2$ та $2f_2 - f_1$; ці хвилі поширюються в тому ж напрямку та можуть підсилюватися за рахунок вихідних хвиль. Зрозуміло, що при більшій кількості хвиль спектр ще більше розшириться. Чотирьох хвильове зміщення проявляється вже при потужності 10 мВт та має пряме відношення до ФКМ.

Необхідно відмітити, що нелінійні ефекти в скловолокні грають не тільки негативну роль, тобто обмежують дальність та швидкість передачі, але і дозволяють в режимі ВРМБ виділяти та вводити оптичні канали, а в режимі ВКР - реалізувати підсилення оптичних сигналів. Особливу роль грає явище ФСМ для формування та передачі оптичних солітонів. Унікальність його полягає в тому, що дисперсія групової швидкості, яка визначається тривалістю оптичного імпульсу, повністю врівноважується нелінійною зміною показника заломлення ($\Delta n(E^2)$).

Деякі корисні формули для моделювання солітонів:

- критична потужність сигналу

$$P_{\text{кр}} = \frac{|D| \cdot S}{\Phi_0^2 k_0 \Delta n}, \quad (6.2)$$

де $S = p \cdot a_0^2$, a_0 - радіус п'ятна моди в скловолокні,

$k_0 = \frac{f_0 \cdot n_1}{c}$, f_0 - центральна частота спектру сигналу,

n_1 - показник заломлення сердцевини ОВ,

c - швидкість світла у вакуумі,

$\Delta n = 3,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^2/\text{Вт}$ - значення нелінійного коефіцієнту, який характеризує добавку до дійсної частини показника заломлення,

τ_0 - тривалість імпульсу на рівні 0,5 від максимальної потужності,

D - коефіцієнт дисперсії.

Введемо період зіткнення солітонів L - відстань, на якій сусідні солітони можуть зіштовхуватися. Тоді

$$T_c = 2y \cdot \tau_0 \quad (\text{тут } y = \frac{4L \cdot |D|}{1,669 \epsilon \Phi_0^2}, \text{ де } 0 < \epsilon < 1) \quad (6.3)$$

швидкість передачі інформації при довжині зіткнення L складе

$$V = \frac{1}{2y\Phi_0}. \quad (6.4)$$

Також важливою умовою існування солітонів є підсилення, яке може бути зосереджено в волоконному підсилювачі або забезпечено раманівським розсіюванням. Солітони в процесі поширення змінюють свою форму, розпадаючись на групи імпульсів, а потім знову збираючись. Ця складна динаміка визначається багатьма факторами: фазовою самомодуляцією, дисперсією групових швидкостей, потужністю та тривалістю імпульсів і т.і. На рис. 6.1 наведено приклад динаміки спектру солітона 3-го порядку на довжині, яка дорівнює його періоду.

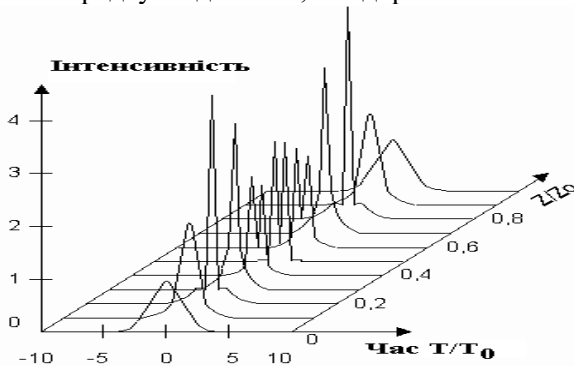


Рисунок 6.1 - Динаміка солітона 3-го порядку

6.1.3 Принципи побудови солітонних ВОСПІ

В якості передавального середовища застосовують ОВ з низькими втратами потужності. Дякуючи малим втратам, солітони можуть поширюватися на значні відстані без застосування спеціальних пристроїв компенсації втрат. Розглянемо приклади побудови солітонних ВОСПІ. Вони відрізняються принципами використання загального підходу «обернути шкоду на користь», тобто поєднання дисперсійних та нелінійних властивостей. Треба ще раз нагадати, що за рахунок накачування в ОВ створюються (індукуються) потрібні нелінійні ефекти.

Приклад побудови простої солітонної ВОСПІ наведено на рис. 6.2. Тут на виході солітонного лазера генерується неперервна послідовність солітонів з заданою скважністю (звичайно $Q = T_c / \tau \geq 10$). Послідовність солітонів проходить через оптичний ізолятор та модулятор, в якому імпульсна послідовність модулюється. На виході лінії сигнали реєструються фотоприймальним пристроєм (ФПП).



Рисунок 6.2- Побудова простої солітонної ВОСПІ

Застосування періодичної компенсації втрат потужності дозволяє збільшити дальність передачі (рис.6.3). Для підтримки потужності солітонів застосовуються раманівські підсилювачі з накачуванням за довжиною хвилі, яка відрізняється від довжини інформаційної хвилі.



Рисунок 6.3 - Солітонна ВОСПІ з раманівським підсилювачем

В схемі (рис. 6.3) застосовується оптичний фільтр (Ф). Його призначення - усунути вплив випромінення накачування, щоб воно не потрапило в ФПП.

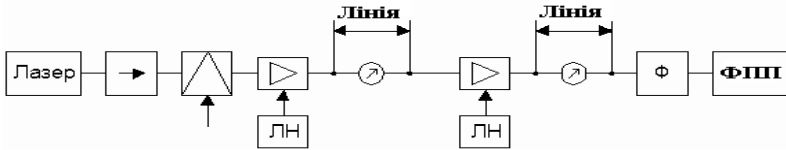


Рисунок 6.4 - Солітонна ВОСПІ з підсилювачем на основі ербію

Можливо побудувати інший варіант солітонної ВОСПІ з ербієвими підсилювачами (рис. 6.4). При цьому підсилення відбувається не на всій довжині ділянки передачі, а тільки в підсилювачах (довжина волокна до 100 м). Перевагою є те, що застосовується менша кількість джерел накачування і з суттєво меншою потужністю. Необхідно відмітити, що можливим є варіант сумісного використання ербієвих і раманівських підсилювачів в солітонних ВОСПІ. Структурну схему солітонної ВОСПІ без використання підсилювачів наведено на рис. 6.5.

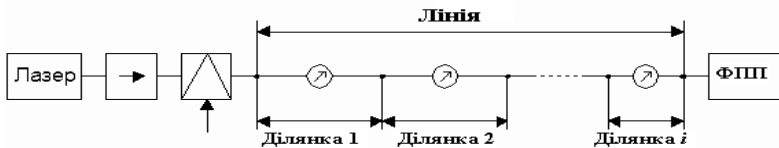


Рисунок 6.5 - Солітонна ВОСПІ з різними волокнами

Тут протяжна ділянка існування солітонів досягається, дякуючи використанню в лінійному тракті дискретної послідовності одномодових оптичних волокон зі сталим значенням дисперсії в межах кожної i -тої ділянки. Особливість - дисперсія в волокнах в межах ділянки є величиною сталою, але від ділянки до ділянки повинна зменшуватися. Відмітимо й особливість солітонного лазера. Тут здійснюється генерація дуже коротких імпульсів (одиниці пікосекунд і навіть фемтосекунди, фемто 10^{-15}). Такі властивості досягаються за рахунок компресії імпульсів з тривалістю в одиниці наносекунд.

6.1.4 Перспективи використання солітонних ліній зв'язку

Звичайні методи (вони вже стають класичними) оптичної передачі засновано на усуненні (або суттєвому зменшенні) нелінійних ефектів та використанні ОВ зі зсувом дисперсії.

Перспективність солітонних систем та їх переваги перед класичними оцінюють в двох напрямках:

1. Підвищення швидкості передачі (на одній несівній);
2. Збільшення довжини регенераційної ділянки.

Основними перепонами на досягненні суттєвих успіхів в цих напрямках є наступні негативні явища:

1. Шум когерентного підсилення (ефект Гордона-Хауса);
2. Акумуляція підсиленого спонтаного випромінення (ASE в англійській літературі);
3. Солітон-солітонна взаємодія (ССВ).

6.1.4.1 Перспективи підвищень швидкості передачі на несівній

Основною перепорою тут є ССВ. До початку широкого впровадження систем передачі на основі WDM вважалося, що на швидкостях вище 10 Гбіт/с солітонні системи будуть мати переваги перед звичайними методами оптичної передачі та завоюють цей ринок. Однак розвиток систем з WDM, які застосовували техніку компенсації дисперсії з використанням спеціальних ВОК з ненульовою (але невеликою за величиною) дисперсією (NZDSF) та плоскою дисперсійною характеристикою в області 1530-1565 нм пересунув цей рубіж спочатку до 40 Гбіт/с, потім до 80 Гбіт/с, а сучасним станом - до 320-640 Гбіт/с.

Для значень тривалостей імпульсів джерела порядку одиниць пікосекунд швидкість передачі даних 160 Гбіт/с в одному каналі є фактично граничною (скважність імпульсів приблизно 2). Подальше збільшення швидкості можливе за рахунок зменшення тривалості генерованих лазерними джерелами імпульсів - переходу до фемтосекундного діапазону (10^{-15} сек.). Це збільшує скажність імпульсів (при збереженні

періоду генерації імпульсу, що важливо при використанні тих же типів лазерів) та зменшує взаємодію солітонів.

Разом з тим треба відмітити, що сучасний рівень розвитку звичайних оптичних мереж з WDM дозволяє навіть при помірних швидкостях мультиплексованих потоків формувати агрегатні потоки 80 (або 160) Гбіт/с при коефіцієнті мультиплексування $k=32$, 160 (або 320) Гбіт/с при $k=64$ та навіть 320 (640) Гбіт/с при $k=128$. Це каже про те, що в цьому напрямі використання чисто солітонних ліній зв'язку не дає вирашу за ємністю каналу (вже при $k=32$) в порівнянні зі звичайними лініями зв'язку на основі SDH/SONET-WDM/DWDM, хоча і можуть дати вираш за вартістю.

Враховуючи необхідність підтримувати у ВОСП визначену порогову потужність, яка вимагається для генерації/збереження солітонів, можна дійти до висновку, що ера солітонного зв'язку може завершитись, так і не почавшись.

Звичайно, солітонні лінії зв'язку можуть також використовувати техніку мультиплексування, але в цьому напрямку є ще досить багато невирішених задач технологічного рівня, що вже само собі вселяє досить великі надії, бо технології швидко розвиваються та вдосконалюються.

6.1.4.2 Перспективи збільшення довжин регенераційної ділянки

В цьому напрямі солітонні системи мають набагато кращу перспективу, ніж звичайні оптичні, навіть враховуючи безсумнівний прогрес останніх вдосконалень, який дозволив довести довжину регенераційної ділянки звичайних систем до 250-500 км при використанні оптичних підсилювачів EDFA.

Для синхронних солітонних систем, які можуть працювати на наддалекій відстані без регенераторів, а використовують лише підсилювачі типу EDFA було запропоновано *технологію керування солітоном одночасно в часовій та частотній областях*. Ця технологія використовує два механізми керування:

1. Періодичну синхронну модуляцію (PCM) - для керування позиції солітону в часовій області;

2. Вузкосмуговий перенастроюваний смуговий фільтр (ВПСФ) - для керування в частотній області.

ПСМ дозволяє не тільки усунути дрижання фази солітону (джиттер), яке виникає внаслідок ефекту Гордона-Хауса, але і значно зменшити рівень шуму, що визваний спонтанним випроміненням (ASE). ВПСФ являє собою вузкосмуговий слідкуючий фільтр зі смугою 0,3-0,4 нм у якого центральна довжина хвилі може перенастроюватися та керувати в частотній області контуром стабілізації енергії солітону.

6.1.5 Експериментальні солітонні лінії зв'язку

Для дослідження можливостей вищезгаданої технології було створено *кільце солітонної лінії зв'язку* з довжиною 500 км та з підсилювачами EDFA через кожні 50 км. Тут вдалося добитися проходження 150 млн. км повністю без помилок передачі. Цей вражаючий результат дозволив авторам експерименту *стверджувати, що не існує межі для довжини регенераційної ділянки при використанні солітонів*. Приклади характеристик деяких експериментальних солітонних ВОСПІ наведено в табл.6.1. Перші два зразки - лабораторія NTT, третій - AT&T. На самому кінці XX-го сторіччя з'явилися повідомлення про успішне завершення випробувань серійної дуплексної системи WDM (T-31 -BDS Pirelli) сумісно з устаткуванням SONET OC-192 зі швидкістю передачі 10 Гбіт/с по одному каналу в солітонному режимі.

Таблиця 6.1 - Характеристики експериментальних солітонних ВОСПП

λ , мкм	B , Гбіт/с	D , пс/нм·км	Кількість	τ , пс	Тип передачі	$V_{x.L}$ Гбіт/с *км	L , км
1,55	40	-2,8	440 через 26км	7,5	Одномод.лазер+компрес.+зовн.мод.+Ф+EDFA	2600	65
1,52	20	-0,4		12	- -	$2 \cdot 10^4$	1020
1,566	10	-0,45		18	Ерб.лазер, мод-р, комутат, Мультиплес. Маха-Зендера	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$

На самому кінці ХХ-го сторіччя з'явилися повідомлення про успішне завершення випробувань серійної дуплексної системи WDM (Т-31 -BDS Pirelli) сумісно з устаткуванням SONET OC-192 зі швидкістю передачі 10 Гбіт/с по одному каналу в солітонному режимі. В складі устаткування використано: блок генератора солітонних імпульсів, перетворювач лінійного коду RZ/NRZ, оптичні волокна для компенсації дисперсії типу DCF, регенератори на довжині 450 км через кожні 92 км.

Система передачі нового покоління Lambda Xtreme Transport компанії Lucent Technologies забезпечує передачу цифрових даних на швидкості 2,56 Тбіт/с (64 хвилевих канали по 40 Гбіт/с в кожному) на дальність до 4000 км без електричної регенерації сигналу. Для досягнення цих можливостей застосовуються солітонні блоки передачі, раманівські підсилювачі, попередня корекція помилок. Застосовуються імпульси з тривалістю в одиниці пс.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи [пер. с англ.] под ред. Н.Н. Слепова / М.: Техносфера, 2003. - 590 с.
2. Дмитриев С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы: Сб. статей под ред. Дмитриева С. А., Слепова Н.Н., 3е изд., перер. и доп.- М.:Техносфера- 2010.- 608 с.
3. Олифер В. Основы компьютерных сетей. / В. Олифер, Н. Олифер; - СПб. : Питер. 2009. -352 с.
4. Олифер В. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Олифер, Н. Олифер; 4-е изд. - СПб. : Питер. 2011. - 944 с.
5. Складаров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. - М.: Салон-Пресс, 2004. - 265 с.
6. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев - М.: Эко-Трендз, 2001. - 267 с.
7. Корнейчук В.И. Волоконно-оптические системы передачи / В.И. Корнейчук, И.П. Панфилов - Одесса: Друк, 2001. - 435 с.
8. Корнейчук В.И. Волоконно-оптические измерения., 2-е изд. - Киев: Наукова думка, 2002. - 323 с.
9. Бейли Д. Волоконная оптика. Теория и практика [пер. с англ.] под ред. Галеева/ Д. Бейли, Э. Райт. - М.: КУДИЦ- ОБРАЗ, 2006. - 320 с.
10. Климаш М.М. Оптичні та радіоканали телекомунікацій / М.М. Климаш, О.В. Лаврів, Р.І. Бак - Львів: НУ «Львівська політехніка», 2010.- 424 с.
11. Карпуков Л.М. Волоконно-оптичні лінії зв'язку / Л.М. Карпуков, О.В. Щекотихін, В.О. Воскобойник - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. - 153 с.
12. https://ru.wikipedia.org/wiki/волоконно-оптическая*связь*линия_передачи*система_передачи.
13. Стандарти IEEE. Рекомендації ITU

Навчальне видання

ЩЕКОТИХІН Олег Володимирович
ДМИТРЕНКО Віктор Панкратович
ЄФИМЕНКО Микола Володимирович
ПРОСКУРІН Микола Петрович

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

(частина 1)

Комп'ютерний набір *Єфименко М.В., Прокурін М.П.*
Верстання *Єфименко М.В., Прокурін М.П.*

Підписано до друку 04.07.2022. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 14,18.
Тираж 100 прим. Зам. № 470.

Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.