

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ

Конспект лекцій

Модуль 5.2

Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління: конспект лекцій. Модуль 5.2 / Педяш В.В. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017. – 76 с.

Рецензент – д.т.н., проф. Балашов В.О.

Конспект лекцій містить матеріали, що використовуються для підготовки до аудиторних занять та іспиту з дисципліни "Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління" (ТСП МНП). У тексті розглянуті питання еволюції мереж електрозв'язку та концепція побудови сучасних мереж наступних поколінь NGN (СПП). Основну увагу приділено проблемам передачі пакетного трафіка, побудови і функціонування систем передачі синхронної цифрової ієрархії (NG-SDH) та оптичної транспортної ієрархії (ОТН). Також розглянуті питання функціонування технології основної процедури передачі кадрів GFP (Рек. ITU-T G.7041) і схеми керування пропускну здатності лінії LCAS (Рек. ITU-T G.7042).

СХВАЛЕНО

на засіданні кафедри
телекомунікаційних систем
і рекомендовано до друку.

Протокол № 8 від 29.12.2016 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

методичною радою академії зв'язку

Протокол № 5 від 28.02.2017 р.

Зміст

1	Принципи побудови сучасних телекомунікаційних мереж.....	5
1.1	Глобальна інформаційна інфраструктура та еволюція мереж зв'язку.....	5
1.2	Архітектура сучасних систем NGN.....	7
1.4	Технології транспортного рівня NGN.....	10
2	Функціональна архітектура транспортних мереж	14
3	Технологія NG-SDH.....	22
3.1	Організація транспортування пакетного трафіка у системах NG-SDH	22
3.2	Узагальнена процедура формування кадрів GFP. Типи і структура кадрів	27
3.3	Формування кадрів GFP-F та GFP-T.....	32
3.4	Організація широкосмугових каналів у системах NG-SDH	35
3.5	Схема регулювання пропускної здатності лінії LCAS.....	40
4	Системи передачі оптичної транспортної ієрархії OTN	47
4.1	Оптична транспортна мережа та її компоненти.....	47
4.2	Блок навантаження оптичного каналу OPU	57
4.2.1	Призначення і формат	57
4.2.2	Упакування сигналів CBR2G5, CBR10G і CBR40G в OPUk.....	59
4.2.3	Упакування кадрів GFP в OPUk	62
4.2.4	Віртуальна конкатенація OPUk	63
4.3	Блок даних оптичного каналу ODU	66
4.4	Заголовки інформаційних структур каналу OSC.....	72
	Список літератури	75

Вступ

Конкуренція на ринку послуг зв'язку призвела до заміщення аналогових систем передачі цифровими системами PDH та SDH. Подальший розвиток Інтернет сервісів призвів до впровадження на транспортних мережах операторів зв'язку технології спектрального ущільнення оптичного волокна DWDM. Ідея розробки концепції мереж наступних поколінь (NGN) була запропонована в 2001 році Європейським інститутом стандартів електрозв'язку ETSI та Сектором стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку МСЕ-Т і дозволила вирішити наступні проблеми:

- швидке впровадження нових послуг зв'язку з мінімальними витратами;
- побудову інтегрованої цифрової мережі на базі обладнання з комутацією пакетів;
- впровадження послуг Triple Play для стаціонарних та мобільних користувачів.

Істотною відмінністю мереж NGN від попередніх є відокремлення функцій надання послуг (сервісів) та функцій передачі трафіка. Це надало мережам NGN принцип модульності, який полягає у можливості модернізації обладнання надання послуг окремо від транспортного обладнання. Основою для побудови транспортного ядра мереж NGN є системи передачі оптичної транспортної ієрархії (OTH). Також можливо використовувати технологію синхронних систем передачі нового покоління (NG-SDH) для модернізації існуючих транспортних мереж та побудови нових фрагментів мереж доступу.

Метою дисципліни "Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління" є вивчення принципів побудови архітектури мереж NGN, архітектури та принципів функціонування систем NG-SDH і OTH. Детально розглянута технологія основної процедури формування кадрів (GFP), яка використовується у системах NG-SDH та OTH для інкапсуляції трафіка користувача. Також надається увага схемі керування пропускну здатності лінії (LCAS), яка є логічним доповненням до ідеї конкатенації (зчеплення) інформаційних структур систем NG-SDH і OTH.

1 Принципи побудови сучасних телекомунікаційних мереж

1.1 Глобальна інформаційна інфраструктура та еволюція мереж зв'язку

Кінцевою метою еволюції телекомунікаційних та інформаційних мереж є створення Глобальної Інформаційної Інфраструктури (ГІІ), загальні принципи якої були прийняті на засіданні Комісії по Європейській Економічній Спільноті у лютому 1995 року.

Глобальна інформаційна інфраструктура – це сукупність мереж, обладнання користувачів, інформації та людських ресурсів, які можуть бути використані для: 1) доступу до різної інформації; 2) зв'язку між собою; 3) навчання; 4) роботи; 5) проведення дозвілля в будь-який час і з будь-якого місця у світовому масштабі [Рек. ITU Y.101].

У процесі створення ГІІ відбувається поступове зближення та конвергенція багатьох галузей господарства – в основному це телекомунікації, інформаційно-обчислювальні технології та індустрія розваг (побутової електроніки та проведення дозвілля). ГІІ є центром конвергенції та постійно збільшується в обсязі.

ГІІ складається із трьох елементів:

- 1) *людей*, здатних створювати, використовувати та оперувати інформацією;
- 2) *інформаційних пристроїв*, які використовуються для зберігання, оброблення та здійснення доступу до інформації;
- 3) *галузі зв'язку*, яка передає інформацію між географічно рознесеними інформаційними пристроями.

Взаємодія елементів продемонстрована на рис. 1.1.

Інформаційний пристрій – термін, що використовується для опису термінального пристрою, який використовується обслуговуючим додатком.

Додаток – структурований набір можливостей, який забезпечує додаткову функціональність, підтримувану однією або більшою кількістю послуг.

Згідно з вищенаведеним визначенням, однією з головних складових ГІІ є регіональні, магістральні та глобальні *телекомунікаційні мережі* операторів зв'язку.

Телекомунікаційна мережа (ТкМ) – це сукупність систем передавання, комутаційних систем та інших технічних засобів, об'єднаних у єдиному технологічному процесі, що забезпечує утворення з'єднань між двома і більше пунктами та підтримує процес надання користувачам телекомунікаційних послуг. Основними складовими є територіально рознесені *мережі доступу* і *транспортна мережа*, що їх з'єднує.

Мережа доступу – це частина телекомунікаційної мережі, що забезпечує фізичне та логічне з'єднання пунктів закінчення мережі з найближчим вузлом транспортної мережі.

Транспортна мережа – це частина телекомунікаційної мережі, яка здійснює взаємне з'єднання мереж доступу.

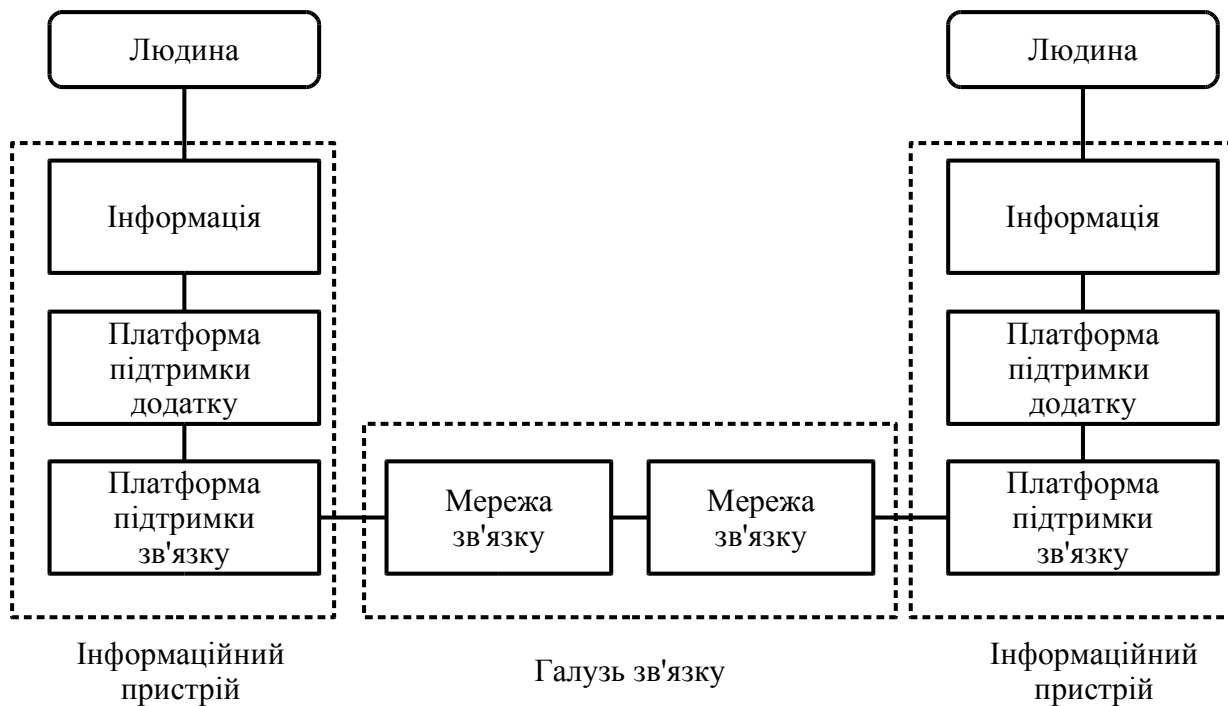


Рисунок 1.1 – Взаємодія елементів ГП

За історію свого існування (з моменту винайдення телефонного зв'язку в 1876 р. пройшло більше 140 років), телекомунікаційна мережа в різні часи будувалася на базі кількох ідеологій побудови та функціонування (рис. 1.2).

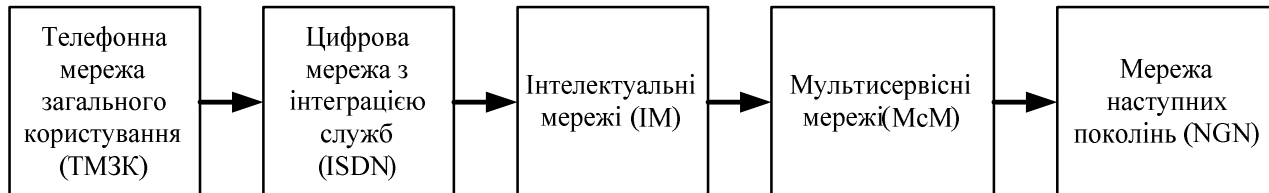


Рисунок 1.2 – Етапи еволюції телекомунікаційних мереж

Довгий час варіант організації телекомунікаційної мережі опирався на поняттях *первинної* та *вторинної* мереж. *Первинна мережа* складалася з сукупності каналів та трактів передавання, створених обладнанням вузлів та ліній передавання, що з'єднували ці вузли. Первинна мережа надавала канали в експлуатацію вторинним мережам. *Вторинна мережа* складалася з каналів зв'язку первинної мережі, обладнання комутації та розподілу з метою організації зв'язку між абонентськими пристроями користувачів.

Наступним етапом еволюції ТкМ була розробка концепції *цифрової мережі з інтегрованими службами (ISDN)*, що передбачала надання численних послуг на базі цифрових каналів з швидкостями від 64 до 2048 кбіт/с.

Подальше збільшення кількості послуг ТкМ виконувалося шляхом запровадження послуг *інтелектуальної мережі (IM)*. Архітектура IM дозволяла розширити функціональність ТкМ шляхом її доповнення системою комутації послуг (SSP) та пунктів управління послугами (SCP).

Загальним недоліком трьох вищенаведених етапів еволюції ТкМ була її побудова на базі аналогових та цифрових систем передавання з комутацією каналів. Їх загальним недоліком була невисока ефективність використання пропускну здатності систем передавання та відсутність достатньої гнучкості у виборі типів цифрових каналів для надання послуг. Всі недоліки були враховані при розробці та впровадженні мультисервісних мереж, що базувалися на принципах комутації пакетів.

Мультисервісна мережа (МсМ) – це єдина пакетна мережа, яка здатна передавати голос, відеозображення та дані з використанням єдиної інфраструктури. Основним стимулом до появи та розвитку цих мереж була підтримка складних мультимедійних програм, зменшення вартості обладнання мережі та його обслуговування. Концепція МсМ включає в себе кілька наступних аспектів:

- 1) конвергенція загрузки мережі, яка визначає передавання різнотипного трафіку за допомогою єдиного формату представлення даних (пакети);
- 2) конвергенція протоколів, що передбачає перехід від великої кількості різнотипних протоколів до одного загального (наприклад, IP);
- 3) фізична конвергенція, що передбачає використання єдиної мережної інфраструктури для передавання різних типів трафіку;
- 4) конвергенція пристроїв, яка приводить до інтеграції в одному корпусі обладнання комутації (Ethernet та ATM) і маршрутизації IP. В додаток до цього, пристрої можуть виконувати функції по обробці даних та підтримувати пакетну телефонію.

Всі ці, а також багато інших переваг мультисервісної мережі були покладені в основу концепції мереж наступних поколінь.

1.2 Архітектура сучасних систем NGN

Мережа наступних поколінь – це мережа з пакетною комутацією, придатна для надання послуг електрозв'язку і для використання декількох широкосмугових технологій транспортування із включеною функцією QoS, у якій пов'язані з обслуговуванням функції не залежать від застосованих технологій, що забезпечують транспортування. Забезпечує вільний доступ користувачів до мереж і конкуруючих постачальників послуг/або обраними послугами. Підтримує універсальну мобільність, яка забезпечує постійне і повсюдне надання послуг зв'язку.

Для задоволення вищезазначених вимог архітектура мережі NGN передбачає використання зв'язаних між собою кількох груп функцій, взаємодія між якими визначає функціональну архітектуру мережі. Вона включає наступні принципи:

- 1) *підтримка численних технологій доступу* з метою формування гнучкості на мережах доступу;
- 2) *розподілене керування*, необхідне для адаптації до розподіленої природи мереж з комутацією пакетів та підтримки прозорості розташування при розподілених обчисленнях;

3) *відкрите керування*, що вимагає відкритості обладнання контролю мережі з метою підтримки можливості створення послуг, відновлення та можливості підключення сервісних послуг третіми особами;

4) *поліпшений захист і безпека* як базовий принцип відкритої архітектури для захисту інфраструктури мережі шляхом використання відповідних механізмів.

Однією з вимог NGN є зв'язність (connectivity, англ.) – прямо або за допомогою інших мереж (рис. 1.3). Дана схема передбачає використання наступних стандартних інтерфейсів.

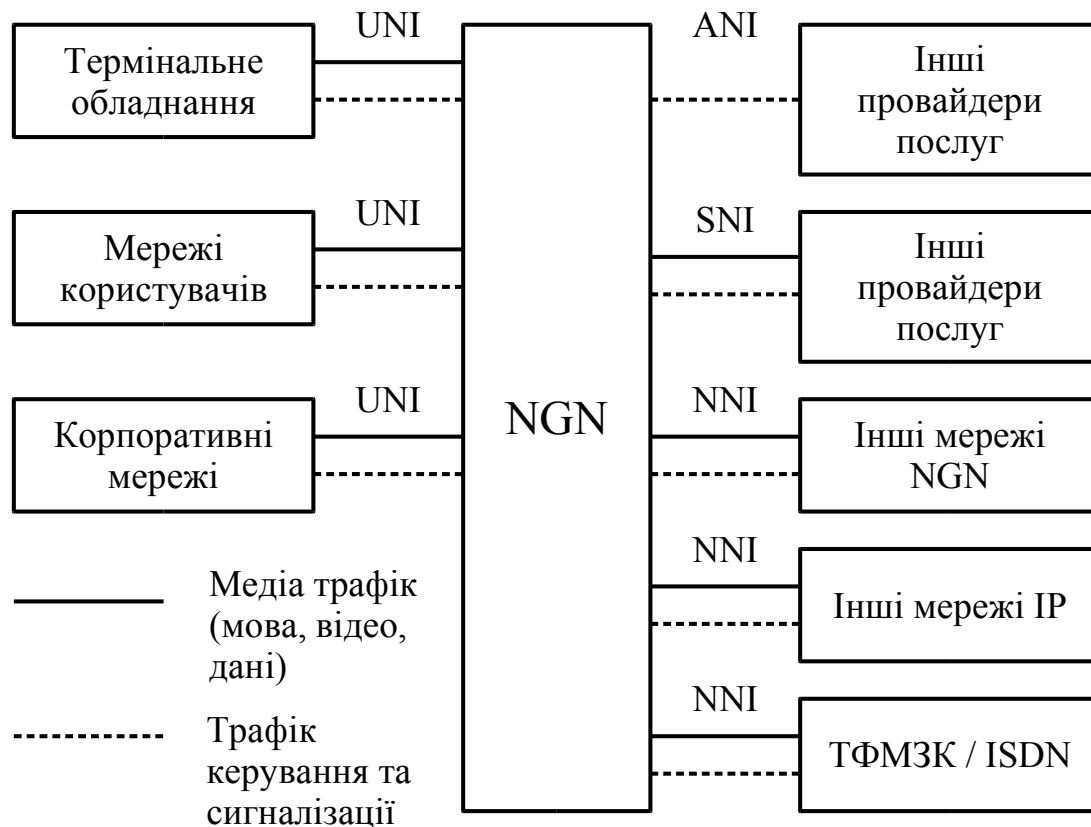


Рисунок 1.3 – Зв'язність мережі NGN

Інтерфейс користувач – мережа (User – network interface, UNI) використовується для підімкнення до термінального обладнання, мереж користувачів або корпоративних мереж.

Інтерфейс мережа – мережа (Network – network interface, NNI) використовується для підімкнення NGN до інших мереж NGN (на рівні послуг або транспорту), існуючих мереж на базі IP протоколу або ТФМЗК/ISDN.

Інтерфейс додаток – мережа (Application – network interface, ANI) служить для організації обміну між NGN і додатками, що виконуються на обладнанні сторонніх провайдерів послуг.

Мережний інтерфейс послуг (Service network interface, SNI) забезпечує канал взаємодії та обміну між NGN та іншими провайдерами послуг, наприклад провайдерами контенту [ITU-T Y.1910].

Функціональна архітектура мережі NGN показана на рис. 1.4 [Рек. Y.2012].

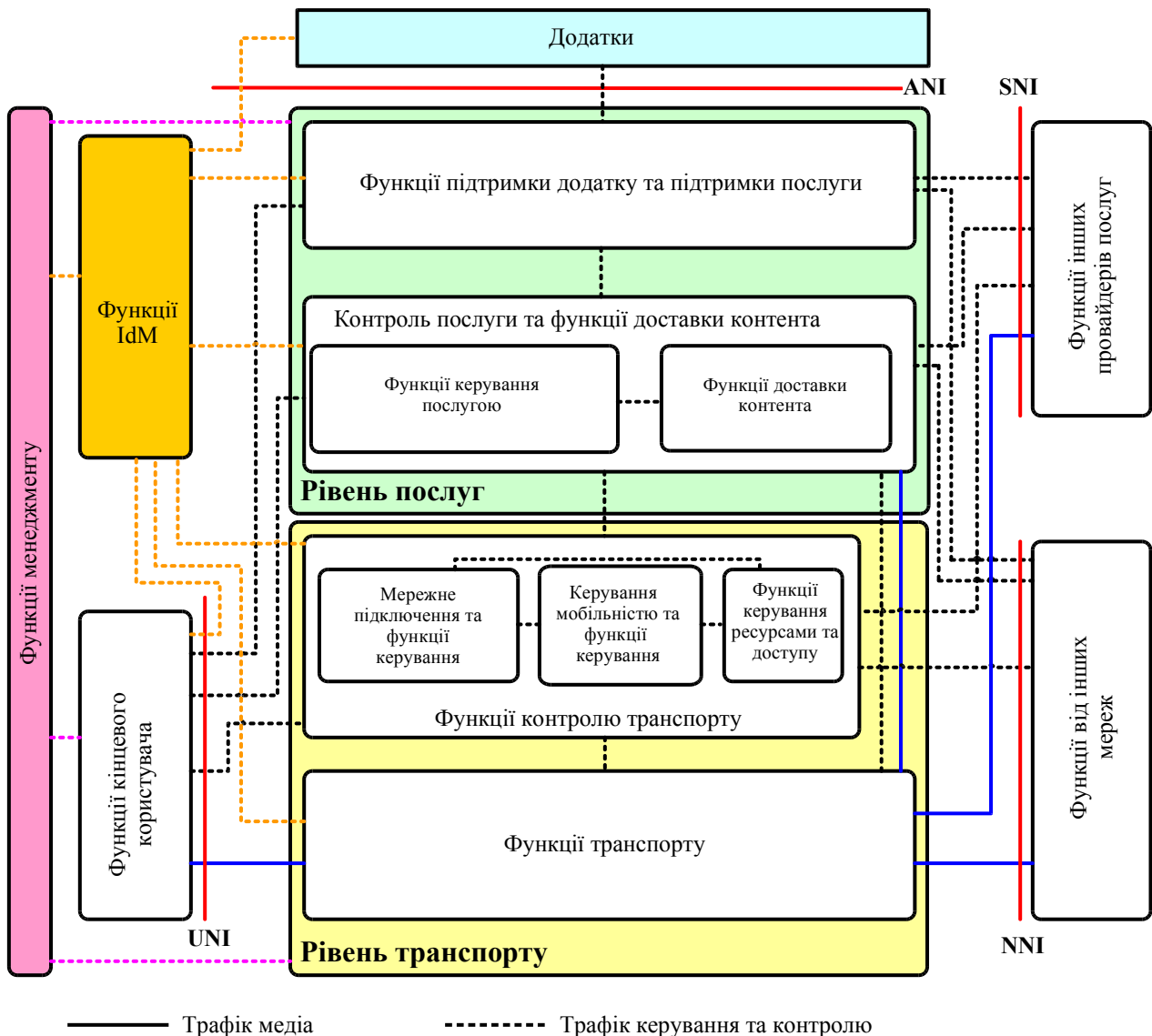


Рисунок 1.4 – Функціональна архітектура мережі NGN

Вона підтримує описані раніше еталонні точки UNI, NNI, ANI and SNI. Функції NGN поділяються на функції рівня транспорту, рівня послуг та керування (рис. 1.5). Рівень транспорту забезпечує наступні з'єднання: користувач – користувач, користувач – платформа надання послуг (сервісна платформа) і сервісна платформа – сервісна платформа.

У загальному випадку, на рівні транспорту можуть бути використані типи технологій передачі згідно з рекомендаціями ITU G.805 і G.809:

- 1) з встановленням з'єднання та комутацією каналів (connection-oriented circuit-switched, CO-CS);
- 2) з встановленням з'єднання та комутацією пакетів (connection-oriented packet-switched, CO-PS);

3) без встановлення з'єднання та комутацією пакетів (connectionless packet-switched, CLPS).

Обмін даними, керування і сигналізація здійснюється за допомогою протоколу IP.

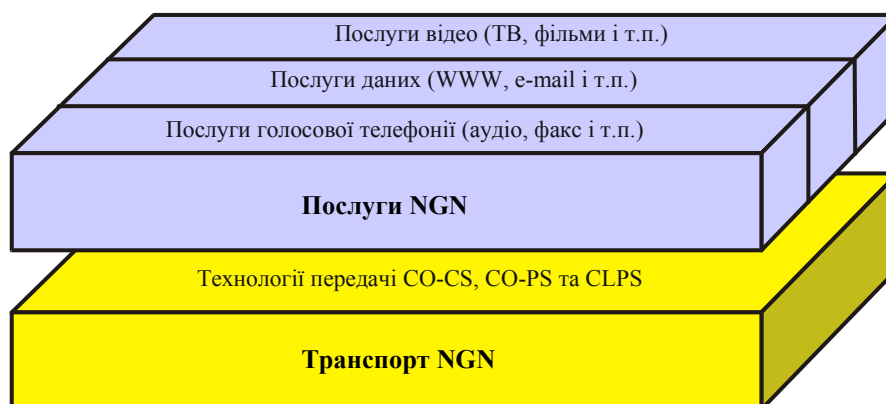


Рисунок 1.5 – Розподіл функцій надання послуг і транспорту в NGN

Крім відповідних функцій, обидва ці рівні включають функції керування і контролю. Тому в літературі з NGN часто описується трирівнева модель мережі. Слід враховувати, що функції рівня транспорту реалізуються обладнанням транспортної мережі (транспортного ядра NGN) і мереж доступу. Тому рівень транспорту розділяється на два підрівні: транспортного ядра і доступу. У випадку виділення цих підрівнів у якості окремих рівнів, отримуємо чотирирівневу архітектуру мережі NGN: рівень транспорту, доступу, надання послуг і керування.

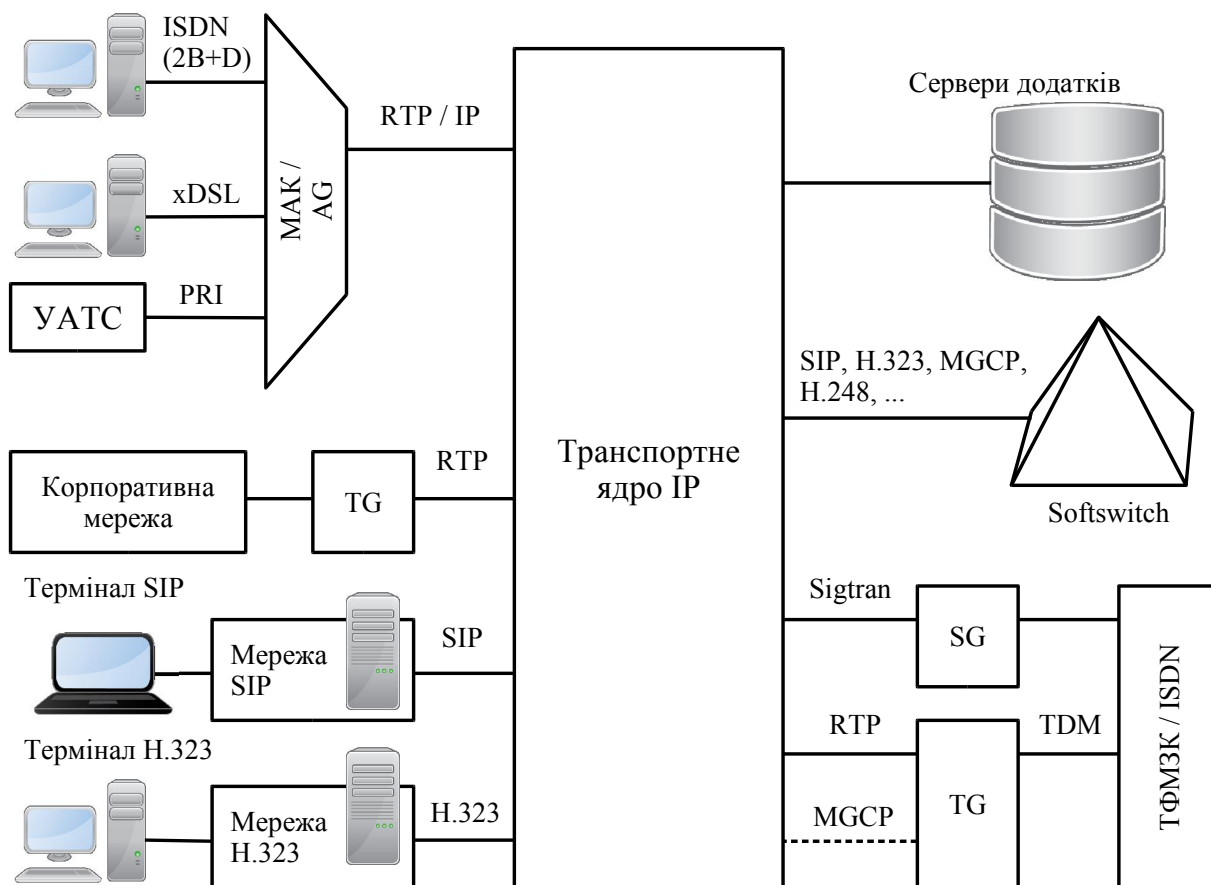
Структурна схема мережі NGN (рис. 1.6) містить високошвидкісне транспортне ядро IP, яке поєднує розподілене обладнання надання послуг і керування. Для підключення мереж доступу та існуючих ТФМЗК / ISDN використовуються відповідні шлюзи (AG, TG і SG).

1.4 Технології транспортного рівня NGN

Раніше було зазначено, що транспортний рівень NGN підрозділяється на підрівні доступу і транспортного ядра. Основною вимогою до систем передавання обох підрівнів є можливість транспортування трафіка IP. На підрівні доступу можливе використання більшості існуючих технологій передачі (табл. 1.1).

До систем передачі підрівня транспортного ядра висуваються наступні вимоги:

1) можливість транспортування трафіка IP. Слід зазначити, що сучасне транспортне обладнання (мультиплексори OTH/DWDM, NG-SDH, маршрутизатори і т.п.) має трибутарні інтерфейси Ethernet, тому ця вимога зводиться до можливості транспортування трафіка Ethernet;



AG — шлюз доступу (Access Gateway);
 SG — шлюз сигналізації (Signaling Gateway);
 TG — транспортний шлюз (Trunking Gateway);
 MAK — мультисервісний абонентський концентратор

Рисунок 1.6 – Структурна схема мережі NGN

- 2) можливість організації симетричних/асиметричних/симплексних каналів зв'язку з постійною або змінною пропускнуою здатністю;
- 3) ефективна організація з'єднань по топології "точка-точка", "точка-багатоточка" і "багатоточка- багатоточка".

Таблиця 1.1 – Варіанти технологій доступу NGN

№ з/п	Середовище передачі	Тип технології доступу
1	Телефонна пара	xDSL
2	Мережі кабельного ТВ (коаксіал)	DOCSIS
3	Оптичні кабельні мережі	PON, FTTx
4	Радіоефір	VSAT, WiFi, WiMAX
5	Електричні мережі	PLC
6	Стільникові мережі зв'язку	GPRS (GSM), EVDO (CDMA)
7	Системи передачі	NG-SDH

Багаторівнева ієрархія транспортних технологій мереж NGN показана на рис. 1.7. У лівій частині даної схеми показаний стек технологій передачі (в основному, на базі технологій з комутацією каналів), який використовується сьогодні. У правій частині схеми показаний стек технологій передачі, який планується використовувати в майбутньому.

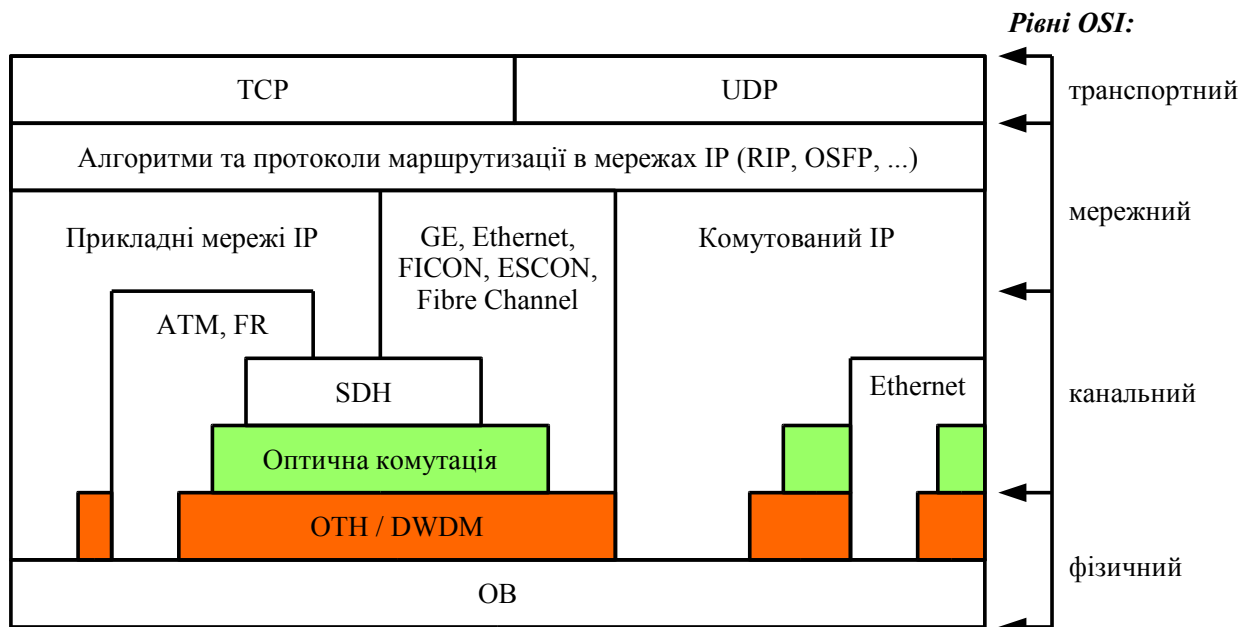


Рисунок 1.7 – Технології передачі підрівня транспортного ядра NGN

Згідно з даною схемою, можлива прив'язка технологій транспортного рівня NGN до відповідних рівнів еталонної моделі мережі OSI.

Фізичний рівень представлений оптичним волокном (ОВ), ефективність використання якого підвищується шляхом використання ВОСП DWDM (або більш сучасними системами оптичної транспортної ієрархії ОТН). Обладнання оптичної комутації дозволяє створювати статичні або динамічні (змінювані) траси оптичних каналів без проміжного перетворення сигналу в електричну форму. Також можливий варіант оптичної комутації зі зміною довжини хвилі вихідного сигналу (рис. 1.8).

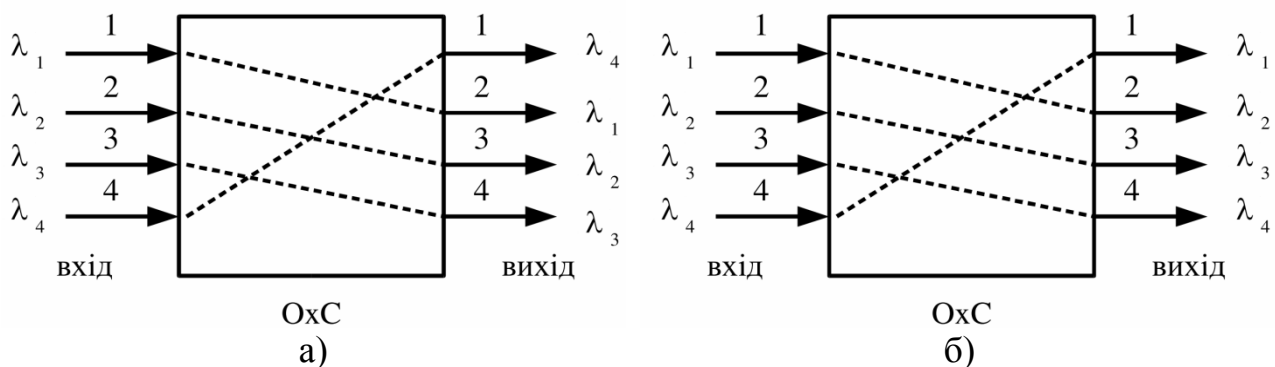


Рисунок 1.8 – Оптичний комутатор:

- а) без зміни довжини хвилі сигналу оптичного каналу;
- б) зі зміною довжини хвилі сигналу оптичного каналу

На *канальному рівні* використовуються наступні варіанти завантаження трафіка (рис. 1.9) за протоколом IP у ВОСП фізичного рівня:

- 1) IP → NG-SDH → DWDM або IP → Ethernet → NG-SDH → DWDM;
- 2) IP → DWDM;
- 3) IP → Ethernet → DWDM / OB;
- 4) IP → ATM / FR → DWDM;
- 5) IP → DWDM → OB або IP → OB (застосовувався до появи OTH).

Мережний рівень складається з верхнього та нижнього підрівнів. На нижньому підрівні трафік від різних систем каналного рівня перетворюється в стандартні пакети IP. Верхній рівень служить для маршрутизації отриманих пакетів.

На *транспортному рівні* виконується операція об'єднання пакетів IP у кадри TCP або UDP. Представлені технології транспортного рівня є рівноцінними і рівноправними з точки зору їх використання для побудови транспортної мережі.

Формування даної ієрархії відбувалося в кілька етапів (рис. 1.9):

- 1) поява систем DWDM і оптичних комутаторів, що дозволяли здійснювати конвертування сигналу з однієї довжини хвилі на іншу;

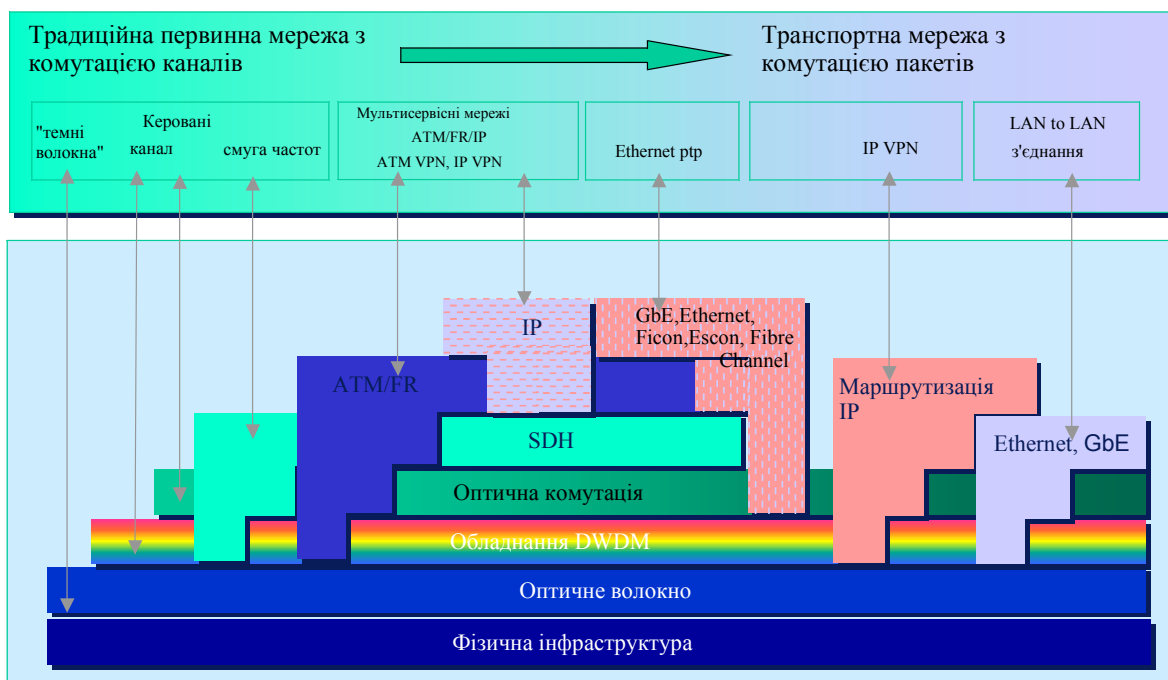


Рисунок 1.9 – Еволюція транспортних технологій NGN

- 2) поява концепції мультисервісних мереж сприяла розвитку технологій ATM і FR, у яких фізичний канал замінений на віртуальний, який більш зручний для передавання пакетного трафіка. Розвиток даних технологій також сприяв появі віртуальних приватних мереж (VPN), які розглядалися як виділена і закріплена за користувачем сукупність віртуальних каналів (ATM VPN);

- 3) розвиток Ethernet при переході від локальних мереж (LAN) до міських (MAN) сприяв народженню Ethernet PTP ("точка-точка", point-to-point);

- 4) розвиток віртуальних мереж IP (IP VPN);

- 5) поява домашніх мереж користувачів сприяла тому, що транспортна мережа повинна виконувати функцію їх з'єднання між собою (LAN-LAN).

2 Функціональна архітектура транспортних мереж

Для кращого розуміння механізмів функціонування систем передачі SDH, OTN та ряду інших необхідно мати уявлення про побудову ієрархічної структури транспортної мережі. Узагальнена функціональна архітектура транспортних мереж (ITU-T G.805) має ієрархічну структуру і передбачає декомпозицію мережі на деяку кількість рівнів, кожний з яких виконує одну або кілька функцій, пов'язаних зі спільним завданням транспортування клієнтського трафіка (рис. 2.1). Модель транспортної мережі будується у вигляді стека шляхом нашаровування мережних транспортних рівнів. Кожний такий рівень забезпечує транспорт для верхнього стосовно нього рівня і називається "сервером". Вищий рівень, який забезпечується транспортом, називається "клієнтом". Обидва зазначених рівні зв'язані між собою відношенням "клієнт-сервер".

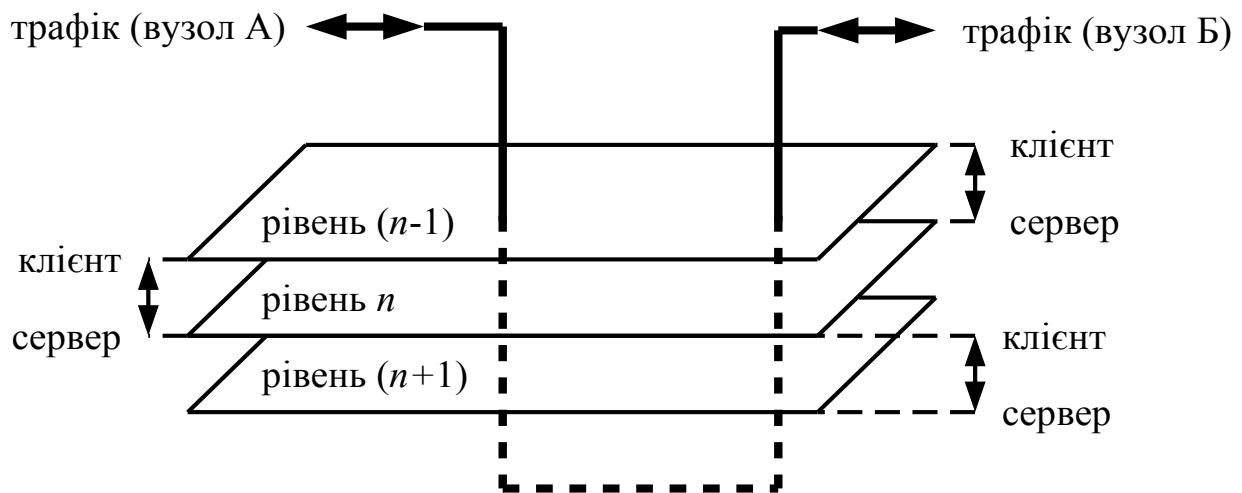


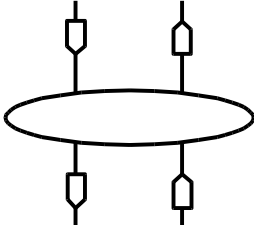
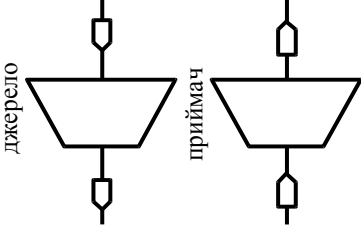
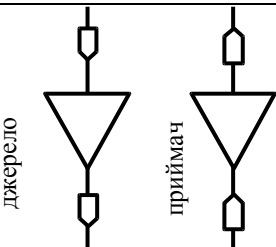
Рисунок 2.1 – Багаторівнева модель транспортної мережі

Функціональну архітектуру мережі можна поділити на кілька груп елементів:

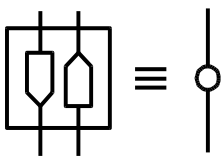
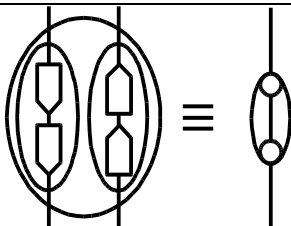
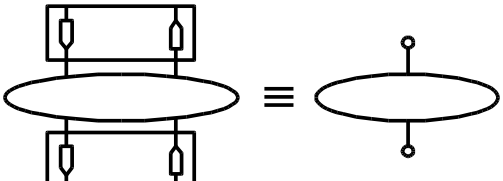
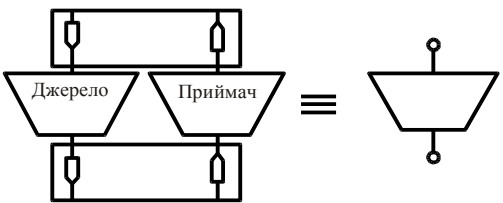
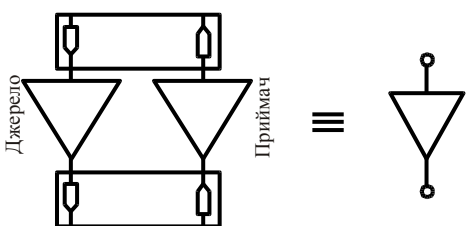
1) *архітектурні елементи*, які являють собою обмежений за кількістю набір елементарних функцій, якими можна повністю описати функціонування мережі. Перелік архітектурних елементів з вказівкою виконуваної ними функції наданий у табл. 2.1.

Для зменшення кількості графічних елементів на функціональних схемах мереж зі складною структурою, використовується об'єднання кількох вищеписаних елементарних функцій в один графічний символ. Стандартні операції групування елементарних функцій надано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Функції архітектурних елементів функціональної архітектури

Назва	Символ	Виконувана функція
Вхід або Вихід даних (Input or Output)	 Вхід або Вихід	Цей символ використовується для вказівки напрямку потоку даних і є частиною елементарної функції
Елементарна функція з'єднання (Connection atomic function)	 Однонаправлена функція з'єднання	Цей символ зображує можливості з'єднання, які має мережний елемент або мережа. З'єднання у функції з'єднання здійснюються між входом і одним або більше виходів. За необхідності з'єднання можуть бути вилучені
Елементарна функція адаптації даних (Adaptation atomic function)	 Однонаправлена функція адаптації	Цей символ зображує адаптацію інформаційної структури в клієнтському мережному транспортному рівні у структуру, яка може бути передана у серверному мережному рівні
Елементарна функція закінчення маршруту даних (Trail termination atomic function)	 Однонаправлена функція закінчення маршруту	Цей символ відображає: 1) точки початку і закінчення або 2) джерело й приймач маршруту через мережний транспортний рівень

Таблиця 2.2 – Операції групування елементарних функцій

Назва	Символ	Призначення / функція / дія
Об'єднання в пару (pairing)		Прив'язка Входу і Виходу однієї елементарної функції, яка переносить однотипну інформацію з метою формування двонаправленого порту, називається об'єднанням у пару
Зв'язування (Binding)	 Однонаправлена еталонна точка	Прив'язка Входу і Виходу різних елементарних функцій, які передають однотипну інформацію, тобто з'єднання Виходу з Входом називається зв'язуванням . Саме ж з'єднання називається односпрямованою еталонною точкою
Еталонна точка (Reference Point)	 Двонаправлена еталонна точка	Двонаправленою еталонною точкою називається комбінація елементарних функцій об'єднання в пару і зв'язування
Двонаправлена функція з'єднання (Bi-directional connection function)		Комбінація із двох елементарних функцій з'єднання із протилежними напрямками передачі даних
Двонаправлена функція адаптації (Bi-directional adaptation function)	 Джерело Приймач	Комбінація із двох елементарних функцій адаптації із протилежними напрямками передачі даних
Двонаправлена функція закінчення маршруту (Bi-directional trail termination function)	 Джерело Приймач	Комбінація із двох елементарних функцій закінчення маршруту із протилежними напрямками передачі даних

Взаємозв'язок між елементарними функціями і багаторівневою моделлю мережі показана на рис. 2.2. Даний рисунок також показує порядок розміщення елементарних функцій всередині функціональної моделі.

2) *топологічні (логічні) елементи*, які можуть бути використані для забезпечення найбільш абстрактного опису мережі з погляду топологічного взаємозв'язку між групою подібних еталонних точок. Нижче розглянуто чотири топологічні компоненти:

- мережний транспортний рівень (layer network);
- підмережа (subnetwork);
- ланка (link);
- група доступу (access group).

Використовуючи тільки дані елементи, є можливість повністю описати логічну топологію мережного транспортного рівня. На рис. 2.3 показані графічні символи топологічних елементів, які широко використовуються при побудові функціональних моделей мереж.

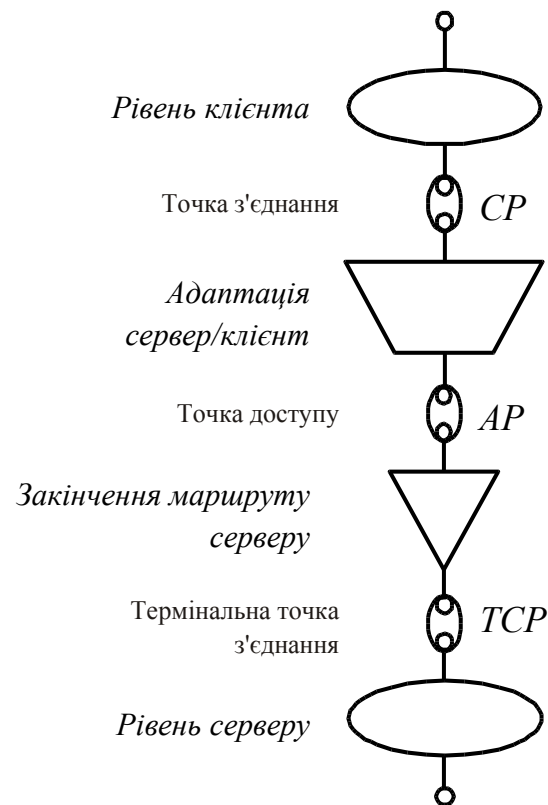
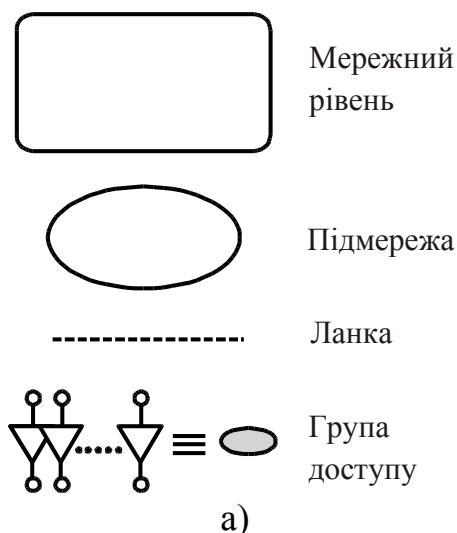


Рисунок 2.2 – Порядок розміщення функцій багаторівневої моделі мережі

які широко використовуються при

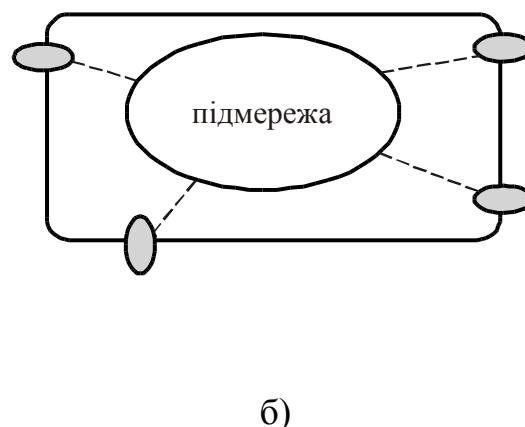


Рисунок 2.3 – Топологічні елементи мережі:

- а) графічні позначення;
- б) взаємозв'язок між собою

Мережний транспортний рівень містить повний набір груп доступу того самого типу, який може бути пов'язаний з метою передавання інформації. Інформація передається за маршрутом між двома або більшою кількістю точок

закінчення маршруту в мережному рівні. Сукупність точок закінчення маршруту формує в мережному рівні маршрут, який може бути використаний для передавання даних і стан якого контролюється системою керування мережі. Для кожного типу закінчення маршруту існує окремий і логічний мережний рівень. Групи доступу та підмережі є компонентами, які використовуються для опису структури мережних рівнів. Ланки між групами доступу та підмережами описують топологію мережного шару.

Підмережа існує всередині одного мережного шару та містить набір портів, які доступні для передавання характерної для мережного шару інформації. Зв'язки між двома або більш портами на межі підмережі забезпечуються системою керування мережі та дозволяють змінювати зв'язність підмережі. В момент створення з'єднання підмережі також створюються відповідні еталонні точки. Дозволяється розподіл підмереж на менші підмережі, які з'єднуються ланками. Матриця з'єднання є окремим випадком підмережі і не може бути поділена на менші підмережі.

Матриця є об'єктом, який є окремим випадком підмережі та використовується з метою маршрутизації і керування. Також може бути використаний для захисного перемикавання.

Ланка є сукупністю портів на межі певної підмережі або групи доступу, яка пов'язана з відповідною сукупністю портів на межі іншої підмережі або групи доступу для передачі характерної для мережного шару інформації. Ланка відображає топологічний зв'язок і наявну транспортну пропускну здатність між: парою підмереж, підмережею і групою доступу або парою груп доступу. Ланки встановлюються і обслуговуються серверним рівнем.

Група доступу являє групу функцій, асоційованих із закінченням маршруту даних і пов'язаних з тією ж підмережею або ланкою.

3) **транспортні об'єкти**, до яких входять **з'єднання ланок** (link connection, LC), **з'єднання підмереж** (subnetwork connection, SNC), **мережне з'єднання** (network connection, NC) і **маршрут даних** (trail).

З'єднання ланок являє собою об'єкт, обмежений портами, що використовується для прозорого передавання інформації. Є парою функцій адаптації і маршрутом даних на серверному рівні.

З'єднання підмереж є об'єктом, складеним з послідовності підмереж для можливості прозорого передавання інформації.

Мережне з'єднання – це транспортний об'єкт, сформований послідовністю з'єднань і обмежений термінальними точками з'єднання (terminal connection point, TCP).

Маршрут (поток) даних є об'єктом, що складається з асоційованої пари однонаправлених потоків даних між точками доступу того самого мережного транспортного рівня, які здатні одночасно передавати інформацію в протилежних напрямках між відповідними елементами введення/виводу. Даний об'єкт формується шляхом об'єднання *функції закінчення маршруту даних* на близькому і далекому кінцях, а також *мережного з'єднання* між ними.

Взаємозв'язок вищеназваних транспортних об'єктів показано на рис. 2.4.

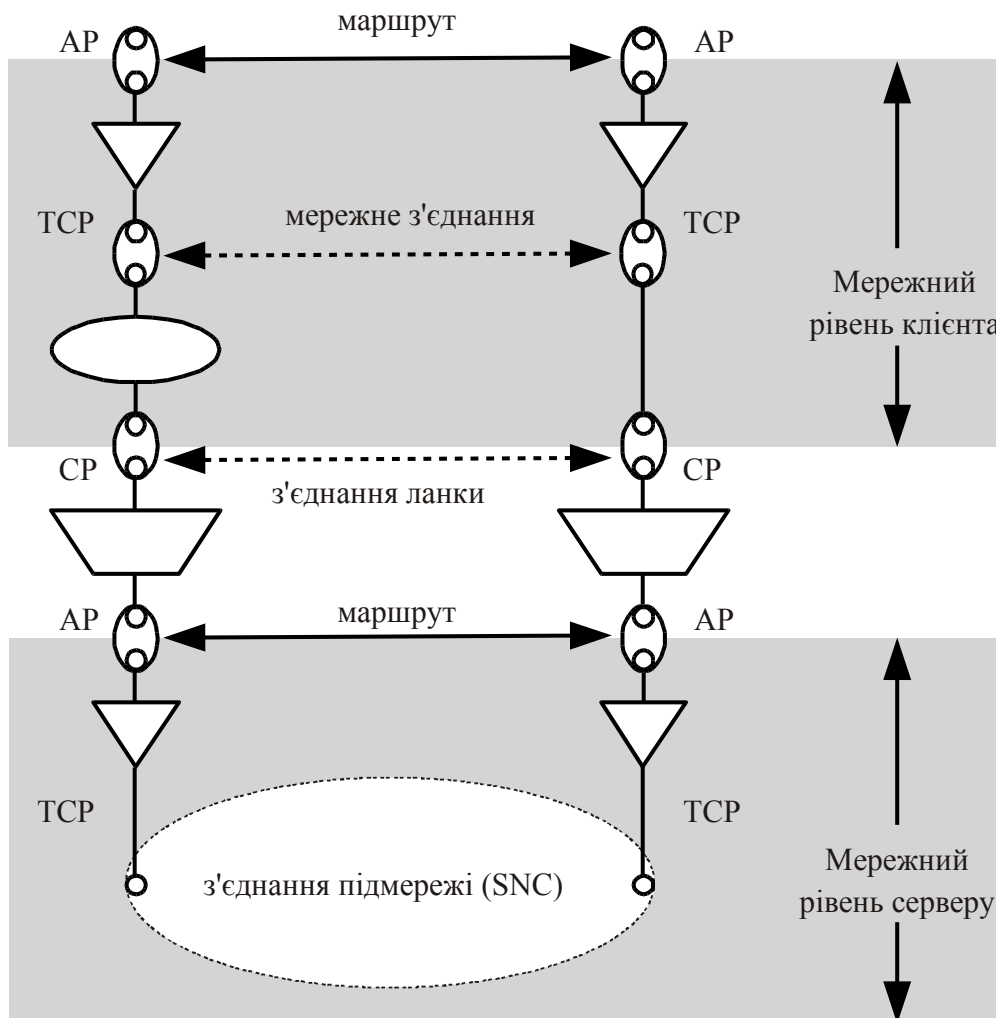


Рисунок 2.4 – Транспортні об'єкти

Як видно з даного рисунка, крім вищевказаних об'єктів, існує також і кілька типів еталонних точок:

- **точка доступу** (access point, AP) складається з пари розташованих у тому ж місці однонаправлених точок доступу;
- **точка з'єднання** (connection point, CP) служить для обмеження з'єднання;
- **термінальна точка з'єднання** (terminal connection point, TCP) є різновидом точки з'єднання, коли функція закінчення маршруту даних обмежується функцією адаптації або матричної обробки.

На рис. 2.5 показаний приклад передавання стандартного потоку E1 зі швидкістю 2048 кбіт/с через мережу SDH. У цьому випадку задіяно сім наступних мережних рівнів:

- 1) рівень E12 містить закінчення внутрішньостанційної секції PDH, тобто служить для транспортування електричного сигналу на внутрішньостанційному закінченні згідно з Рек. ITU-T G.703;
- 2) рівень P12 підтримує транспортування сигналу PDH зі швидкістю 2048 кбіт/с зі структурою циклу, описуваною рекомендацією ITU-T G.702;
- 3) рівень S12 служить для організації тракту SDH нижнього рівня. Даний і наступні рівні описані в Рекомендації ITU-T G.707;

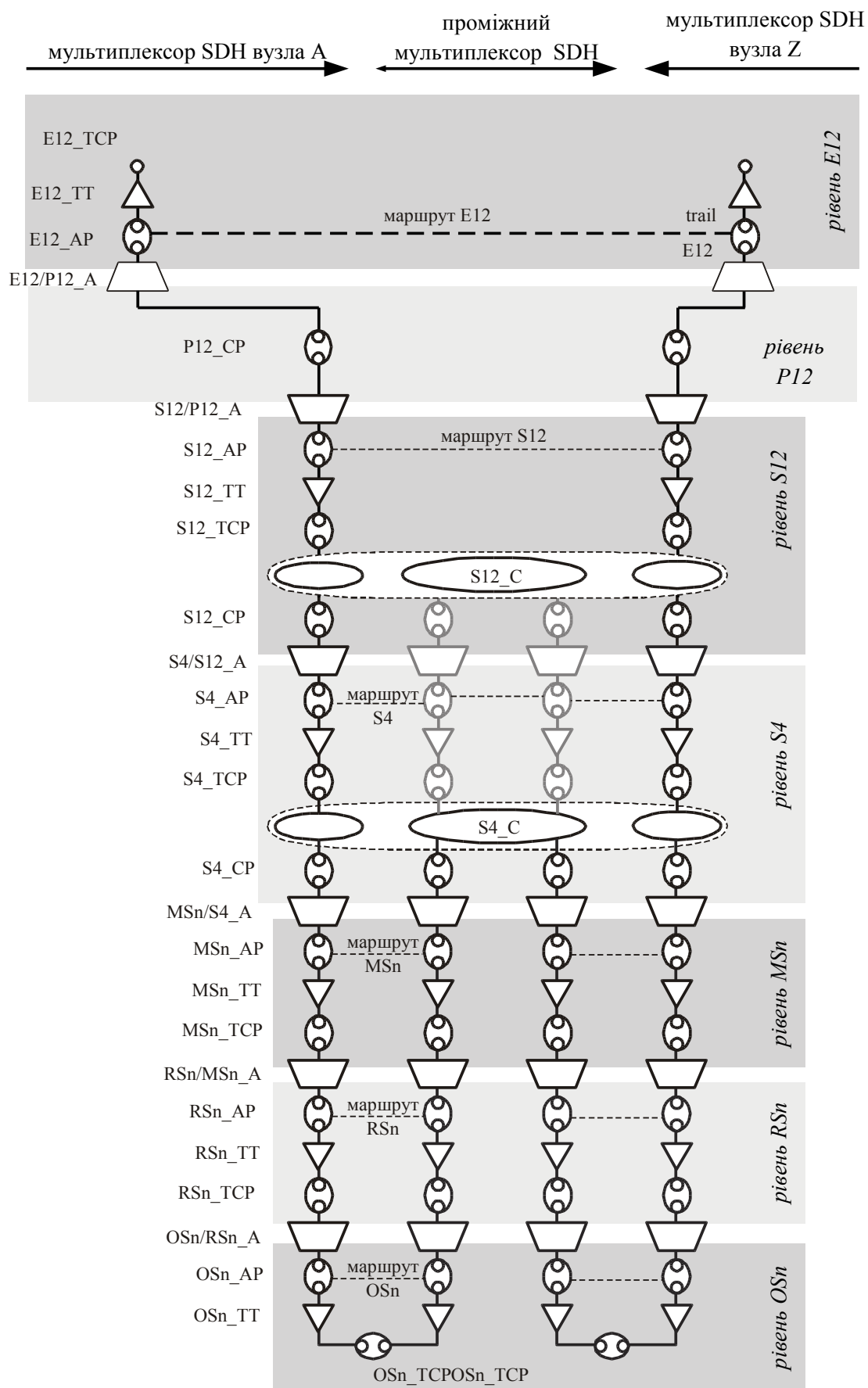


Рисунок 2.5 – Передача потоку PDH по мережі SDH

- 4) наступний рівень S4 служить для організації тракту SDH верхнього рівня;
- 5) рівень MSn служить для організації мультиплексної секції SDH;
- 6) рівень RSn служить для організації регенераційної секції SDH;
- 7) рівень OSn служить для організації оптичної секції SDH, тобто для транспортування оптичного сигналу по середовищу розповсюдження (волокну).

У розглянутому прикладі в мережних вузлах A і Z є два мультиплексори SDH з портами E12 на трибутарній стороні PDH і портами OSn на лінійній стороні SDH. Останні за допомогою оптичних волокон приєднані до відповідних лінійних портів проміжного мультиплексора SDH, який виконує крос-комутацію в тракті S12. Даний рисунок містить назви всіх елементарних функцій:

- *закінчення*, <назва рівня>_ТТ;
- *адаптації*, <рівень серверу>/<рівень клієнта>_А;
- *з'єднання*, <назва рівня>_С,

і еталонних точок:

- *доступу*, <назва рівня>_АР;
- *закінчення маршруту*, <назва рівня>_ТСР;
- *з'єднання*, <назва рівня>_СР.

Точки доступу є закінченнями маршруту. Маршрут S12 починається у вузлі А і закінчується у вузлі Z. Маршрут S4 проходить між точками доступу, асоційованими з функцією S4_ТТ.

3 Технологія NG-SDH

3.1 Організація транспортування пакетного трафіка у системах NG-SDH

Стратегія розвитку сучасних телекомунікацій передбачає еволюційний перехід до мереж з асинхронним (пакетним) режимом передачі. Системи SDH нового покоління (New Generation SDH, NG-SDH) дозволяють транспортувати трафік двох типів: традиційний ЧПК (потoki Ex/Tx/Sx) і пакетний. Необхідно відзначити, що технологія NG-SDH не є окремим класом систем передачі, а лише допускає використання обладнання SDH, яке функціонує згідно з новими Рекомендаціями ITU (G.707 та інших). Для можливості транспортування пакетного трафіка відповідне обладнання має трибутарні інтерфейси Ethernet. Через невисоку пропускну здатність систем NG-SDH, їх використання доцільно в наступних випадках:

- 1) побудова нових мереж доступу;
- 2) модернізація існуючих транспортних мереж SDH.

Схема організації зв'язку модернізованої мережі з використанням технології NG-SDH показана на рис. 3.1.

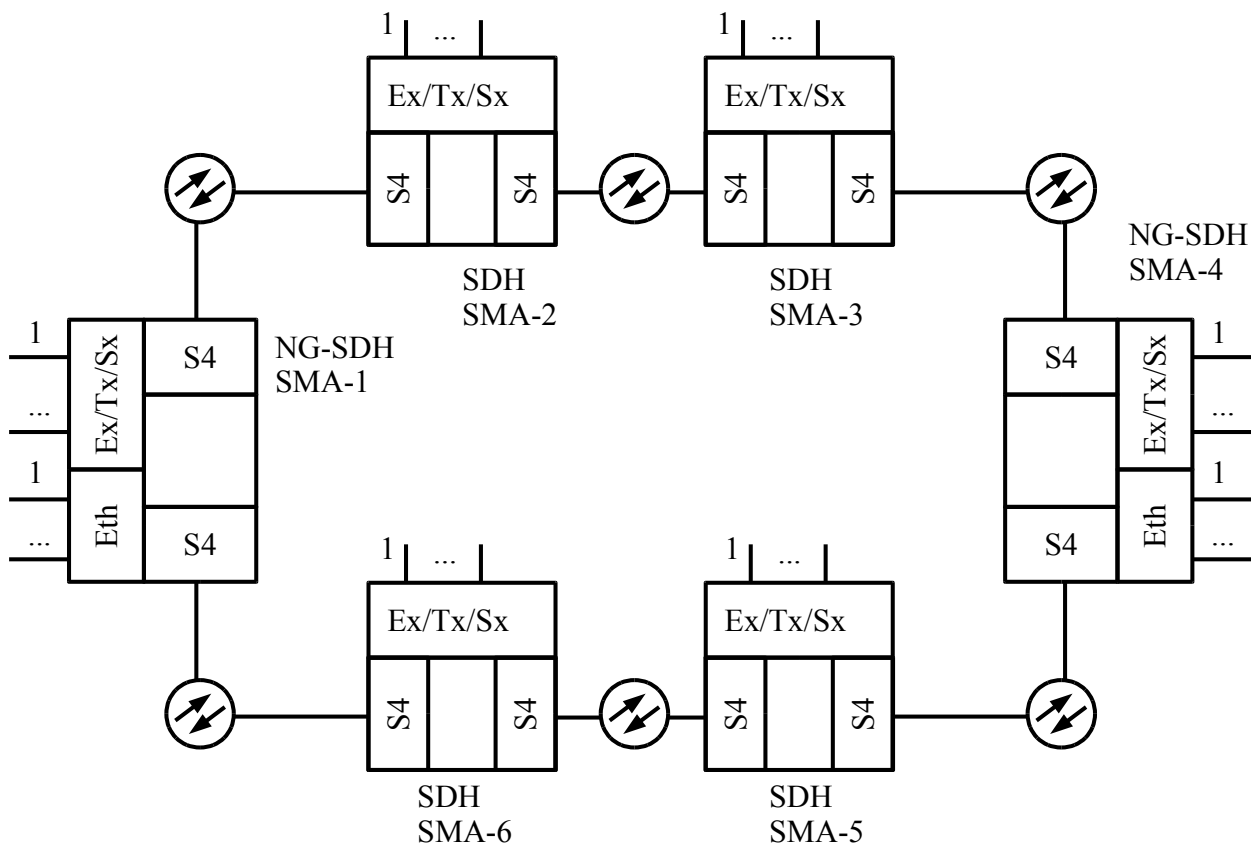


Рисунок 3.1 – Схема організації зв'язку модернізованої мережі NG-SDH

Для організації каналу передачі Ethernet трафіка між MB-1 та MB-4 проведена заміна відповідних мультиплексорів на NG-SDH, а обладнання вузлів № 2, 3, 5 і 6 залишається без змін. Такий підхід дозволяє підвищити техніко-економічну ефективність і скоротити строк проведення модернізації.

Надана схема дозволяє пропонувати наступні узагальнені вимоги до систем NG-SDH:

- 1) максимально повна сумісність інформаційних структур NG-SDH та SDH для можливості використання у сукупності із застарілим обладнанням;
- 2) ефективна організація каналів передавання пакетного трафіка в циклі STM-N.

В табл. 3.1 наданий основний перелік технологій пакетного транспорту, актуальний для NGN. Найбільш актуальним на даний момент є завдання з транспортування трибутарного трафіка Ethernet шляхом використання STM рівнів 1,4 або 16. Використання технології NG-SDH для передавання трафіка Fibre Channel і FICON недоцільно через необхідність використання STM-16 і вище.

Таблиця 3.1 – Основні технології пакетного транспорту NGN

Технологія	Інформаційна швидкість передавання	Примітка
Ethernet	10 Мбіт/с	можлива передача в STM-1
Fast Ethernet	100 Мбіт/с	
Gigabit Ethernet	1000 Мбіт/с	можлива передача в STM-16
Fibre Channel	100, 200, 400, 1000 Мбайт/с	-
ESCON	до 17 Мбайт/с	можлива передача в STM-4
FICON	1, 2, 4, 8 та 16 Гбіт/с	-

З урахуванням першої вимоги до систем NG-SDH, можливі наступні варіанти упаковки пакетного трафіка IP/Ethernet у стандартні інформаційні структури SDH (рис. 3.2):

- 1) IP → Ethernet → VC-11/12 → VC-3/4 → STM-N;
- 2) IP → Ethernet → VC-4 → STM-N;
- 3) IP → Ethernet → STM-N.

Розрахуємо ефективність організації цифрових каналів за допомогою наступного завдання.

Завдання 2.1. Розрахувати ефективність використання пропускної здатності цифрового каналу для випадку упакування трафіка Fast Ethernet або GbE безпосередньо в STM-N (варіант № 3 згідно з рис. 3.2).

Розв'язок.

Розглянемо спочатку передавання трафіка Fast Ethernet. Згідно з табл. 3.1 для передавання потоку 100 Мбіт/с досить використати STM-1. Надалі під ефективністю будемо розуміти відношення інформаційної швидкості вхідного потоку $V_{\text{інф}}$ до пропускної здатності цифрового каналу $V_{\text{кан}}$, який використовується для його передавання:

$$\eta \frac{B_{\text{інф}}}{B_{\text{кан}}} \times 100\% \quad (3.1)$$

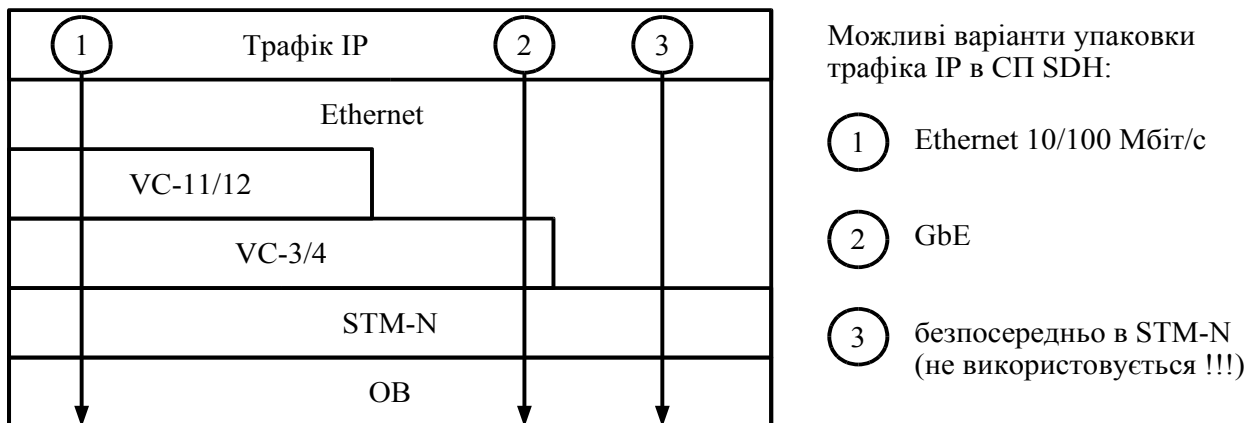


Рисунок 3.2 – Варіанти інкапсуляції пакетного трафіка IP/Ethernet в інформаційні структури SDH

Розрахуємо пропускну здатність області корисного навантаження STM-1 (С-4 розміром 260×9 байт):

$$B_{\text{кан1}} = 260 \times 9 \times 8 \times 8 = 149760 \text{ кбіт/с.}$$

Тепер можна розрахувати ефективність використання каналу:

$$\eta_1 = \frac{100 \cdot 10^6}{149,76 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 66,77\%.$$

Перейдемо тепер до розгляду транспортування потоку Gigabit Ethernet. Для розв'язання поставленого завдання необхідно використовувати STM-16:

$$B_{\text{кан2}} = 16 \times (260 \times 9) \times 8 \times 8 = 2396160 \text{ кбіт/с;}$$

$$\eta_2 = \frac{1000 \cdot 10^6}{2,396160 \cdot 10^9} \cdot 100\% = 41,73\%.$$

Висновки. Отримані результати $\eta_1 = 66,77\%$ і $\eta_2 = 41,73\%$ вказують на досить низьку ефективність використання каналу. Наприклад, передавання потоку Fast Ethernet в STM-1 супроводжується невикористанням пропускну здатності каналу в $149,76 - 100 = 49,76$ Мбіт/с, що еквівалентно $49,76/2,048 \approx 24$ потокам Е1. Тому у сучасних системах NG-SDH використовуються механізми конкатенації інформаційних структур для організації каналів передавання трафіка з необхідною пропускну здатністю (варіанти № 1 і 2 згідно з рис. 3.2).

З урахуванням асинхронного характеру вхідного сигналу, у системах NG-SDH необхідно виконувати наступні операції (рис. 3.3):

1) *попередня оброблення трибутарного сигналу* з метою наступного "прозорого" його передавання по організованому синхронному каналу зв'язку;

2) узгодження швидкостей вхідного сигналу і каналу зв'язку, оскільки $B_{\text{інф}} \leq B_{\text{кан}}$.

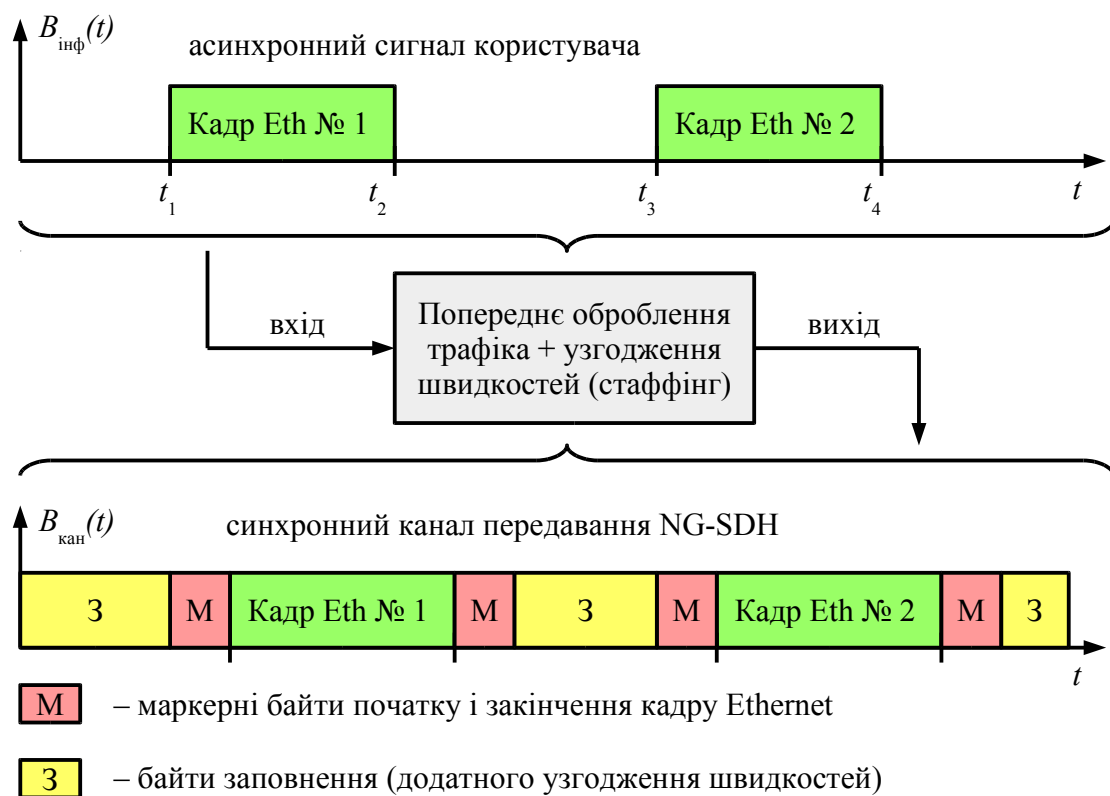


Рисунок 3.3 – Передавання асинхронного сигналу користувача по синхронному каналу передачі

Попереднє оброблення (адаптація) трибутарного сигналу виконується з метою формування інформаційних структур з таким форматом, який спростить їхнє оброблення в приймачі. Із цією метою в каналний сигнал вводяться *маркерні байти* для позначки моментів часу початку і закінчення вхідних інформаційних структур (кадрів Ethernet на рис. 3.3). Маркерні байти мають заздалегідь установлене фіксоване значення (наприклад, 0x7E для процедури HDLC) і виконують функцію, аналогічну сигналу циклової синхронізації систем ЧРК.

Оскільки пропускна здатність синхронного каналу передавання пакетного трафіка $B_{\text{кан}}$ дещо перевищує інформаційну швидкість вхідного сигналу $B_{\text{інф}}$, необхідно виконувати *операцію однобічного узгодження швидкостей*. Із цією метою в інтервалах часу між сусідніми вхідними інформаційними структурами трибутарного сигналу розміщуються *байти заповнення*, що виконують роль *баластних символів позитивного узгодження швидкостей*.

Перераховані вище операції, що виконуються в мультиплексорі NG-SDH та варіанти їх реалізації показані на рис. 3.4. На рис. 3.5 показана структурна схема мультиплексора введення-виведення NG-SDH із зазначенням відповідних Рекомендацій ITU з функціонування відповідних логічних блоків.

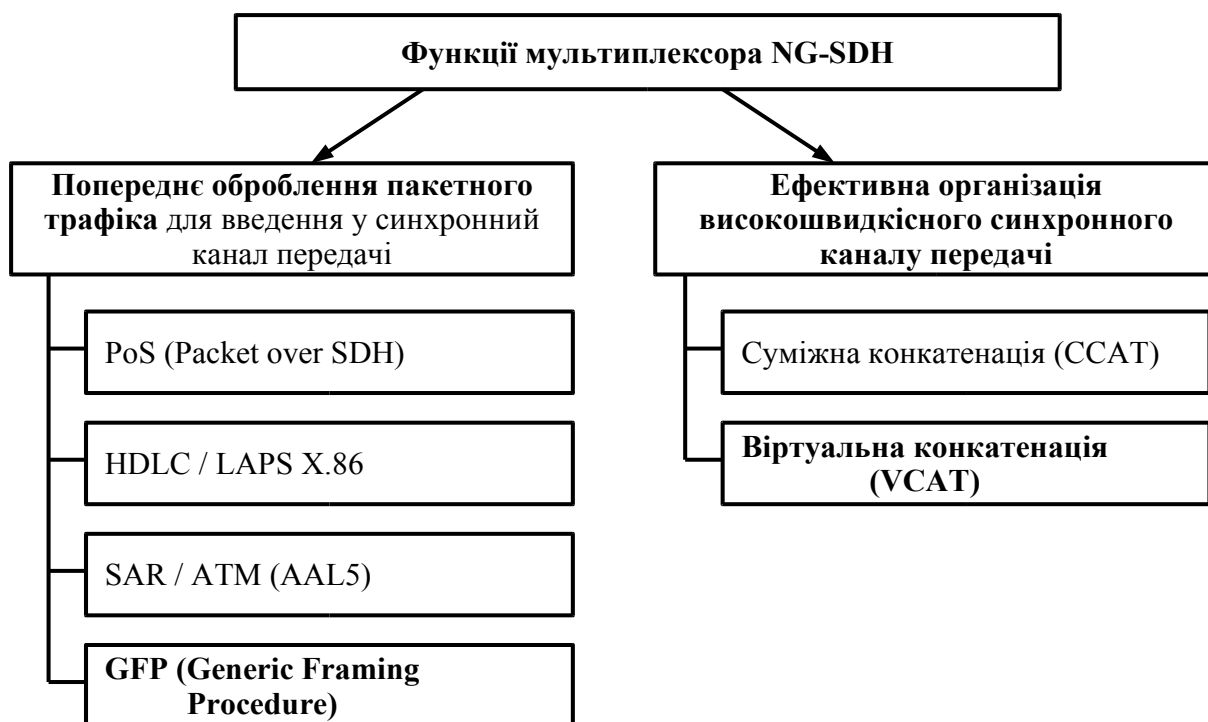


Рисунок 3.4 – Функції мультиплексора NG-SDH при транспортуванні пакетного трафіка

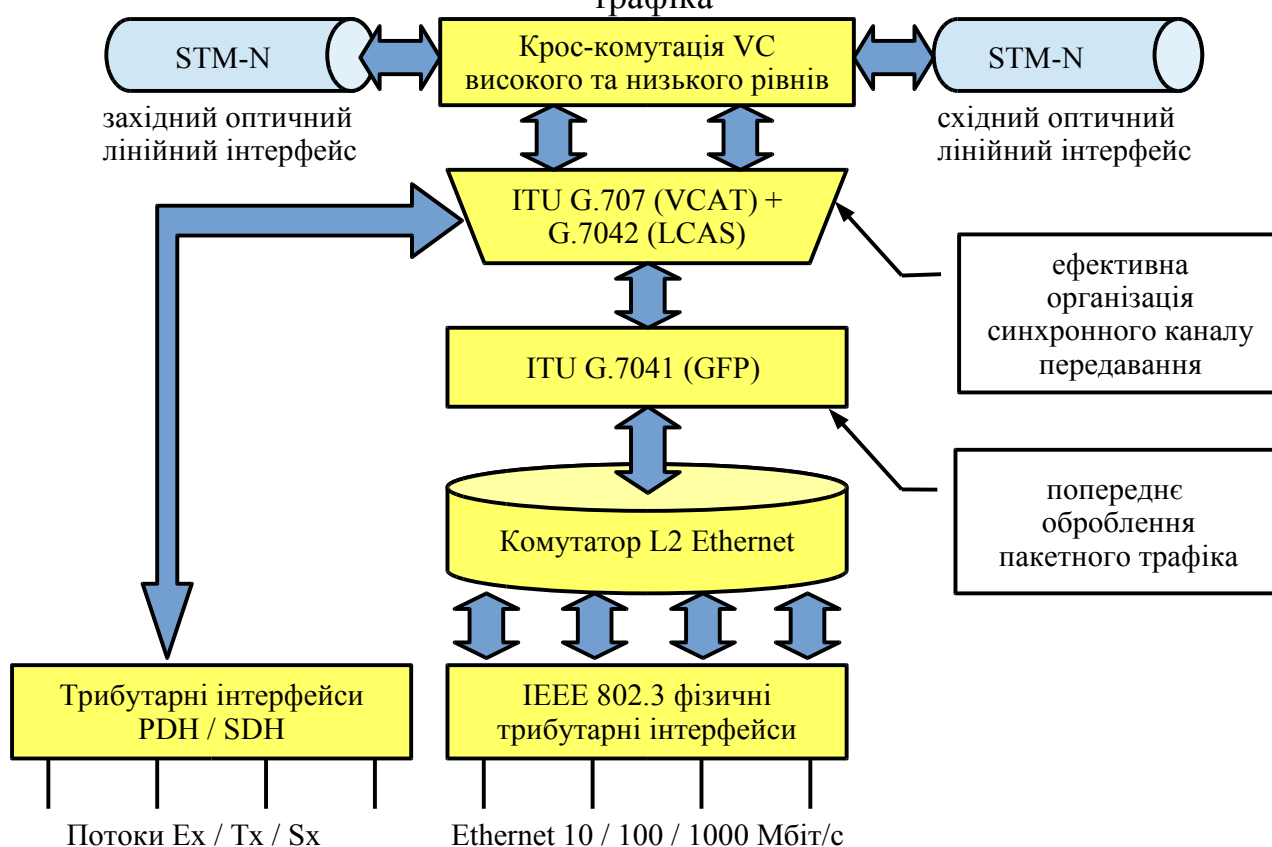


Рисунок 3.5 – Структурна схема мультиплексора NG-SDH

3.2 Узагальнена процедура формування кадрів GFP. Типи і структура кадрів

Попереднє оброблення вхідного трафіка необхідне для спрощення процедури приймання інформаційних структур, що передаються по синхронному каналу. Згідно з рис. 3.4 для виконання вказаного завдання передбачається використання одного з наступних методів:

- 1) процедура пакетування поверх SDH (Packet over SDH, PoS);
- 2) процедура доступу до ланки передачі SDH (LAPS/X.86);
- 3) проміжного упакування трафіка користувача в чарунки ATM (AAL/5);
- 4) узагальнена процедура формування кадрів (Generic Framing procedure, GFP).

У сучасній апаратурі найбільшого поширення отримала процедура GFP.

Узагальнена процедура формування кадрів (GFP) служить для інкапсуляції вхідних інформаційних структур зі змінною довжиною з метою наступного передавання через мережі SDH, PDH і OTN (Рек. ITU G.707, G.8040 і G.709). Упакування здійснюється в проміжні інформаційні структури – *кадри GFP*. Згідно з Рекомендацією ITU G.7041 визначено два типи кадрів:

- 1) *інформаційні* для інкапсуляції трафіка користувача;
- 2) *керуючі*, до складу яких згідно з поточною Рекомендацією ITU входять тільки *порожні* (idle) кадри, що містять байти заповнення (див. рис. 3.3).

GFP є основним механізмом для адаптації високорівневого трафіка користувача до технології транспортної мережі. До кадру GFP можливо інкапсулювати всі існуючі типи пакетних інформаційних структур:

- 1) кадри Ethernet / MPLS;
- 2) пакети IP;
- 3) цифровий потік, що складається із блоків даних з постійною швидкістю;
- 4) хмарно-орієнтований трафік ESCON, SBCON / FICON та ін.

Алгоритм GFP передбачає оброблення трафіка у два етапи відповідно на *рівні адаптації* (GFP client-specific source adaptation process) і *загальному рівні* (GFP common process) згідно з архітектурою клієнт-сервер (рис. 3.6).

Рівень адаптації служить для інкапсуляції трафіка користувача в поле корисного навантаження кадру GFP і має *два режими роботи*:

- 1) *відображення пакетів* (frame-mapped, GFP-F), за якого кожний окремо прийнятий пакет інкапсулюється до одного кадру GFP;
- 2) *прозорий* (transparent GFP), за якого вхідний потік символів сигналу користувача (закодованих блоковим кодом nBmB, наприклад, 8B10B), декодується, розміщується в кадрі GFP з постійною довжиною і негайно передається без затримки на очікування приймання всього вхідного пакета.

Розміщення кадрів GFP в VC-N SDH і ODUk OTN виконується згідно з Рекомендаціями ITU-T G.707 і G.709 відповідно.

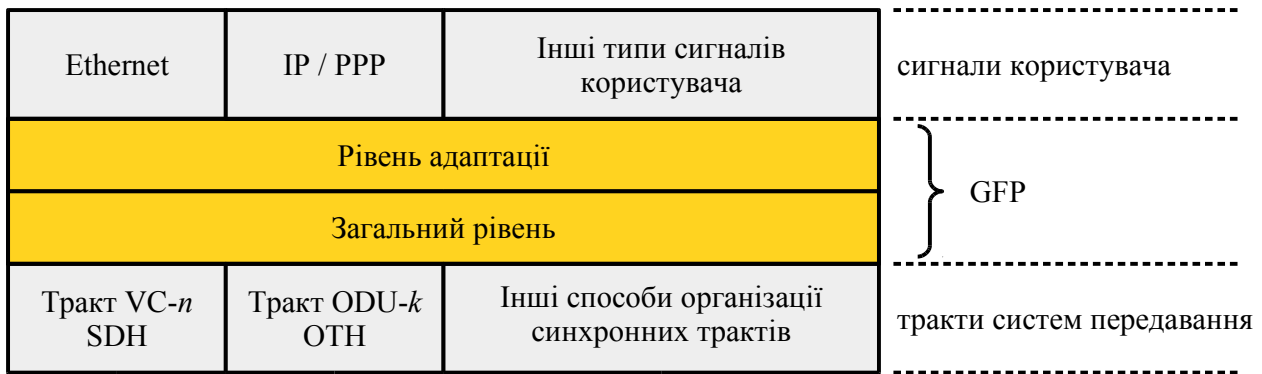


Рисунок 3.6 – Ієрархія рівнів GFP

Загальний рівень служить для передавання, приймання та оброблення кадрів GFP. Взаємодія GFP з обладнанням транспортної мережі показана на рис. 3.7.

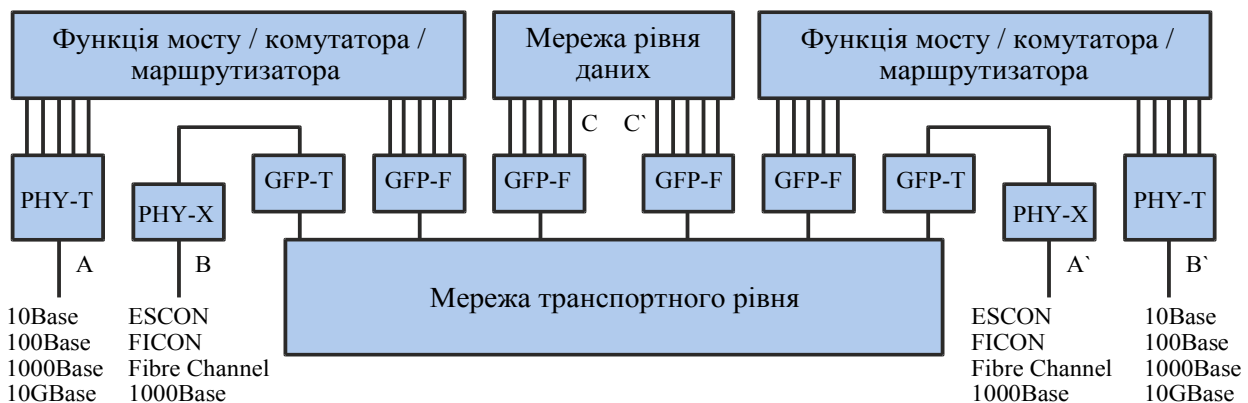


Рисунок 3.7 – Функціональна модель GFP

Розглянемо спочатку формат *інформаційного кадру GFP*. Він складається (рис. 3.8) із двох основних частин – *основного заголовка* (Core Header) і *області корисного навантаження* (Payload Area). *Основний заголовок* складається із двох груп байтів:

1) *вказівник довжини області корисного навантаження* (Payload Length Indicator, PLI) довжиною в 16 біт (2 байта). Мінімальне значення PLI для інформаційного кадру складає 4 байта. Значення PLI = 0–3 зарезервовані для керуючих кадрів;

2) *поле контрольної суми заголовка* (Core Header Error Control, cHEC), у якому передається CRC-16 для захисту вмісту основного заголовка. Застосований поліном $G = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ за значенням байтів PLI дозволяє виправляти однократні і знаходити багатократні помилки.

Для балансування за постійною складовою основний заголовок скремблюється шляхом підсумовування за модулем 2 з константою 0xb6AB31E0.

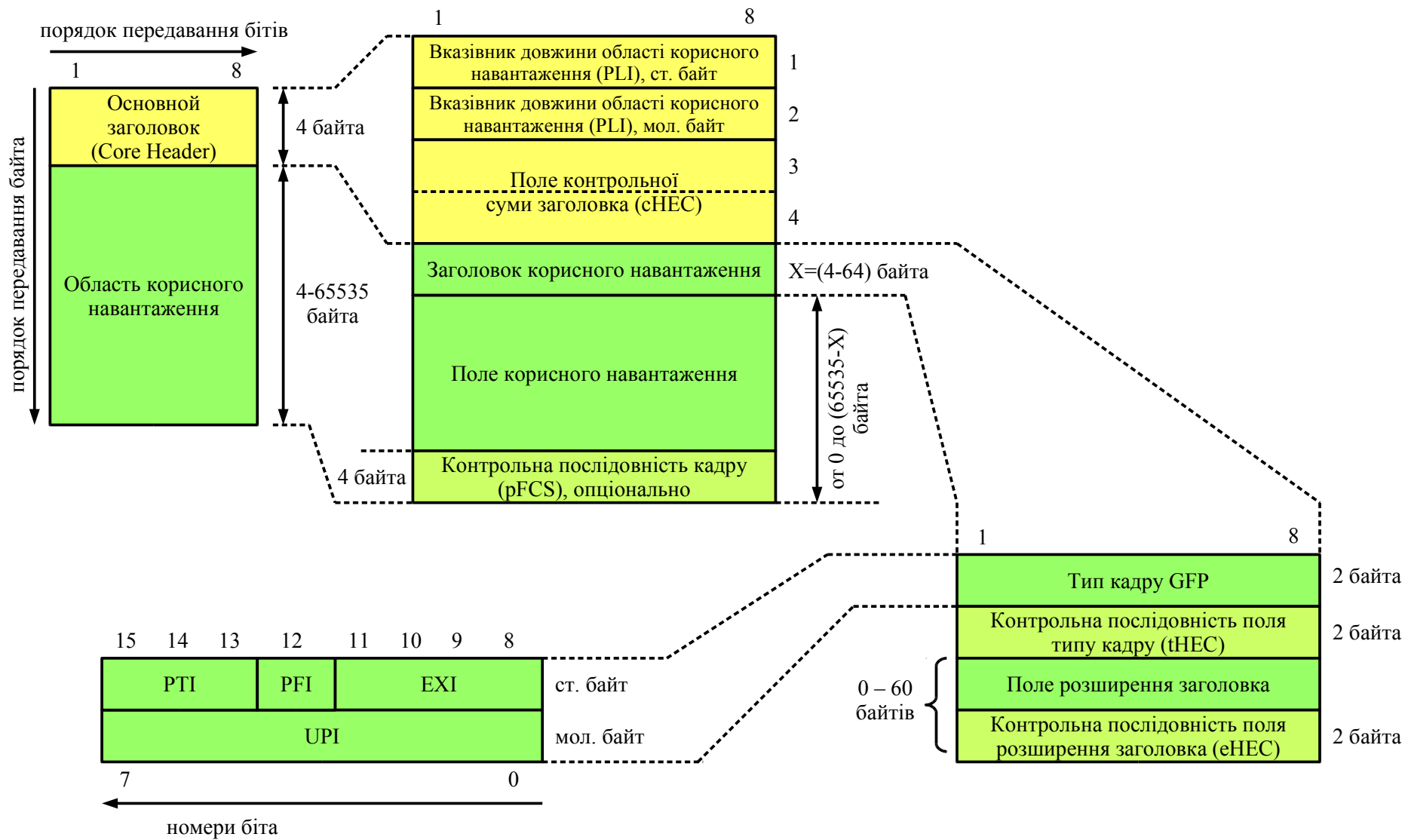


Рисунок 3.8 – Структура кадру GFP

Область корисного навантаження кадру GFP служить для передавання інформації протоколу більш високого рівня і має змінну довжину 4 – 65535 байт. Складається із двох стандартних частин: заголовок корисного навантаження (Payload header) і поля корисного навантаження (Payload information field). Необов'язкове поле контрольної суми CRC-32 корисного навантаження (Payload frame check sequence, pfcs) використовується для контролю вірогідності передавання по каналу без розриву зв'язку.

Поле корисного навантаження містить одну повну інформаційну структуру вхідного трафіка (GFP-F) або фрагмент трибутарного потоку (GFP-T).

У свою чергу, заголовок корисного навантаження GFP складається з наступних чотирьох складових:

1) *поле типу кадру GFP* (2 байта) служить для передавання інформації про інформаційне наповнення та формат області корисного навантаження GFP.

Це поле містить інформацію про тип кадру GFP (інформаційний або керуючий), а також тип послуги, що надається мультисервісною платформою. Далі розглянемо призначення кожної із чотирьох груп байт PTI, PFI, EXI і UPI згідно з рис. 3.8.

Ідентифікатор типу кадру (Payload type identifier, PTI) служить для вказівки на один із чотирьох типів кадру GFP згідно з табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Кодові слова PTI

PTI (біти <15:13>)	Тип кадру
000	інформаційний (трафік користувача)
100	керуючий (обслуговування користувача)
101	керуючий (керування передаванням)
інші	зарезервоване

Індикатор FCS області корисного навантаження (Payload FCS indicator, PFI) показує наявність (PFI=1) або відсутність (PFI=0) поля pFCS.

Ідентифікатор розширення заголовка (Extension header identifier, EXI) служить для вказівки на наявність типу поля розширення заголовка. Поточна рекомендація ITU G.7041 описує три типи даного поля: *заголовок нульової довжини* (EXI=0000), *лінійне розширення заголовка* (EXI=0001) і *колове розширення заголовка* (EXI=0010).

Ідентифікатор даних користувача (User payload identifier, UPI) є 8-бітним полем для вказівки на тип трафіка, розміщеного в полі корисного навантаження кадру GFP. Значення кодових слів UPI для розповсюджених типів трафіка показані в табл. 3.3.

2) *Контрольна сума поля типу* (Type HEC field, tHEC) є 2-байтовим кодовим словом (CRC-16) для захисту вмісту поля типу кадру від помилок. Алгоритм формування аналогічний полю cHEC.

3) *Поле розширення заголовка* (payload extension header) має довжину від 0 до 60 байт (включаючи поле eHEC) і служить для передавання додаткових

заголовків технології, трафік якої інкапсульований в поле корисного навантаження, наприклад:

- ідентифікатор віртуального шляху;
- адреси джерела і одержувача;
- класу послуги і т.д.

У сучасних системах передачі для організації з'єднання "точка-точка" використовується лінійне поле розширення заголовка. У цьому випадку в одному високошвидкісному тракті передаються сигнали кількох незалежних потоків даних. Кожний з них маркується окремим 8-бітовим ідентифікатором, що дозволяє агрегувати до 256 каналів (потоків кадрів GFP) в один транспортний потік в точці закінчення маршруту GFP.

4) *Контрольна сума поля розширення заголовка* (Extension HEC field, eHEC) містить кодову комбінацію CRC-16 для виявлення та корекції помилок у полі розширення заголовка. Алгоритм формування аналогічний полю cHEC.

Таблиця 3.3 – Кодові слова поля UPI для основних типів трафіка

Значення поля UPI	Навантаження в полі корисного навантаження GFP
0000 0000; 1111 1111	Зарезервовано
0000 0001	Кадри Ethernet (GFP-F)
0000 0010	Кадри PPP (GFP-F)
0000 0110	Потік Gbit Ethernet (GFP-T)
0000 1101	Кадри MPLS unicast (GFP-F)
0001 0000	Пакети IPv4 (GFP-F)
0001 0001	Пакети IPv6 (GFP-F)

Іншим типом кадрів GFP є керуючі кадри. На даний момент рекомендація ITU G.7041 визначає лише один формат такого кадру – *порожній* (idle frame). Згідно зі стандартною структурою кадру GFP (рис. 3.8), він є виродженим варіантом інформаційного кадру, що має область корисного навантаження нульової довжини. Цей тип кадру використовується для узгодження швидкостей вхідного сигналу та каналу зв'язку. Таким чином, він містить (рис. 3.9) лише чотири байти основного заголовка з нульовими значеннями, оскільки РТІ=0x0000 відповідає контрольна сума cHEC=0x0000. В дужках показані значення байт після скремблювання.

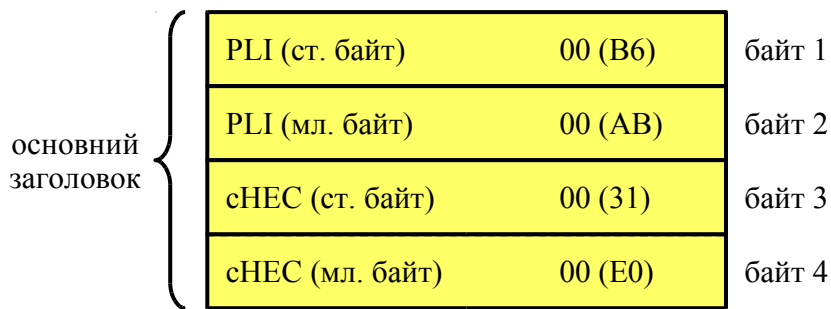


Рисунок 3.9 – Формат керуючого (порожнього) кадру GFP

3.3 Формування кадрів GFP-F та GFP-T

На *рівні адаптації* GFP відбувається обробка сигналу за алгоритмом, що залежить від формату вхідного сигналу. Структура кадрів GFP при цьому зберігається однаковою. Рекомендацією ITU G.7041 встановлюється дві групи таких алгоритмів - GFP-F і GFP-T. Розглянемо спочатку першу групу.

Режим відображення пакетів (frame-mapped, GFP-F) передбачає сегментацію вхідного потоку на окремі інформаційні структури (кадри Ethernet/MPLS, пакети IP і т.п.), упакування кожної з них до окремого кадру GFP з наступним транспортуванням по відповідному тракту системи передачі.

Найбільш простим варіантом роботи рівня адаптації є інкапсуляція вхідних пакетів IP, кадрів HDLC / PPP до кадру GFP-F (рис. 3.10).

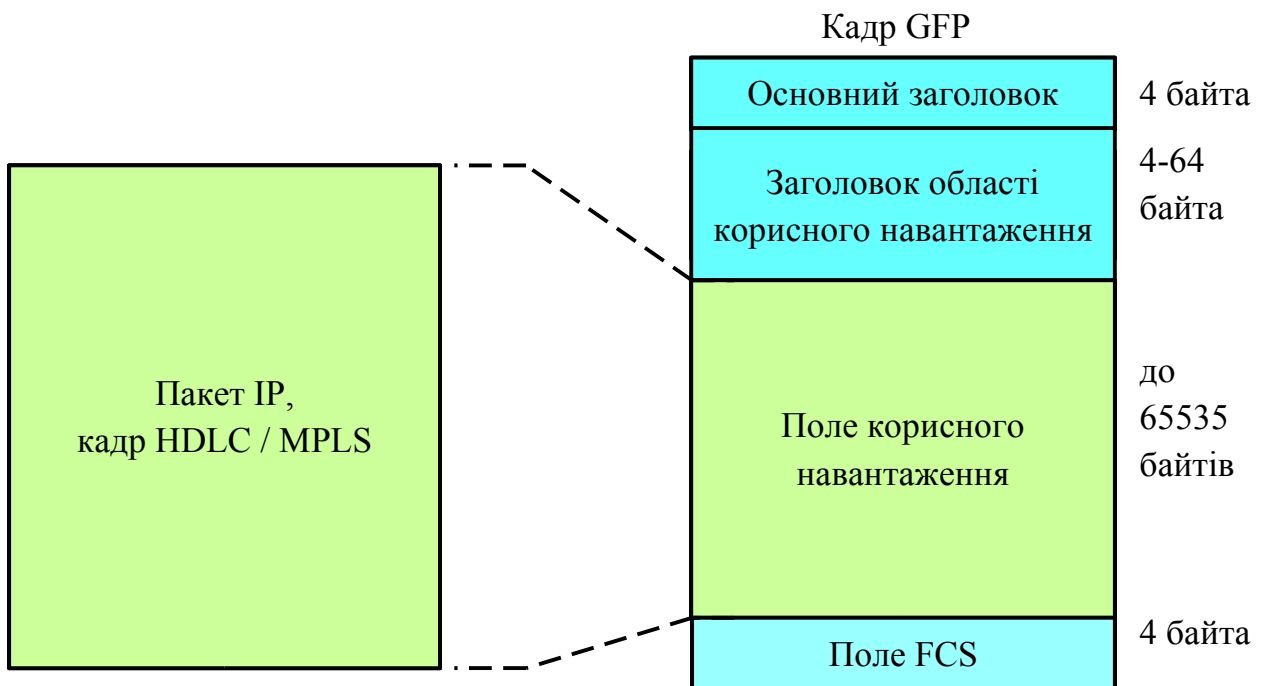


Рисунок 3.10 – Формування кадру GFP-F з пакетів IPv4, IPv6 та кадрів MPLS

Упакування кадрів Ethernet відбувається трохи складніше, оскільки їх структура згідно зі стандартом IEEE 802.3 передбачає наявність преамбули і початкового обмежувача (рис. 3.11). Преамбула складається із 7 байтів

фіксованого значення 10101010 і служить для приведення трансивера Ethernet до стану стійкої синхронізації з прийнятим тактовим сигналом. Початковий обмежувач кадру містить один байт типу 10101011 і є індикатором закінчення синхронізуючої послідовності, що розташована на початку кадру Ethernet. У тракті приймання з поля корисного навантаження кадру GFP вилучається інформаційна частина кадру Ethernet, після чого до неї додаються байти преамбули і початкового обмежувача.

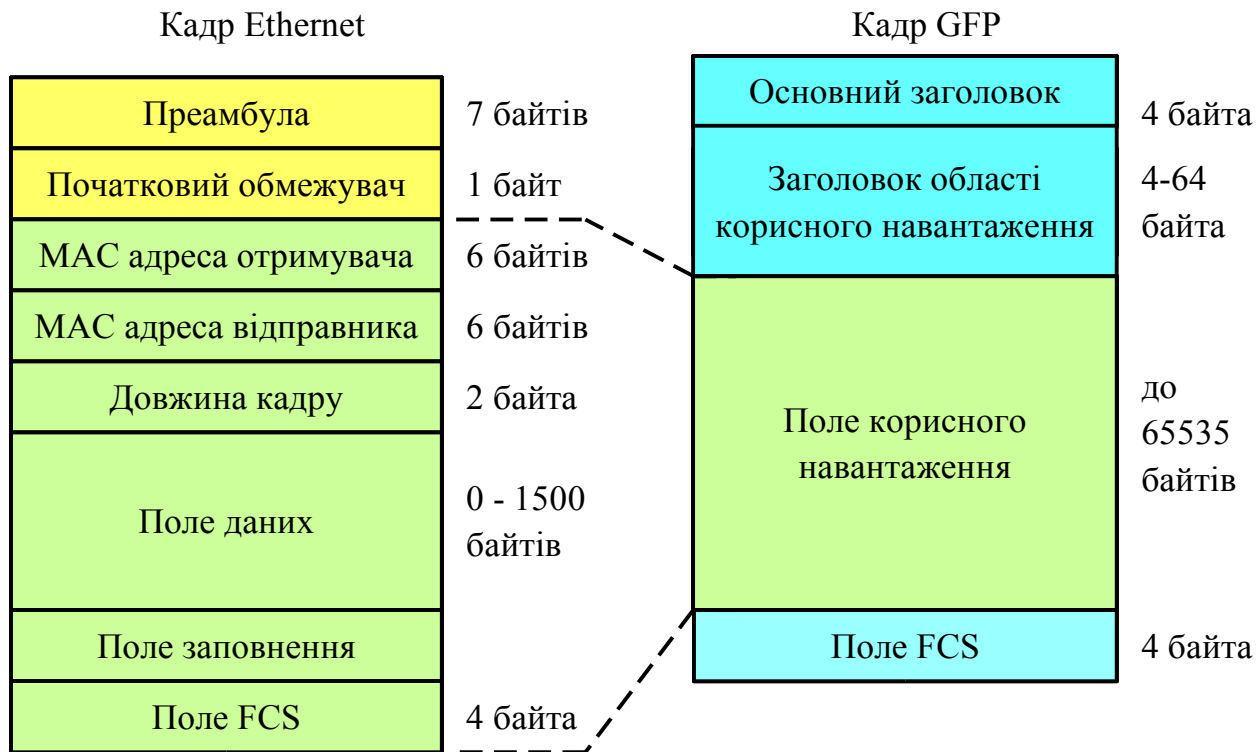


Рисунок 3.11 – Формування кадру GFP-F з кадрів Ethernet

Режим відображення *GFP-T* оптимізований для прозорості передачі з мінімальною затримкою високошвидкісних сигналів користувача, закодованих блоковим кодом *nBmB*. На відміну від покадрового режиму передачі *GFP-F*, даний режим припускає оброблення вхідного сигналу на фізичному рівні і вимагає менших обчислювальних ресурсів.

На фізичному рівні сигнал Gigabit Ethernet, ESCON, SBCON, Fiber Channel або FICON складається з тактових інтервалів, організованих в 10-бітові кодові слова коду *8B10B*. Кожне слово містить 8 інформаційних біт і 2 біта контролю вірогідності передачі. Алгоритм формування кадрів *GFP-T* можна подати у вигляді наступних чотирьох етапів (рис. 3.12):

- 1) декодування вхідного сигналу *8B10B* для усунення наявної надмірності в 25%;
- 2) формування блоків коду *64B65B*, кожний з яких містить по 8 інформаційних байтів і 1 службовий біт L_x ($x=1,2 \dots 8$);

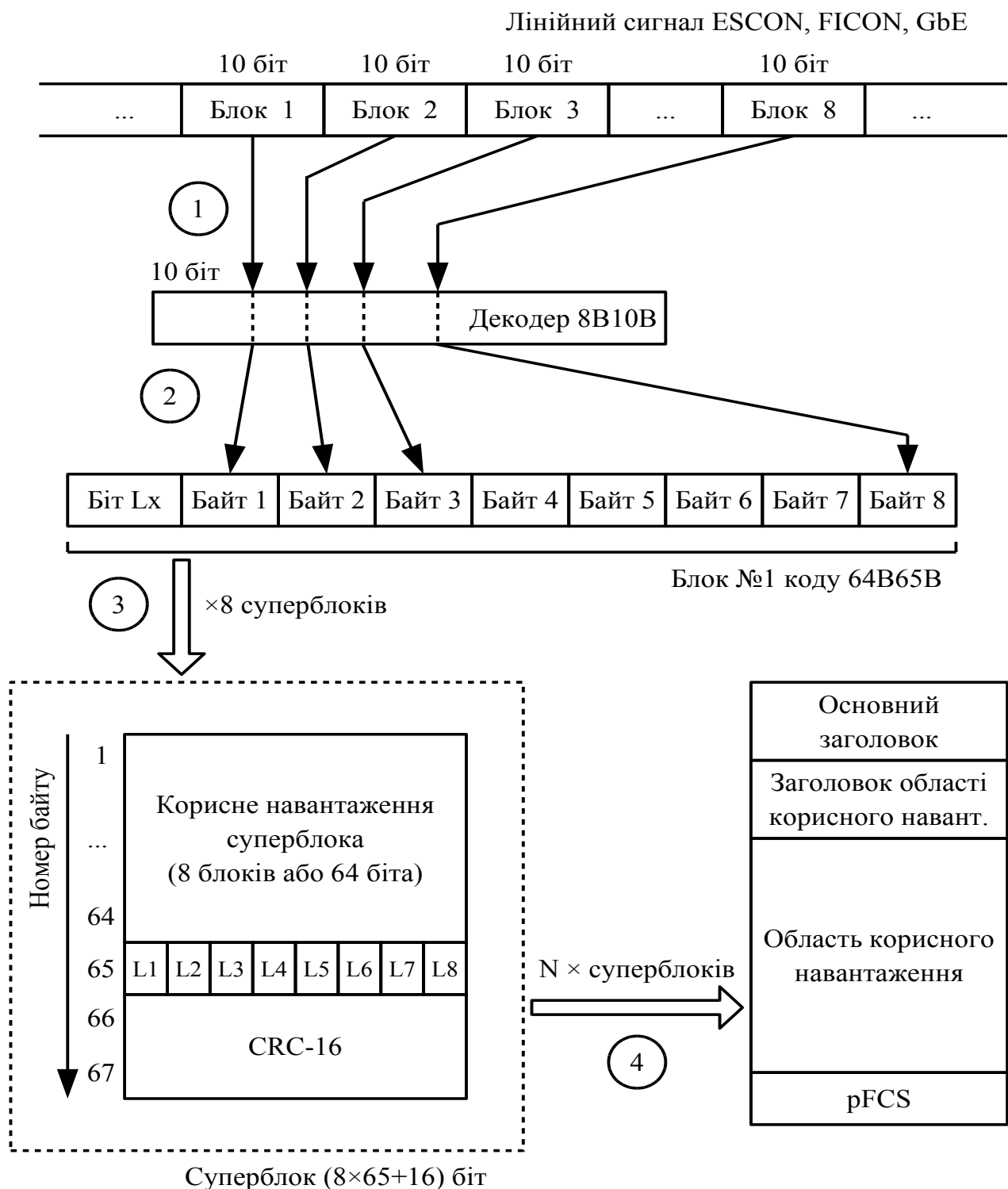


Рисунок 3.12 – Формування кадру GFP-F з лінійного сигналу Ethernet

3) об'єднання 8 блоків коду 64B65V в один суперблок, що складається з 67 байтів. Перші 64 байта є інформаційними, байт 65 містить службові біти Lx. Останні два байти містять контрольну суму суперблока CRC-16;

4) розміщення суперблоків у полі корисного навантаження кадру GFP. За відсутності поля розширення заголовка та pFCS, кількість біт кадру GFP можливо розрахувати за формулою:

$$N_{\text{біт}} = 8 \times 8 + N_{\text{спб}} \times (8 \times 65 + 16) \quad (3.2)$$

Кількість суперблоків повинна бути достатньою, щоб по каналу зв'язку також забезпечити транспортування байтів заголовка кадрів GFP. Інакше кажучи, пропускна здатність каналу зв'язки повинна бути більше швидкості вхідного потоку користувачських даних на величину деякого запасу $B_{\text{зап}}(N_{\text{спб}})$:

$$B_{\text{зап}}(N) = B_{\text{кан мін}} \times \frac{N_{\text{к інф}}}{N_{\text{к сум}}} - B_{\text{інф макс}}, \quad (3.3)$$

де $B_{\text{кан мін}}$ – мінімальна пропускна здатність каналу передачі кадрів GFP-T;

$B_{\text{інф макс}}$ – максимальна швидкість переданого інформаційного сигналу після декодування блокового лінійного коду (тобто 8B10B);

$N_{\text{к інф}}$ – кількість інформаційних біт у кадрі GFP;

$N_{\text{к сум}}$ – сумарна кількість біт (інформаційних і службових) у кадрі GFP.

Інформаційну ємність кадру GFP можна розрахувати згідно з рис. 3.12:

$$N_{\text{к інф}} = 64 \times 8 = 512 \text{ і } N_{\text{к сум}} = 67 \times 8 = 536.$$

Враховуючи цей вираз, формула (3.3) набуває вигляду:

$$B_{\text{зап}}(N) = \frac{B_{\text{кан мін}} \times 512 \times N}{N_{\text{біт заг}} + 536 \times N} - B_{\text{інф макс}} \quad (3.4)$$

де $N_{\text{біт заг}}$ – кількість біт заголовка кадру GFP.

З цього виразу можна виразити найменше значення N за якого $B_{\text{зап}} > 0$:

$$N_{\text{мін}} = \left\lceil \frac{B_{\text{інф макс}} \times N_{\text{біт заг}}}{512 \times B_{\text{кан мін}} - 536 \times B_{\text{інф макс}}} \right\rceil \quad (3.5)$$

де квадратні дужки означають операцію округлення в бік $+\infty$.

Результати розрахунків $N_{\text{мін}}$ для кадрів GFP без поля розширення заголовка та rFCS надані в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри кадрів GFP для трафіка різного типу

Тип трибутарного сигналу	$B_{\text{інф макс}}$, Мбіт/с	Тип мультиконтейнера	$N_{\text{мін}}$
ESCON	160	VC-3-4v	1
DVB ASI	216	VC-4-2v	1
Fibre channel	425	VC-4-3v	13
Fibre channel/FICON	850	VC-4-6v	13
Gigabit Ethernet	1000	VC-4-7v	95
Fibre channel	1700	VC-4-12v	13
Fibre channel	3400	VC-4-24v	13

3.4 Організація широкосмугових каналів у системах NG-SDH

Раніше було показано, що безпосереднє використання області корисного навантаження синхронного транспортного модуля для створення

широкопasmового каналу з передачі пакетного трафіка є неефективним варіантом. Тому рекомендація ITU-T G.707 дозволяє створювати вищевказаний канал шляхом об'єднання ресурсів (конкатенації) кількох інформаційних структур з низькою пропускнуою здатністю.

Перший варіант об'єднання отримав назву суміжної конкатенації (contiguous concatenation, CAT) і припускає формування (рис. 3.13) мультиконтейнерів типу VC-4-Xc (SDH) або VC-2-Xc (SONET/SDH). На рис. 3.14 показана структура мультиконтейнера типу VC-4-Xc. Він складається зі складеного маршрутного заголовка POH (Path Overhead) розміром $9 \times X$ байт, у якому використовується тільки заголовок першого VC-4 (перший стовпець), а інші $9 \times (X-1)$ байтів у стовбцях з номерами (2-X) використані для фіксованого заповнення розміру. Формоване поле корисного навантаження мультиконтейнеру VC-4-Xc містить $260 \times X$ байт та складається з X побайтово мультимплексованих адміністративних блоків AU-4. Оскільки структура суміжних полів розглядається як єдине ціле, то POH VC-4-Xc передається в першому стовбці мультиконтейнера. Показчик цього AU-4 визначає позицію байта J1 першого VC-4 в мультиконтейнері VC-4-Xc. Швидкості стандартних мультиконтейнерів, створених методом CCAT надані в табл. 3.4.

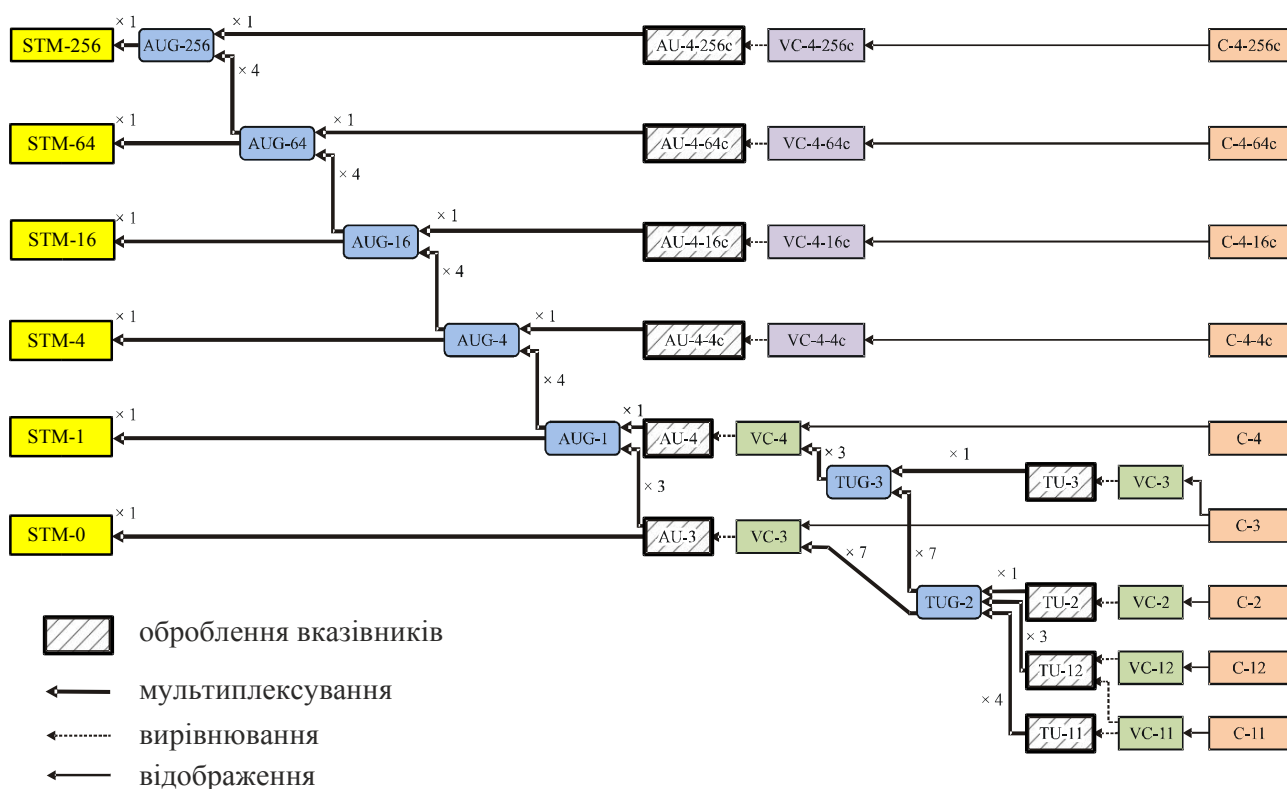


Рисунок 3.13 – Формування STM-N зі стандартних і конкатенованих інформаційних структур

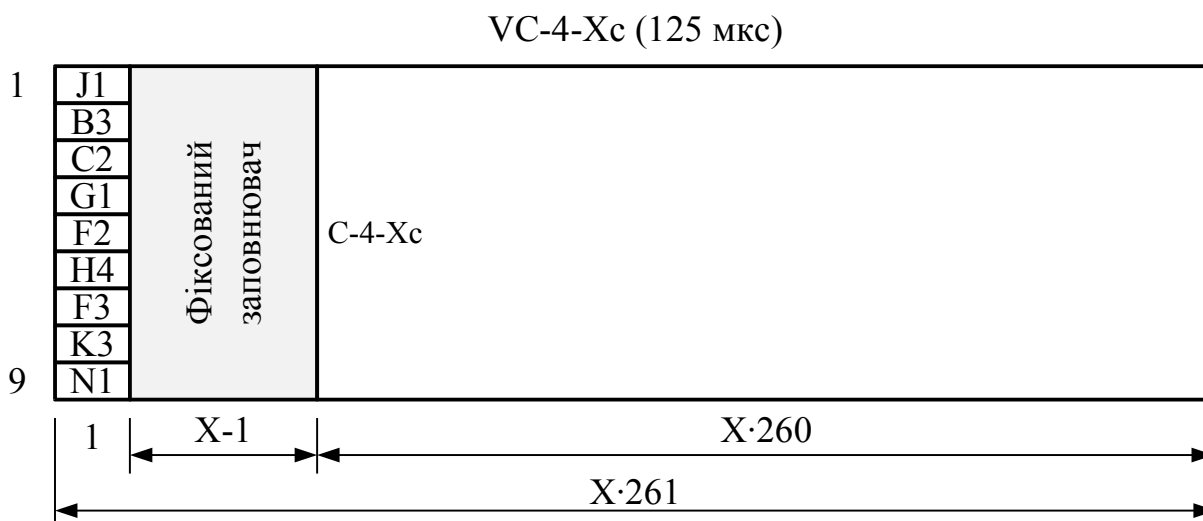


Рисунок 3.14 – Структура мультиконтейнера VC-4-Xc

Таблиця 3.4 – Швидкості мультиконтейнерів за суміжної конкатенації

Рівень STM-N	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
Коефіцієнт X	4	16	64	256
Швидкість VC-4-Xc, Мбіт/с	599,040	2396,160	9584,640	38338,560

Іншим варіантом конкатенації, що найчастіше використовується, є процедура віртуальної конкатенації (Virtual Concatenation, VCAT). Вона дозволяє об'єднувати ресурси всіх типів віртуальних контейнерів (VC-1, VC-2, VC-3 і VC-4) з розширеним діапазоном можливих значень коефіцієнта мультиплексування X. Віртуальна конкатенація оперує ємністю окремих VC-n, транспортує їх окремо та збирає разом до необхідної суміжної ємності тільки в кінцевій точці маршруту. Таким чином, віртуальна конкатенація потребує підтримки функціональності мультиконтейнера тільки в рамках обладнання в точці закінчення маршруту. Суміжна конкатенація вимагає підтримки мультиконтейнера кожним мережним елементом маршруту.

Найбільш простий варіант процедури віртуальної конкатенації передбачає об'єднання ресурсів контейнерів верхнього рівня VC-3 і VC-4. Сформовані віртуальні мультиконтейнери позначаються відповідно VC-3-Xv та VC-4-Xv (рис. 3.15). Факт об'єднання контейнерів в одну загальну інформаційну структуру та номер послідовності передається в байті H4 трактового заголовка VC-3/4.

Згідно з рис. 3.15 можливо розрахувати швидкості передавання одного VC-3 у складі мультиконтейнера VC-3-Xv

$$B_{VC-3} = (9 \times 84) \times 8000 \times 8 = 48,384 \text{ Мбіт/с}$$

та одного VC-4 у складі мультиконтейнера VC-4-Xv

$$B_{VC-4} = (9 \times 260) \times 8000 \times 8 = 149,76 \text{ Мбіт/с.}$$

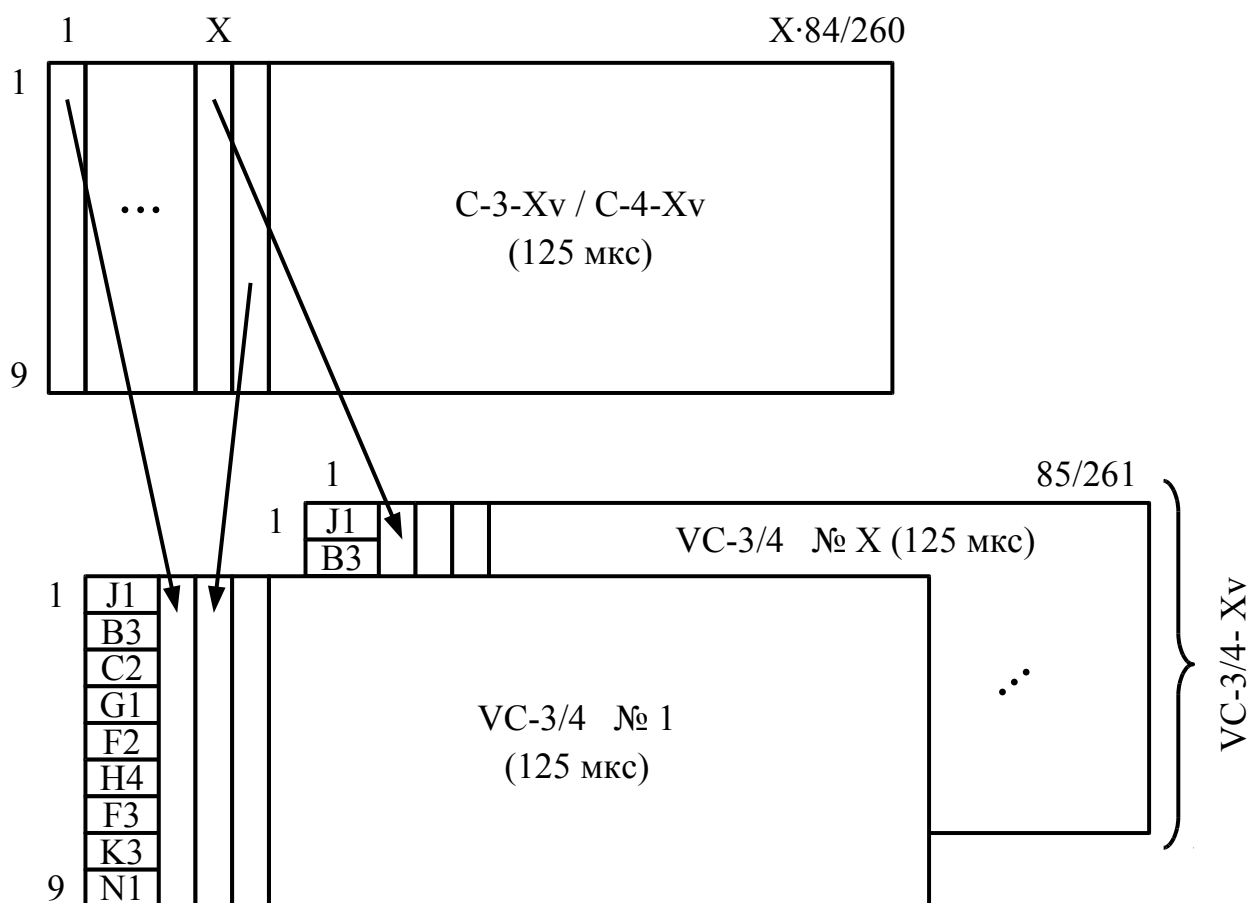


Рисунок 3.15 – Структура віртуального мультиконтейнера верхнього рівня VC-3/4-Xv

Транспортування віртуальних контейнерів, що входять до складу одного мультифрейма по окремих маршрутах приводить до різних затримок їх поширення. Це вимагає компенсації диференційної затримки в точці закінчення маршруту для формування єдиного поля корисного навантаження мультиконтейнера.

Тепер розглянемо формування віртуальних мультифреймів VC-2-Xv, VC-12-Xv та VC-11-Xv з контейнерів нижнього рівня (рис. 3.16). Факт об'єднання та номер у послідовності контейнерів зазначений у байтах V5 і K4 трактового заголовка РОН кожного VC-2/1.

Слід зазначити, що у випадку використання VC-12 для передачі пакетного трафіка, використовуються всі 34 байта області корисного навантаження C-12. З урахуванням об'єднання послідовності із чотирьох VC-12 в один мультиконтейнер тривалістю 500 мкс, пропускна здатність одного VC-12 складає:

$$B_{VC-12} = (1 \times 34) \times 8 \times 8000 / 4 = 2,176 \text{ Мбіт/с.}$$

Швидкості передавання віртуальних мультиконтейнерів надані в табл. 3.5.

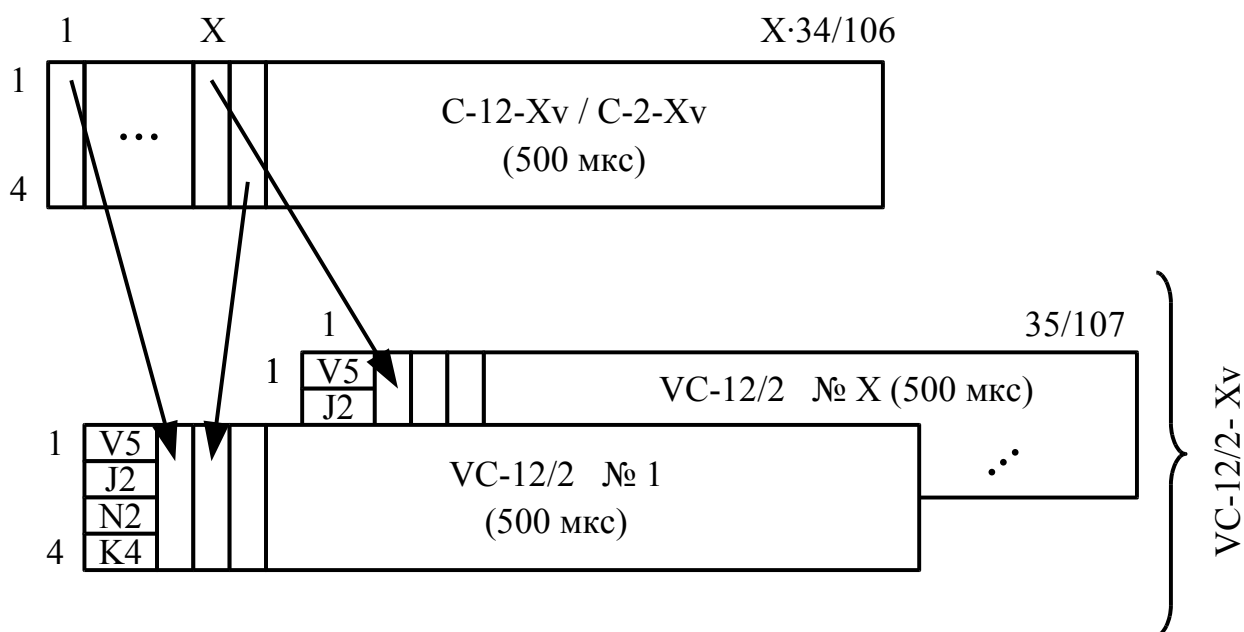


Рисунок 3.16 – Структура віртуального мультиконтейнера нижнього рівня VC-2/1-Xv

Таблиця 3.5 – Швидкості передавання віртуальних мультиконтейнерів

Тип контейнера	Упакований у модуль STM-N	X	Швидкість, Мбіт/с	Крок швидкості, Мбіт/с
VC-11-Xv	VC-3*	1–28	1,600–44,800	1,600
VC-11-Xv	VC-4	1–64**	1,600–102,400	1,600
VC-11-Xv	Не визначено	1–64	1,600–102,400	1,600
VC-12-Xv	VC-3	1–21	2,176–45,696	2,176
VC-12-Xv	VC-4	1–63	2,176–137,088	2,176
VC-12-Xv	Не визначено	1–64	2,176–139,264	2,176
VC-2-Xv	VC-3	1–7	6,784–47,448	6,784
VC-2-Xv	VC-4	1–21	6,784–142,464	6,784
VC-2-Xv	Не визначено	1–64	6,784–434,176	6,784
VC-3-Xv	STM-4	1–4	48,384–193,536	48,384
VC-3-Xv	STM-16	1–16	48,384–774,144	48,384
VC-3-Xv	STM-64	1–64	48,384–3096,576	48,384
VC-3-Xv	STM-256	1–256	48,384–12386,304	48,384
VC-4-Xv	STM-4	1–4	149,76–599,04	149,76
VC-4-Xv	STM-16	1–16	149,76–2396,16	149,76
VC-4-Xv	STM-64	1–64	149,76–9584,64	149,76
VC-4-Xv	STM-256	1–256	149,76–38338,56	149,76

3.5 Схема регулювання пропускної здатності лінії LCAS

В попередньому підрозділі було показано, що механізм VCAT дозволяє ефективно створювати канали передавання пакетного трафіка з необхідною пропускною здатністю. Важливим доповненням до VCAT є механізм LCAS.

Схема регулювання пропускної здатності лінії (Link capacity adjustment scheme, LCAS) використовується для зміни (збільшення або зменшення) пропускної здатності мультиконтейнера, що транспортується по мережі SDH/OTN з використанням віртуальної конкатенації. Також ця схема дозволяє автоматично зменшити пропускну здатність каналу у випадку збою елемента в мережі. Після усунення відповідної несправності, пропускну здатність каналу збільшується (відновлюється до попереднього значення). Ця схема застосовується до будь-якого елемента віртуально зчепленої групи.

У груповому сигналі (STM-N для SDH або OTU_k для OTN) одного напрямку передачі можливе об'єднання і наступне одночасне транспортування кількох *елементів* (VC або OPU_k) з трафіком різного типу. На рис. 3.17 показаний приклад організації двох віртуально конкатенованих груп в одній груповій інформаційній структурі.

Елементом називається індивідуальний контейнер рівня сервера, що належить якій-небудь віртуально зчепленій групі VCG.

Віртуально зчеплена група VCG (Virtual concatenation group, VCG) – це група функцій елементів закінчення траси, сполучених і з'єднаних однією лінією віртуального зчеплення.

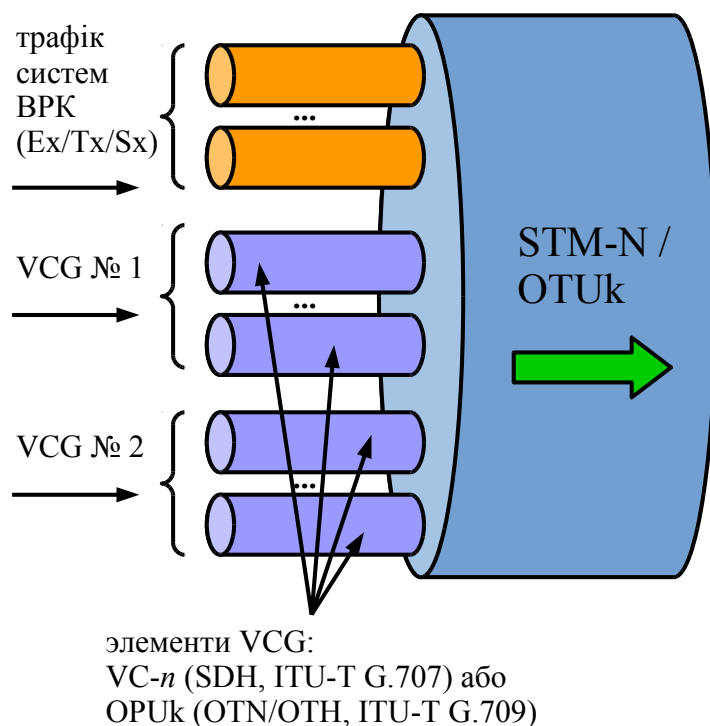


Рисунок 3.17 – Організація кількох груп VCG у системах NG-SDH/OTN

Алгоритм функціонування LCAS передбачає організацію односпрямованих (симплексних) широкосмугових трактів. Для дуплексного

зв'язку необхідно створити два тракти із протилежними напрямками передачі. Обидва вони функціонують незалежно і можуть мати різну пропускну здатність (кількість елементів VCG). Якщо буде потреба збільшення пропускну здатності обох напрямів тракту необхідно виконати процедуру додавання елементів VCG для кожного напрямку окремо. LCAS сама тимчасово видаляє з VCG елементи, що дали збої. Після усунення несправності елемент автоматично повертається до складу групи. Все керування елементами виконується автоматично за допомогою команд, що надходять від NMS.

Система керування мережею (Network Management System, NMS) – програмне забезпечення, яке функціонує в рамках TMN і взаємодіє з менеджерами верхнього та нижнього рівнів з метою підтримки комплексної структури даних, що відбиває стан мережі зв'язку. На додаток до можливостей системи керування мережним елементом (Network Management Element, NME), NMS має можливість:

- контролювати зв'язок між пристроями або лініями зв'язку в мережі;
- повідомляти про відмови, що відбуваються на різних вузлах мережі;
- передбачати відмови на різних вузлах мережі, несправності ліній зв'язку, які викликають несправності або порушення роботи мережі.

Кожен елемент групи VCG повинен мати наступні ідентифікатори, що дозволяють відновлювати структуру трафіка на стороні прийому:

- 1) номер VCG, за якою він закріплений;
- 2) номер елемента в VCG;
- 3) ідентифікатор мультиконтейнера, трафік якого розміщений в області корисного навантаження елемента.

Розмір групи VCG описують наступні три параметри:

1) параметр X_M , що вказує на максимальний розмір (кількість елементів) віртуальної зчепленої групи. Його значення зверху обмежене можливостями технології транспортної мережі (Рек. МСЕ-Т G.707/Y.1322 для СЦІ, Рек. МСЕ-Т G.709/Y.1331 для OTN). В конкретних реалізаціях обладнання X_M можливо ще більше обмежити до менших значень;

2) параметр X_P , який вказує на число забезпечуючих елементів у віртуально зчепленій групі. Кожна виконана команда ADD[i] збільшує X_P на 1, а виконана команда REMOVE[i] зменшує X_P на 1. При цьому виконується співвідношення $0 \leq X_P \leq X_M$;

3) параметр X_A , який вказує на фактичне число елементів віртуальної зчепленої групи, яке залишилося доступним для використання в результаті автономного додавання або виключення елементів протоколом LCAS у випадку збоїв окремого елемента. Виконується співвідношення $0 \leq X_A \leq X_P \leq X_M$.

Транспортування кожного елемента по маршруту передавання трафіка забезпечують відповідний передавач (Source, So) та приймач (Sink, Sk). Алгоритм функціонування передавача є кінцевим автоматом, який перебуває в одному із п'яти станів:

- 1) IDLE – елемент не призначений для участі у зчепленій групі;
- 2) NORM – елемент призначений для участі у зчепленій групі та має робочу трасу в напрямі приймача;

- 3) DNU – елемент призначений для участі у зчепленій групі та має трасу в стані відмови в напрямі приймача;
- 4) ADD – елемент перебуває в процесі додавання у зчеплену групу;
- 5) REMOVE – елемент перебуває в процесі виключення зі зчепленої групи.

Приймач елемента містить кінцевий автомат, який перебуває в одному із трьох станів:

- 1) IDLE – елемент не призначений для участі в групі VCG;
- 2) OK – вхідний сигнал для цього елемента не перебуває у стані збою або отримав і підтвердив запит на додавання цього елемента. Коли якість вхідного сигналу погіршується, даний елемент залишається у стані групи;
- 3) FAIL – вхідний сигнал для цього елемента перебуває у стані збою або підтверджено отримання вхідного запиту від передавача на видалення даного елемента.

Синхронізація змін пропускної здатності передавача і приймача досягається шляхом передачі керуючого пакета. Кожний пакет описує стан лінії під час наступного керуючого пакета. Зміни стану направляються заздалегідь, щоб приймач зміг перейти в новий стан. Керуючий пакет містить інформацію для забезпечення двостороннього обміну між S_o і S_k (рис. 3.18).

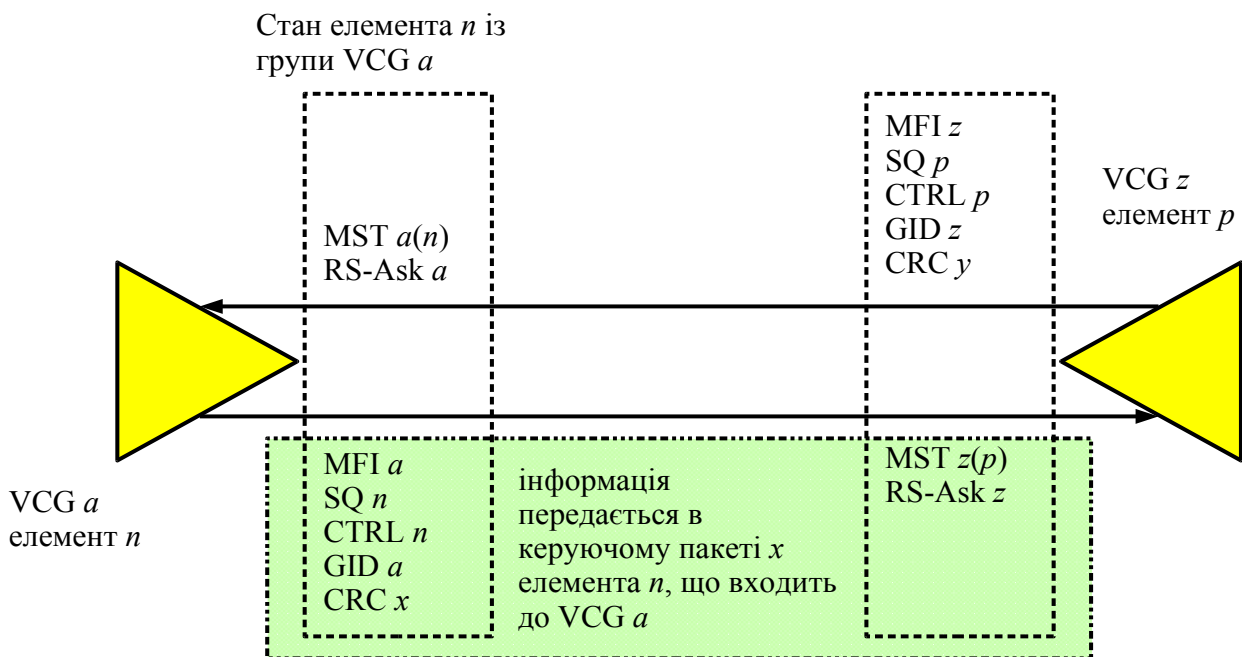


Рисунок 3.18 – Формат керуючого пакета LCAS

У прямому напрямі (від S_o до S_k) передаються:

- поле багатоканального індикатора (MFI);
- поле індикатора послідовності (SQ);
- поле керування (CTRL);
- біт ідентифікації групи (GID);
- поле CRC.

У зворотному напрямі (від S_k до S_o) передаються два поля:

- поле стана елемента (MST);
- біт підтвердження зміни послідовності (RS-ACK).

Всі інші невикористані біти резервуються для можливості використання в подальшому (виставляються в "0"). Розглянемо нижче призначення кожного з перерахованих раніше полів.

Поле багатокadroвого індикатора (Multiframe Indicator, MFI) має однакове значення для всіх елементів однієї VCG на боці передавача So. Даний параметр дозволяє оцінити диференційну затримку між елементами однієї групи, що складає різницю між максимальним і мінімальним часом проходження сигналу елементами VCG по відповідних маршрутах згідно з Рек. MCE-T G.806 і дозволити вирівняти корисне навантаження на боці приймача Sk.

Поле індикатора послідовності (Multiframe Indicator field, SQ) містить номер послідовності, привласнений конкретному елементу (номер VC/OTU у групі). Згідно з Рек. MCE-T G.707/Y.1322 та G.709/Y.1331 кожному елементу однієї групи надається індивідуальний номер послідовності, починаючи від 0 до $(n - 1)$, де n – загальне число елементів у групі. У випадку невходження елемента до будь-якої групи (поле CTRL=IDLE):

- передавач So установлює номер елемента в полі SQ на максимально можливу величину;
- у точці приймання Sk поле SQ ігнорується.

Поле керування (Control field, CTRL) служить для вказівки статусу кожного окремого елемента групи і синхронізації передавача елемента з його приймачем. Значення кодових слів даного поля надані в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Керуючі слова поля CTRL схеми LCAS

Кодове слово	Керуюче слово	Значення
0000	FIXED	Це керуюче слово вказує на те, що елемент використовує фіксовану ширину смуги пропускання (режим без використання LCAS)
0001	ADD	Елемент готовий до додавання в групу
0010	NORM	Елемент є звичайною частиною групи і не має найбільшого номера послідовності
0011	EOS	Елемент має найбільший номер послідовності серед активних елементів у групі
0101	IDLE	Цей елемент не є частиною групи або готовий до видалення з неї
1111	DNU	Не використовувати елемент, оскільки сторона Sk повідомила про несправність

Біт групової ідентифікації (Group Identification bit, GID) використовується для маркування елементів однієї групи VCG. Біт GID має

однакове значення в керуючих пакетах усіх елементів однієї групи VCG, що містять той самий індикатор MFI. Біт дозволяє приймачу впевнитися, що всі елементи, що надійшли, належать одному передавачу (групі VCG). Для формування біта використовується псевдовипадкова модель $2^{15}-1$.

Поле CRC міститься в керуючих пакетах обох напрямів зв'язку між So і Sk. Використовується для захисту кожного керуючого пакета від помилок. Якщо керуючий пакет перевірку не проходить, то його вміст ігнорується.

Поле стану елементів (Member Status, MST) використовується для передачі стану елемента в напрямку від Sk до So. Є однобітовим полем, що містять нульове значення (MST=OK) або одиничне значення (MST=FAIL).

Біт підтвердження зміни послідовності (Re-Sequence Acknowledge bit, RS-ACK) служить для повідомлення передавачів So елементів, що направляють NORM, DNU, EOS у керуючому полі CTRL або у випадку виявлення зміни числа цих елементів у приймачі Sk. Повідомлення здійснюється шляхом інверсії (зміни значення на протилежне) біта RS-ACK.

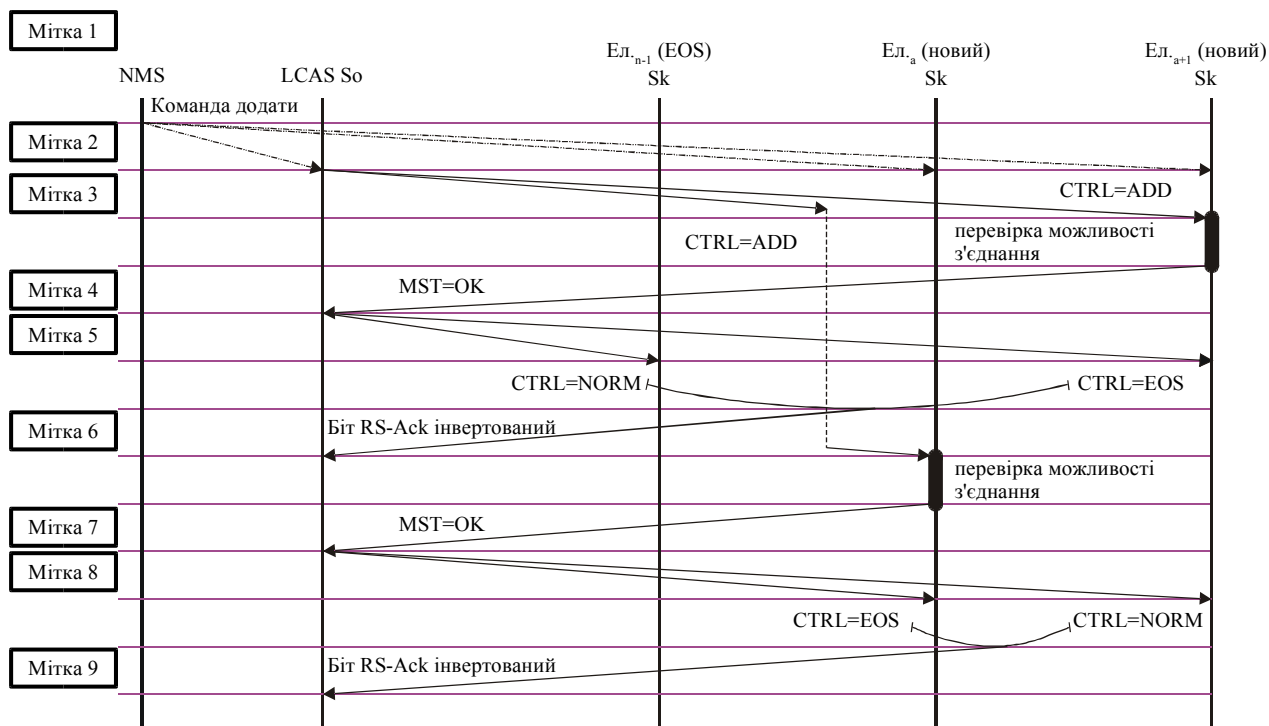
У випадку додавання елемента в групу LCAS, йому завжди повинен надаватися номер послідовності SQ, на одиницю перевищуючий найвищий з існуючих номерів послідовності, які мають EOS або DNU у керуючому коді CTRL. У випадку, якщо додаються кілька нових елементів, кожен з них повинен використовувати індивідуальний номер і для кожного з них буде сформована індивідуальна відповідь MST.

Після передачі команди ADD, першому елементу, який відповість (поле MST=OK), повинен бути наданий наступний за величиною номер послідовності SQ. У випадку відсутності підтвердження, кодове слово CTRL=ADD направляється безупинно доти, поки не буде отримана відповідь MST=OK. Після виконання всіх кроків процедури додавання, елемент із найбільшим номером послідовності SQ устанавлює поле CTRL=EOS. Інші додані елементи устанавлюють поле CTRL=NORM. Елемент, що мав найбільший номер SQ до виконання процедури додавання, змінить значення поля з EOS на NORM.

На рис. 3.19 показаний приклад додавання двох елементів з вихідними номерами a і $a+1$ у групу, що містить n активних елементів. Наведений приклад показує, що новий елемент $a+1$ відповідає полем MST = OK раніше (мітка 4), ніж новий елемент a (мітка 7).

Першому елементу, який відповів, надається номер $SQ=n$, а наступному – $SQ=n+1$. Якщо протягом деякого часу очікування елемент полем MST = OK не відповідає, то LCAS може прийняти рішення про відмову даного елемента. У випадку, якщо додаються кілька елементів і для них одночасно отримане поле MST=OK, то розподіл індикаторів послідовності SQ для них здійснюється довільно.

Перейдемо до розгляду *процедури видалення елемента із групи* при відповідному отриманні команди від NMS. Якщо елемент, що видаляється, містив найвищий номер послідовності SQ у групі (CTRL=EOS), то після проведення операції його поле CTRL=IDLE. Одночасно із цим, активний елемент, що має наступне за величиною значення поля SQ, змінює поле



Мітка	Команда	Елемент n			Елемент a (новий)			Елемент a + 1 (новий)			Rs-ack
		CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST	
1	Вихідний стан	EOS	n - 1	OK	IDLE	(макс.)	FAIL	IDLE	(макс.)	FAIL	0
2	NMS видає команду LCASC So і Sk додати	EOS	n - 1	OK	IDLE	(макс.)	FAIL	IDLE	(макс.)	FAIL	0
3	So (a) направляє CTRL = ADD і SQ = n; So (a + 1) направляє CTRL = ADD і SQ = n + 1	EOS	n - 1	OK	ADD	n	FAIL	ADD	n + 1	FAIL	0
4	Sk (a + 1) направляє MST = OK джерелу So	EOS	n - 1	OK	ADD	n	FAIL	ADD	n + 1	OK	0
5	So (n - 1) направляє CTRL = NORM; So (a + 1) направляє CTRL = EOS і SQ = n	NORM	n - 1	OK	ADD	n + 1	FAIL	EOS	n	OK	0
6	Біт RS-ACK інвертований, через зміну в послідовності	NORM	n - 1	OK	ADD	n + 1	FAIL	EOS	n	OK	1
7	Sk (a) направляє MST = OK джерелу So	NORM	n - 1	OK	ADD	n + 1	OK	EOS	n	OK	1
8	So (a) направляє CTRL = EOS; So (a + 1) направляє CTRL = NORM	NORM	n - 1	OK	EOS	n + 1	OK	NORM	n	OK	1
9	Біт RS-ACK інвертований, через зміну в послідовності	NORM	n - 1	OK	EOS	n + 1	OK	NORM	n	OK	0

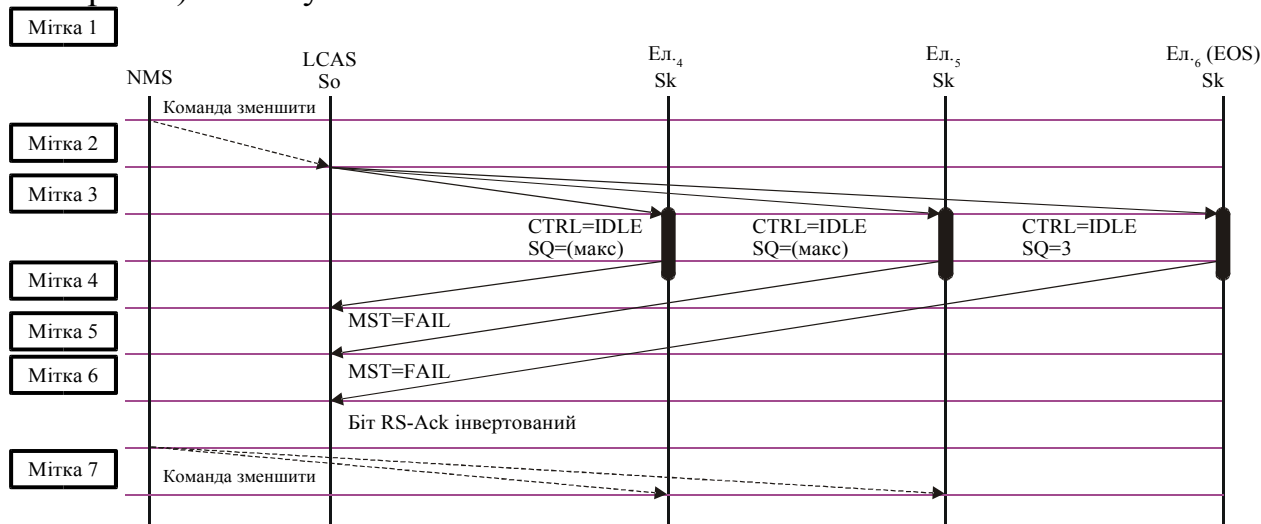
Примітка. Початкове значення RS-ACK обране рівним "0" як приклад. Значення має лише факт інверсії даного біта.

Рисунок 3.19 – Додавання двох елементів до VCG LCAS

CTRL=EOS. У випадку, якщо елемент, що видаляється, мав значення поля (CTRL =DNU), то нумерація послідовності та керуючі поля інших елементів у групі не зміняться.

Якщо елементи, що видаляються, не містять найвищі номери SQ (перебувають у середині групи), то елементи з більшим значенням поля SQ повинні обновили свої індикатори SQ.

Розглянемо приклад видалення двох елементів № 4 і № 5 з полями CTRL≠EOS (рис. 3.20) при одночасній команді від NMS. У момент часу мітки 3 для елементів, що видаляються, змінюється значення поля на CTRL=IDLE. Номера наступних елементів (у даному прикладі це один елемент із вихідним номером 6) зменшуються.



Мітка	Команда	Елемент 4			Елемент 5			Елемент 6			Rs-ack
		CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST	
1	Вихідний стан	NORM	3	OK	NORM	4	OK	EOS	5	OK	0
2	NMS видає LCASC джерела So команду зменшити	NORM	3	OK	NORM	4	OK	EOS	5	OK	0
3	So (3) направляє CTRL = =IDLE, SQ = (макс.); So (4) направляє CTRL = =IDLE, SQ = (макс.); So (5) направляє SQ = 3	IDLE	(max)	OK	IDLE	(макс.)	OK	EOS	3	OK	0
4	Sk (елемента, що видаляється) направляє MST = FAIL джерелу So	IDLE	(max)	FAIL	IDLE	(макс.)	OK	EOS	3	OK	1
5	Sk (елемента, що віддаляється) направляє MST = FAIL джерелу So	IDLE	(max)	FAIL	IDLE	(макс.)	FAIL	EOS	3	OK	1
6	Біт RS-ACK інвертований, через зміну в послідовності	IDLE	(max)	FAIL	IDLE	(макс.)	FAIL	EOS	3	OK	1
7	NMS видає LCASC приймача Sk команду зменшити	IDLE	(max)	FAIL	IDLE	(макс.)	FAIL	EOS	3	OK	1

Рисунок 3.20 – Видалення елементів № 4 і 5 з VCG LCAS

4 Системи передачі оптичної транспортної ієрархії OTN

4.1 Оптична транспортна мережа та її компоненти

Технологія DWDM, що отримала значний розвиток у другій половині 90-х років минулого сторіччя після розробки оптичних підсилювачів типу EDFA, дозволила суттєво підвищити спектральну ефективність ВОСП. У системах DWDM передавання трибутарних сигналів здійснюється по широкосмугових трактах (оптичних каналах) із пропускнуою здатністю десятки Гбіт/с. Кількість оптичних каналів обмежується ефективною смугою посилення оптичних підсилювачів (1530-1560 нм для діапазону C).

Такі системи мали наступні недоліки:

1. Неможливість контролю якості оптичних каналів без переривання з'єднання.
2. Відсутність системи автоматичного захисного перемикавання (Automatic Protection Switching, APS).
3. Неможливість оперативного усунення аварійних ситуацій внаслідок відсутності секціонування траси оптичного каналу.
4. Неможливість побудови системи керування мережею.

Більшість цих недоліків враховані при розробці стандарту систем передачі *оптичної транспортної мережі*.

Оптична транспортна мережа OTN (Optical Transport Network) складається із сукупності елементів оптичної мережі, з'єднаних *оптоволоконними лініями*, і здатних виконувати функції з *транспортуювання, мультиплексування, маршрутизації, керування, контролю та забезпечення живучості оптичних каналів*, які транспортують сигнали користувачів. Елементи оптичної мережі обладнані *інтерфейсами вузла оптичної транспортної мережі ONNI* (optical transport network node interface) для зв'язку між собою.

Оптична транспортна ієрархія OTN (Optical transport hierarchy) – це ієрархічна група транспортних рівнів, відповідних їм інформаційних структур, алгоритмів формування та обробки, яка стандартизована для передавання корисного навантаження в мережі OTN.

Елемент оптичної мережі ONE (Optical Network Element) – це фрагмент мережного елемента, який містить функції оброблення трафіка між одним або кількома рівнями мережі OTN. Може бути автономним фізичним модулем або частиною мережного елемента.

Функціонування OTN здійснюється згідно з набором Рекомендацій ITU, які регламентують:

- архітектурні аспекти (ITU-T G.872);
- характеристики функціонування елементів (ITU-T G.798);
- модель керуючої інформації (ITU-T G.875);
- аспекти обслуговування устаткування (ITU-T G.874);
- характеристики фізичного шару (ITU-T G.664, G.959.1);

– інформаційні структури й відображення (ITU-T G.709).

Рекомендаціями G.709 і G.798 передбачена ієрархічна структура інтерфейсів мережі OTN, побудована за стандартною архітектурою "клієнт - сервер" (її спрощений варіант показаний на рис. 4.1). Вона містить ряд рівнів обробки сигналу в електричній і оптичній формі. За аналогією з SDH, в OTN для моніторингу стану та керування трасою передаванням сигналу користувача, виконується її секціонування згідно з рис. 4.2.

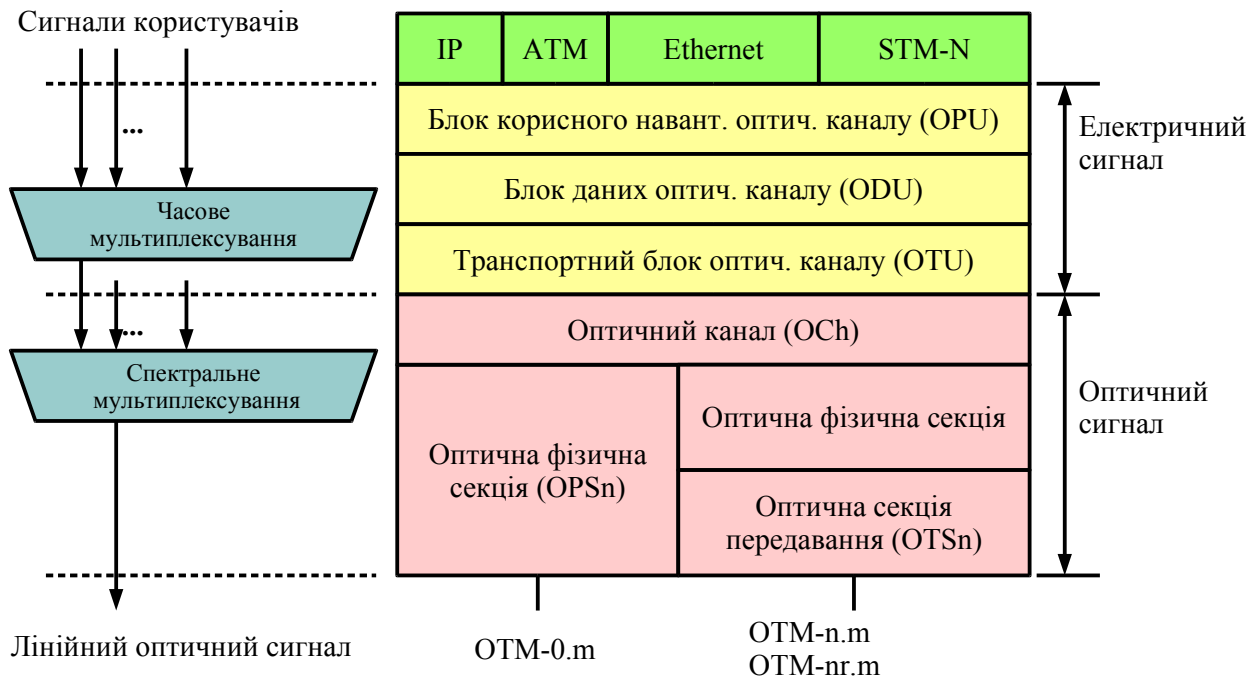


Рисунок 4.1 – Інтерфейси мережі OTN

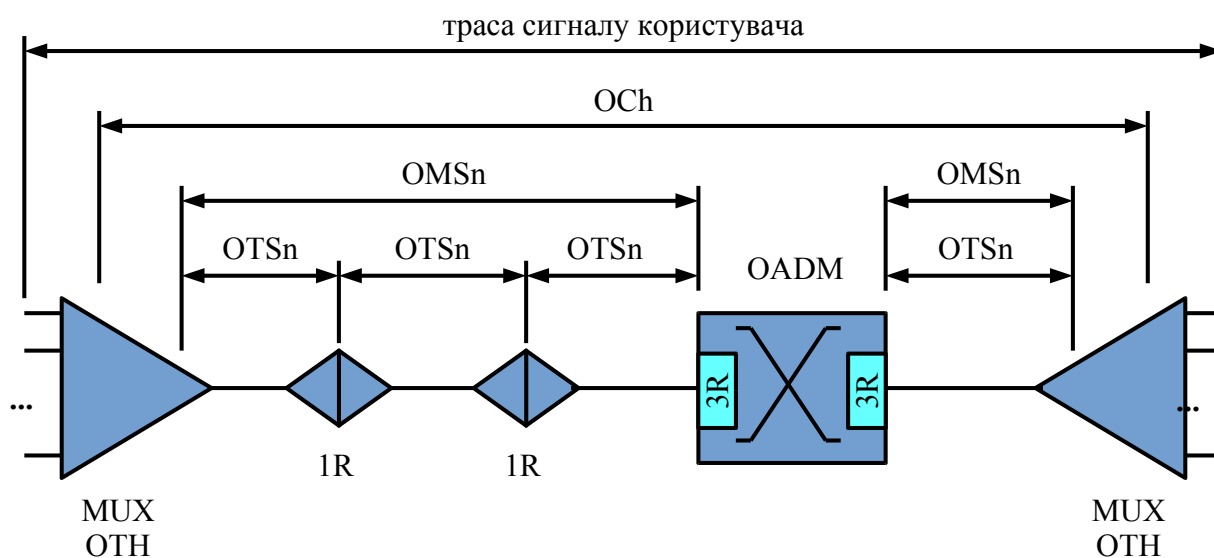
З метою підвищення ефективності використання середовища розповсюдження (оптичного волокна), формування групового сигналу виконується двома етапами:

1) *часове мультиплексування* кількох трибутарних сигналів в один блок оптичного каналу OCh. На цьому етапі з одного або кількох вхідних сигналів формується агрегований інформаційний потік зі швидкістю до 100 Гбіт/с;

2) *спектральне мультиплексування* сигналів кількох OCh в один оптичний транспортний модуль OTM з повною або обмеженою функціональністю.

Розглянемо детальніше призначення рівнів та інформаційних структур OTN.

Блок корисного навантаження оптичного каналу OPU_k (Optical channel payload unit) – це інформаційна структура, що використовується для адаптації інформації користувача з метою подальшого її транспортування по оптичному каналу. Складається із заголовка та інформаційного поля. Як навантаження може бути асинхронний (трафік Ethernet/IP/ATM) або синхронний (STM-N). Поточна Рекомендація ITU G.709 припускає формування OPU_k чотирьох рівнів ієрархії ($k = 1, 2, 3, 4$). OPU_k високого рівня ($k > 1$) може містити один трибутарний сигнал відповідної швидкості або кілька OPU нижніх рівнів.



1R – оптичний підсилювач;
 3R – регенератор;
 OCh – оптичний канал;
 MUX OTN – мультиплексор OTN;
 OADM – оптич. мультиплексор введення-виведення;
 OMSn – оптична мультиплексорна секція;
 OTSn – оптична транспортна секція

Рисунок 4.2 – Секціонування траси оптичного каналу в OTN

Блок даних оптичного каналу ODUk (Optical channel data unit) – інформаційна структура, яка служить для підтримки тракту "від краю до краю" OTN.

За маршрутом ODUkp (Optical channel data unit-k path) передається корисне навантаження OPUk, а також супровідні її заголовки OPUk і ODUk. Маршрут ODUk може бути двонаправленим або однонаправленим.

Транспортний блок оптичного каналу OTUk (optical channel transport unit) — інформаційна структура, використовувана для транспортування ODUk за маршрутом блока оптичного каналу OCh. Рекомендація ITU G.709 стандартизує використання OTUk ($k = 1, 2, 3, 4$) двох версій: повністю стандартизований OTUk і частково стандартизований OTUkv.

Незалежно від рівня ієрархії k , всі інформаційні структури OTN мають фіксований формат (рис. 4.3). Зміна швидкості передавання досягається шляхом зміни частоти проходження циклів (табл. 4.1).

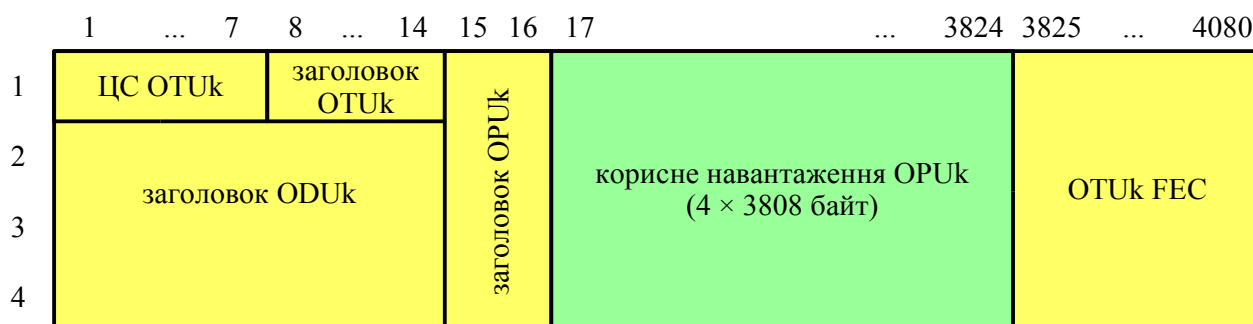


Рисунок 4.3 – Структура блоків OPUk, ODUk і OTUk

Таблиця 4.1 – Параметри OTUk

Тип OTUk	Швидкість, кбіт/с	Тривалість циклу, мкс	Відхилення швидкості
OTU1	255/238 × 2 488 320 kbit/s	48,971	$\pm 20 \cdot 10^{-6}$
OTU2	255/237 × 9 953 280 kbit/s	12,191	
OTU3	255/236 × 39 813 120 kbit/s	3,035	
OTU4	255/227 × 99 532 800 kbit/s	1,168	

Блок оптичного каналу OCh (optical channel) являє інформаційну структуру, використовувану для транспортування OTUk. Забезпечує перетворення електричних сигналів OTUk в оптичні на передачі і зворотну операцію на прийомі. На рівні OCh здійснюється повноцінна 3R регенерація: відновлення амплітуди, тривалості і частоти проходження імпульсів. Стандартизовано два варіанти OCh:

1) з повною функціональністю OCh (optical channel with full functionality), який містить заголовок (передається окремо у службовому каналі OSC) та інформаційну частину (є OTUk, що перетворений в оптичну форму згідно з сіткою частот DWDM G.694);

2) з обмеженою функціональністю OChr (optical channel with reduced functionality), який містить тільки інформаційну частину без підтримки заголовка.

Сформований блок OCh упаковується в **блок несучої оптичного каналу OCC** (optical channel carrier), який складається з корисного навантаження OCCp (OCC payload) і заголовка OCCo (OCC overhead). OCC є один трибутарний слот в OTM-n. Корисне навантаження OCCp транспортується по закріпленій за нею довжиною хвилі в груповому сигналі DWDM. Заголовок OCCo передається в каналі OSC на виділеній довжині хвилі та обробляється в точці закінчення маршруту OCh.

Група оптичних несучих рівня n, OCG-n (optical carrier group of order n) – група несучих оптичного каналу OCC, які займають фіксовані та закріплені позиції в навантаженні оптичного транспортного модуля. Можливе формування двох типів OCG: з повною функціональністю OCG-n і обмеженою функціональністю OCG-nr. Обмеженість полягає у відсутності заголовка, який використовується для супроводу переданого корисного навантаження.

Рівень оптичної мультиплексорної секції OMSn (Optical Multiplex Section) служить для формування та підтримки з'єднання *блока оптичного мультиплексування* (optical multiplex unit, OMU-n, $n \geq 1$). Індекс n вказує на максимальну кількість довжин хвиль і відповідних їм блоків OCh, які можна транспортувати в одному оптичному транспортному модулі.

На рівні **оптичної транспортної секції OTSn** (optical transport section) здійснюється формування та обробка оптичного транспортного модуля.

Рівень оптичної фізичної секції OPSn (optical physical section of order n) служить для передачі багатохвильового сигналу ($n = 0$ і $n = 16$) по оптичному середовищу різного типу (оптичні волокна ITU-T G.652, ITU-T G.653 і ITU-T G.655). Поняття багатохвильового сигналу включає випадок організації одного оптичного каналу ($n = 0$). Даний рівень поєднує можливості рівнів OMS і OTS без каналу OSC.

Оптичний транспортний модуль OTM (optical transport module) – це інформаційна структура, яка транспортується між інтерфейсами ONNI вузла OTN (рис. 4.4). Рекомендація ITU G.709 передбачає можливість формування OTM кількох типів. Найпоширенішими є наступні три типи:

- 1) *однохвильовий OTM-0.m*, який використовується на лініях, що складаються із однієї секції з 3R регенерацією на її закінченнях;
- 2) *з повною функціональністю OTM-n.m*, який передбачає наявність кількох інформаційних довжин хвиль і виділення окремої довжини хвилі (канал OSC) для передавання заголовків OCh, OCC, OCG-n, OMSn і OTSn;
- 3) *з обмеженою функціональністю OTM-nr.m*, який містить тільки інформаційні довжини хвиль без каналу OSC.

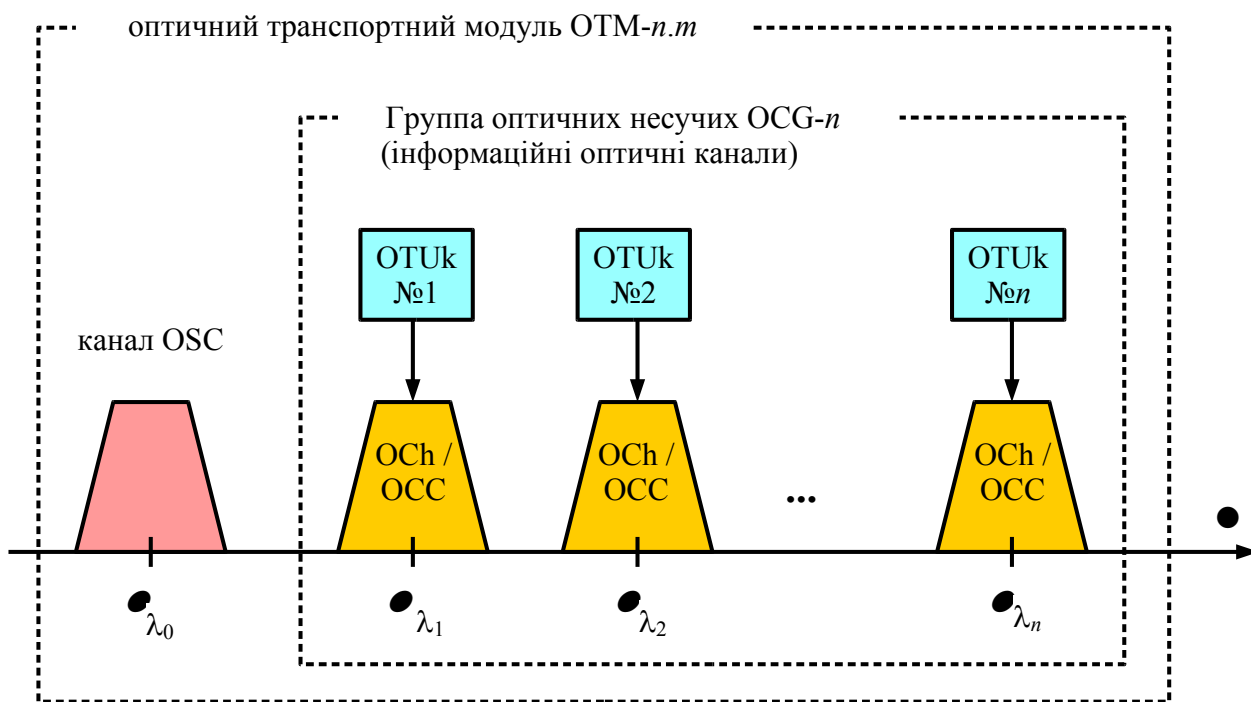


Рисунок 4.4 – Фізична структура оптичного транспортного модуля OTM-n.m

Перераховані позначення інформаційних структур OTN містять наступні три індекси:

- k - рівень ієрархії інформаційних структур k ;
- n – максимальна кількість довжин хвиль (оптичних каналів), яке може транспортувати одна групова інформаційна структура. Поточна рекомендація G.709 не містить конкретних значень даного індексу. Сучасна апаратура OTN

містить модулі пасивного оптичного мультиплексування, які підтримують $n = 16, 24, 32, 40$ при міжканальному інтервалі 100 ГГц;

– m – це число, цифри якого вказують на рівень ієрархії інформаційних структур k , які передаються в інформаційних оптичних каналах. Наприклад, оптичний модуль OTM-n.12 підтримує інформаційні структури з $k = 1$ і $k = 2$.

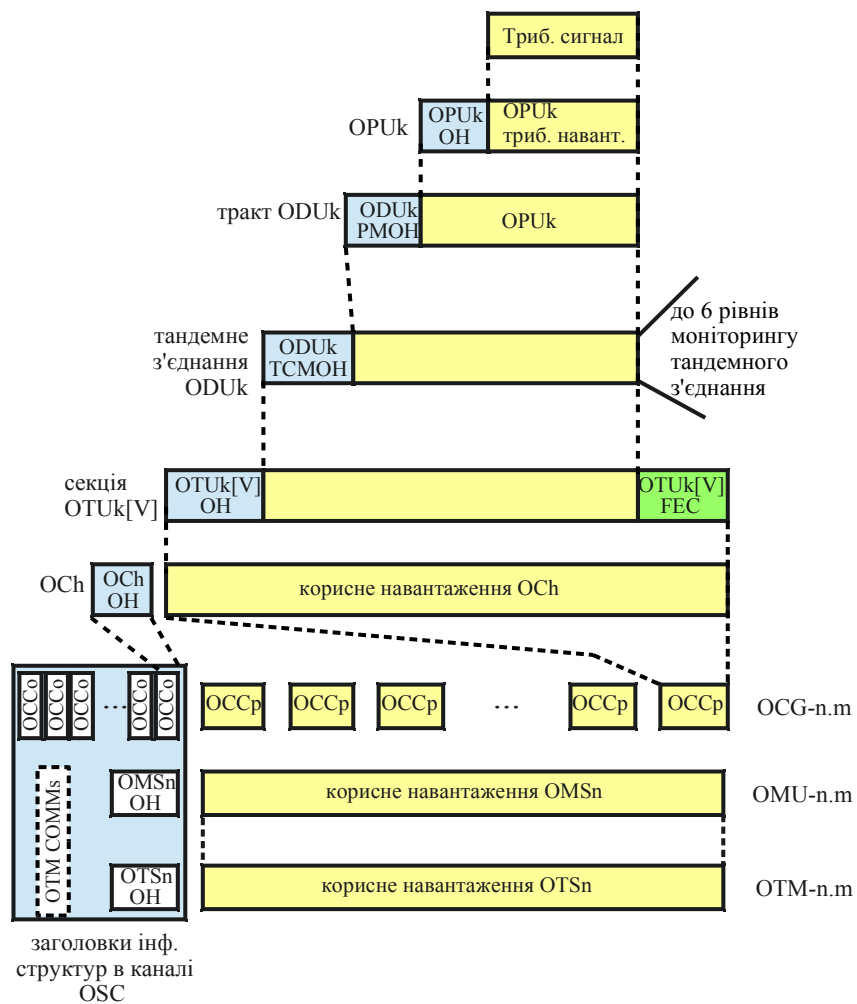
Взаємозв'язок між перерахованими інформаційними структурами ОТН показаний на рис. 4.5, 4.6 і 4.7. Раніше було зазначено, що формування ОТМ відбувається в кілька етапів, що включають процедури упакування (відображення, mapping) і мультиплексування (часового та спектрального).

На першому етапі трибутарний сигнал упаковується в OPU нижнього рівня (на схемі позначений як "OPU (L)"). Далі сигнал OPU (L) упаковується у відповідний ODU (L), який у свою чергу упаковується в OTU[V] або ODTU. В останньому випадку ODTU мультиплексується в ODTUG (ODTU Group), який упаковується в OPU верхнього рівня OPU (H). Далі послідовно виконується упакування: OPU (H) $\rightarrow$ ODU (H) $\rightarrow$ OTU[V]. Блоки корисного навантаження нижнього OPU (L) і верхнього OPU (H) рівня мають однаковий формат, але містять сигнал користувача різного типу.

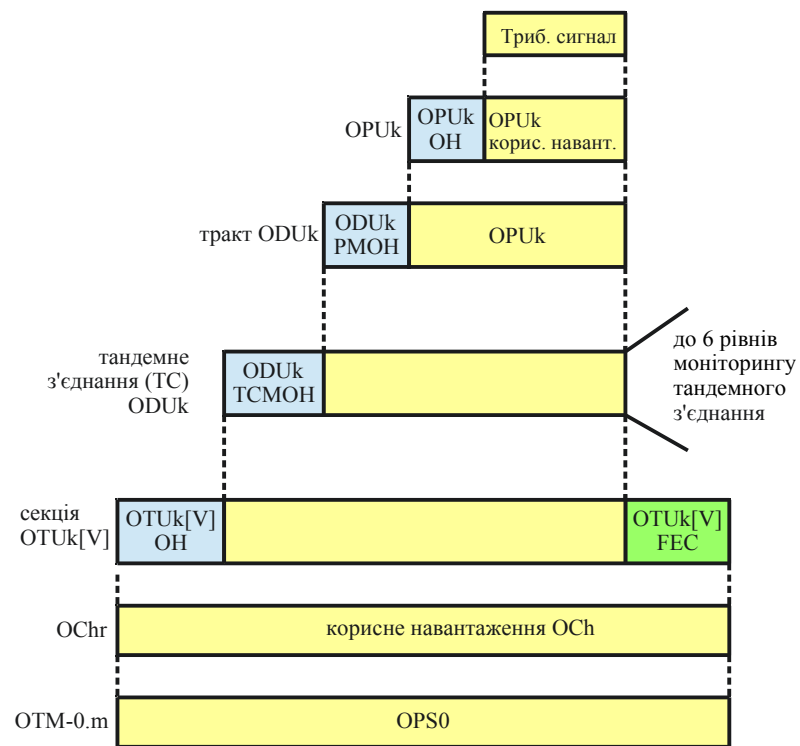
Другий етап припускає упакування сигналу OTU[V] у блок оптичного каналу OCh and OChr, який розміщується в блоці несучої оптичного каналу OCC або OCCr. Корисне навантаження OCC/OCCr є оптичним сигналом, у діапазоні стандартної сітки частот DWDM. На наступному кроці окремі сигнали OCC/OCCr мультиплексуються в групу OCG-n. Далі сигнал OCG-n упаковується в блоки OMSn і OTSn.

Заголовки OCh, OMSn і OTSn передаються в оптичному каналі керування OSC (optical supervisory channel), для якого виділяється окрема довжина хвилі. Поточна рекомендація ITU G.709 не вказує формат заголовка і конкретну довжину хвилі, яка закріплена за даним каналом. Докладні варіанти формування OTM-n.m показані на рис. 4.8.

Оскільки на кожному 1R регенераторі (оптичному підсилювачі) при використанні OTM-n.m/OTM-nr.m необхідна обробка заголовка OTSn, то в серійному обладнанні сигнал OSC передається у другому вікні прозорості (1310 нм).



з повною функціональністю OTM-n.m



з обмеженою функціональністю OTM-0.m

Рисунок 4.5 – Формування OTM різної функціональності

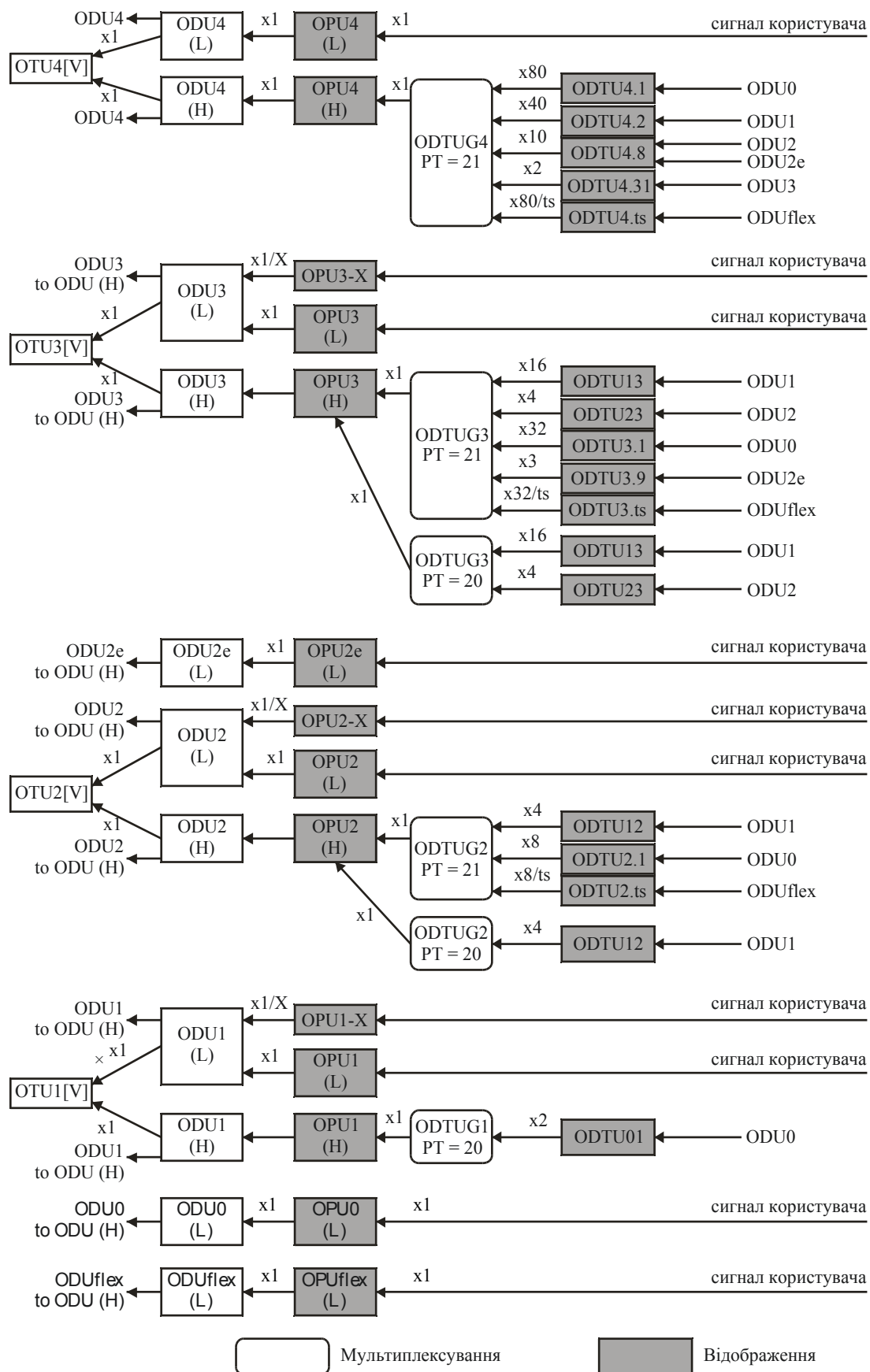


Рисунок 4.6 – Формування OTUk[V]

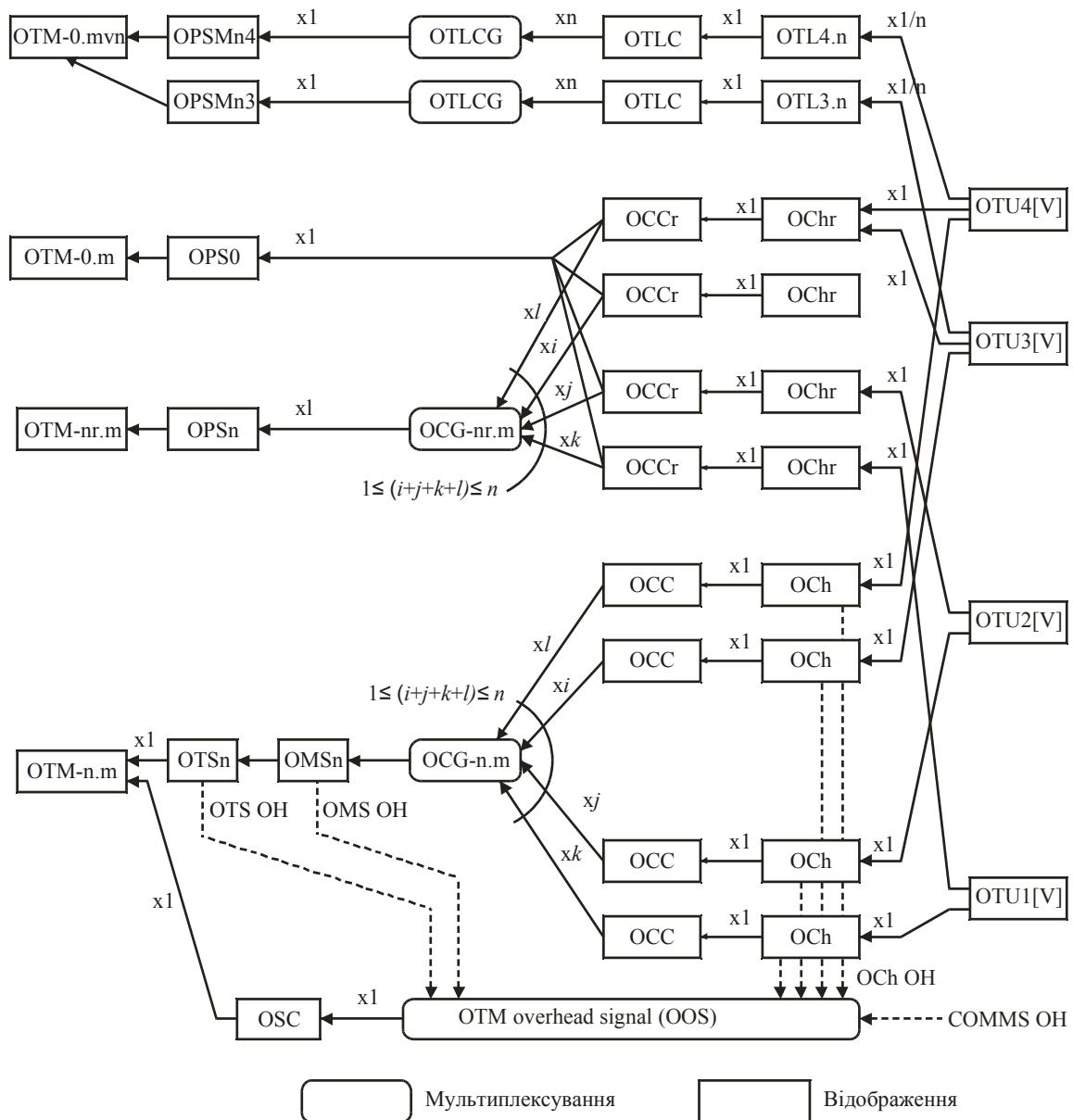


Рисунок 4.7 – Формування OTM

У випадку відсутності необхідності використання багатохвильового інтерфейсу OTM-n.m, можливо застосувати наступний варіант упакування (рис. 4.7): OTUk[V] → OCHr → OCCr → OPS0 → OTM-0.m.

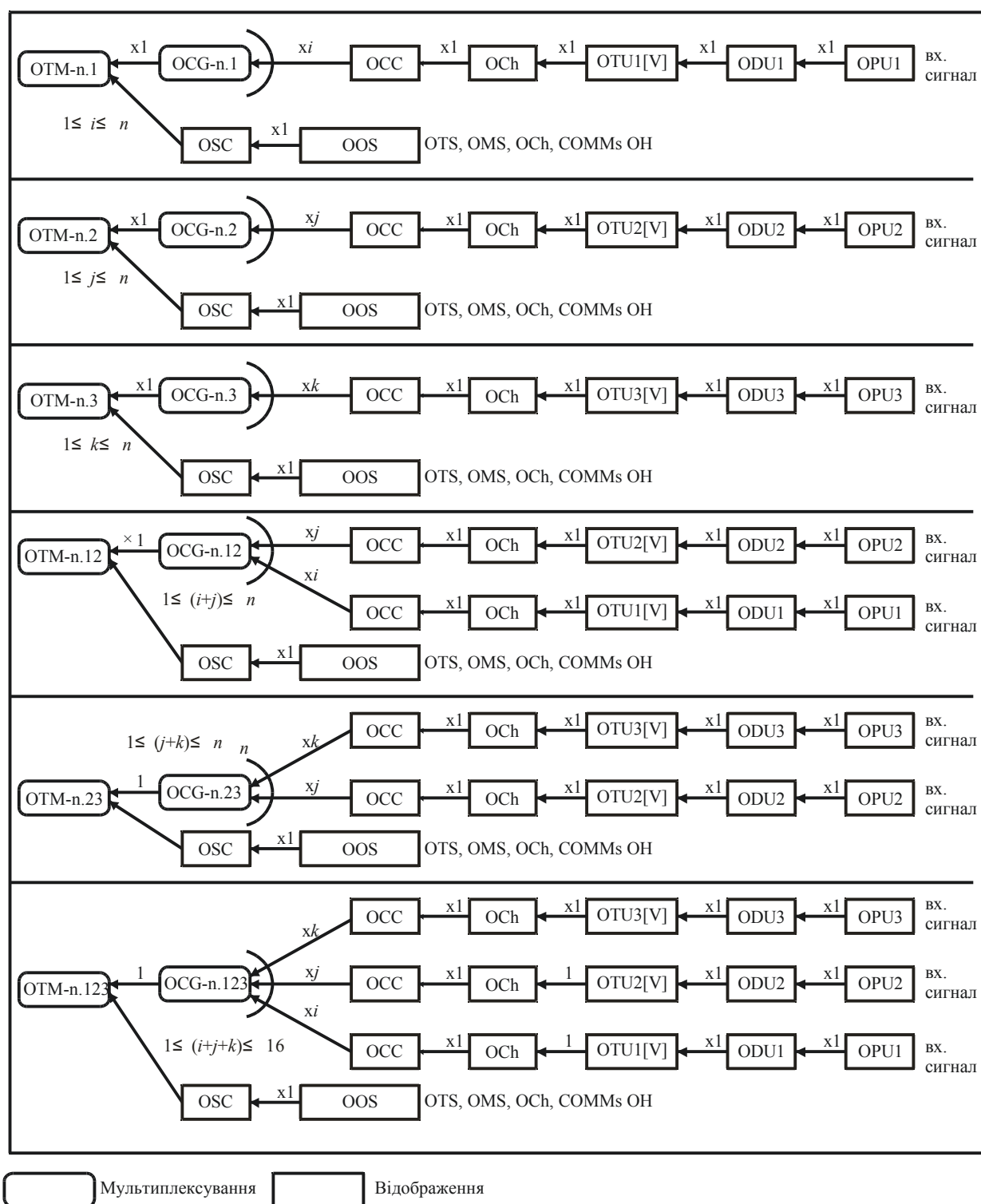


Рисунок 4.8 – Формування OTM-n.m

4.2 Блок навантаження оптичного каналу OPU

4.2.1 Призначення і формат

Блок корисного навантаження оптичного каналу OPU_k ($k = 1, 2, 3, 4$) є стандартною інформаційною структурою OTN, яка розміщується у стовбцях 15-3824 циклу OTU_k і є контейнером для упакування навантаження користувача. Період проходження OPU_k збігається з періодом проходження відповідного рівня OTU_k (табл. 4.1) і не залежить від рівня ієрархії k .

У стовбцях 15-16 розташовані байти заголовка OPU_k , який містить наступні службові поля (рис. 4.9):

- 1) *ідентифікатор структури навантаження PSI* (payload structure identifier), який складається з 256 байтів ($PSI[0]$ - $PSI[255]$), що передаються один за одним у надциклі ODU_k . Байт $PSI[0]$ містить інформацію про тип навантаження PT (payload type), розміщеного в полі корисного навантаження. Інші байти $PSI[1]$ – $PSI[255]$ на даний момент зарезервовані для транспортування службової інформації про тип упакування і конкатенацію в наступних версіях рекомендації ITU-T G.709, за винятком випадків $PT=0x01$ (експериментальне упакування) і $PT=0x80$ - $0x8F$ (для пропрієтарного використання);
- 2) *байт негативного вирівнювання швидкостей NJO* (negative justification opportunity) служить для передавання байта даних трафіка користувача при асинхронному упакуванні;
- 3) *байт позитивного вирівнювання швидкостей PJO* (positive justification opportunity) розміщується в полі корисного навантаження OPU_k і служить для передачі баластового байта (узгодження) при асинхронному упакуванні трафіка;
- 4) *керування узгодженням швидкостей JC* (justification control), яке розміщується в рядках 1–3 стовпця 16 і включає три байти JC. Біти 7–8 містять інформацію узгодження швидкостей, інші шість – зарезервовані для стандартизації в майбутньому;
- 5) *три зарезервовані байти RES* (reserved) для стандартизації використання в майбутньому.

Біт *індикатора аварії сигналу користувача CSF* (client signal fail) використовується для передавання статусу аварії трибутарного сигналу з постійною швидкістю, який упакований в OPU_k і передається між точкою входу і виходу мережі OTN. CSF розташовується в біті 1 байта $PSI[2]$, біти 2–8 дорівнюють 0. Для індикації аварії трибутарного сигналу $CSF = 1$, в інших випадках $CSF = 0$. Обладнання, розроблене до стандартизації даного біта формує $CSF = 0$ на передаванні OPU_k та ігнорує будь-яке значення CSF на прийманні.

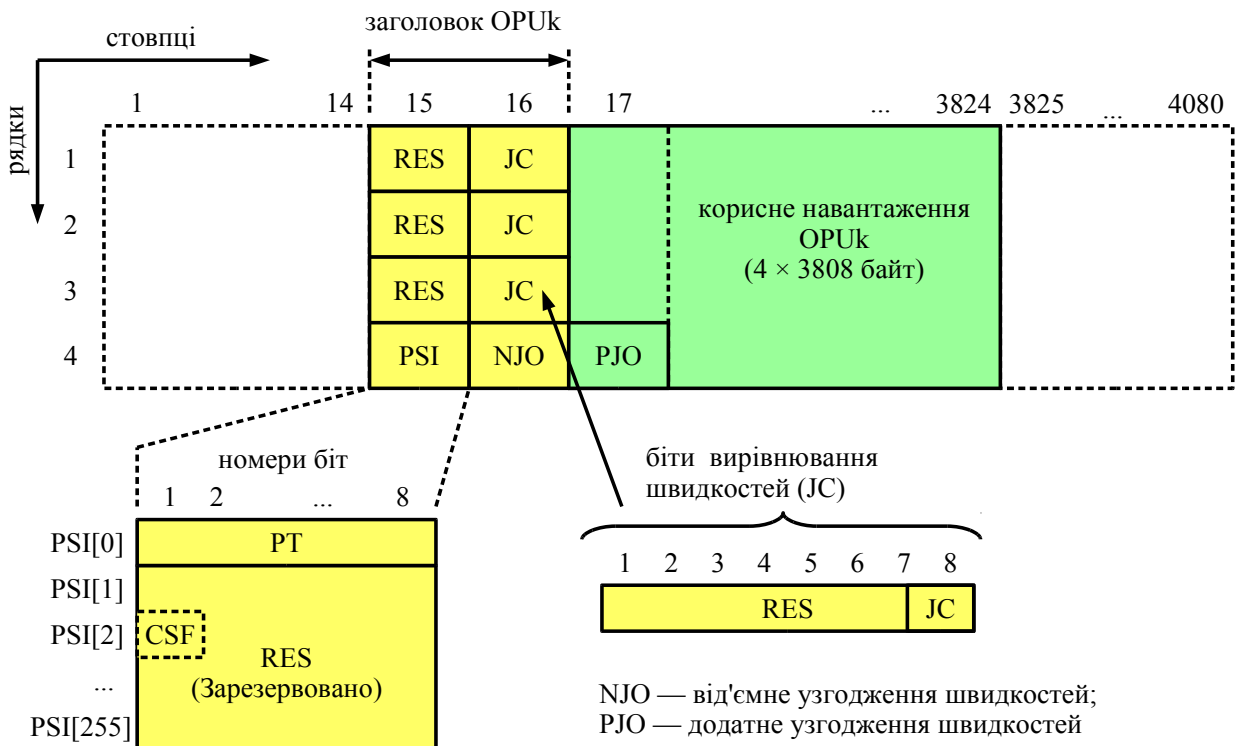


Рисунок 4.9 – Формат заголовка OPUk

В область корисного навантаження OPUk можливе завантаження наступних типів трафіка:

- 1) трибутарні сигнали з постійною швидкістю типу STM-16, STM-64, STM-256 методом асинхронного або синхронного упакування бітів;
- 2) сигнали корисного навантаження користувача з фіксованими швидкостями до 1,238 Гбіт/с (упакування в OPU0) або до 2,488 Гбіт/с (упакування в OPU1) шляхом використання апаратно незалежної процедури GFP-T;
- 3) сигнали корисного навантаження користувача з фіксованими швидкостями і наступним упакуванням в OPU1, OPU2, OPU3 або OPU4 з використанням процедури GFP-T;
- 4) сигнали пакетних мереж Ethernet, MPLS, IP з використанням GFP-F;
- 5) сигнали GPON і XGPON з наступним упакуванням у блоки OPU1 і OPU2 відповідно;
- 6) тестові сигнали.

У табл. 4.2 надані коди поля PT для зазначених вище типів навантаження OPU.

Таблиця 4.2 – Коды поля РТ для розповсюджених типів трафіка користувача

Значення Двійкове	HEX	Тип сигналу в області корисного навантаження
0 0 0 0 0 0 0 1	01	Експериментальне упакування
0 0 0 0 0 0 1 0	02	Асинхронне відображення CBR
0 0 0 0 0 0 1 1	03	Синхронне відображення CBR
0 0 0 0 0 1 0 0	04	Упакування АТМ
0 0 0 0 0 1 0 1	05	Упакування GFP
0 0 0 0 0 1 1 0	06	Віртуально конкатенований сигнал
0 0 0 0 1 0 0 1	09	Упакування GFP в OPU2 з розширеним полем корисного навантаження
0 0 0 0 1 0 1 0	0A	Упакування STM-1 в OPU0
0 0 0 0 1 0 1 1	0B	Упакування STM-4 в OPU0
0 0 0 1 0 0 0 0	10	Поток даних з виконанням синхронізації по байтах вхідного сигналу та OPUk
0 0 0 1 0 0 0 1	11	Потік даних без виконання синхронізації по байтах вхідного сигналу та OPUk
0 0 0 1 1 0 1 0	1A	Відображення SBCON/ESCON в OPU0
1 0 0 0 x x x x	80-8F	Зарезервовані коди для пропрієтарного використання
1 1 1 1 1 1 0 1	FD	Відображення нульової тестової послідовності
1 1 1 1 1 1 1 0	FE	Відображення ПСП послідовності

4.2.2 Упакування сигналів CBR2G5, CBR10G і CBR40G в OPUk

Трафік користувача упаковується в OPUk зі структурою, показаною раніше на рис. 4.9. Область корисного навантаження містить 4×3808 байт, включаючи байт позитивного вирівнювання швидкостей PJO. Сигнал вирівнювання швидкостей JC використовується для оброблення байтів NJO і PJO згідно з табл. 4.3.

Під сигналами CBR2G5, CBR10G і CBR40G надалі будемо мати на увазі лінійні сигнали синхронної цифрової ієрархії типу STM-16, STM-64 і STM-256 відповідно. Їхню упаковку в OPUk ($k = 1, 2, 3$) можна здійснювати двома способами:

- синхронно по бітам при відхиленні швидкості до ± 20 ppm;
- асинхронно по бітам при відхиленні швидкості до ± 45 ppm.

У випадку *асинхронного упакування*, OPUk формується з локально сформованого сигналу тактової частоти, який незалежний від вхідних сигналів

користувача. Для упаковки використовується схема позитивного, негативного або нульового узгодження швидкостей.

При *синхронному* упакованні сигнал тактової частоти виділяється із вхідних трибів CBR2G5, CBR10G і CBR40G. У цьому випадку упаковка здійснюється без можливості вирівнювання швидкостей у циклі OPUk: NJO містить байт вирівнювання швидкостей (фіксоване нульове значення), PJO містить байт даних і біти 7-8 JC дорівнюють 00.

Таблиця 4.3 – Стан бітів JC і байтів NJO і PJO при упакованні сигналів CBR

Біти 7–8 байта JC	Асинхронне упаковання		Синхронне упаковання	
	NJO	PJO	NJO	PJO
0 0	Байт узгодження	Байт даних	Байт узгодження	Байт даних
0 1	Байт даних	Байт даних	Не використовується	
1 0	Не використовується			
1 1	Байт узгодження	Байт узгодження		

Для виправлення одиничних помилок біти JC передаються три рази. У випадку використання байтів NJO / PJO для узгодження швидкостей, їх значення в передавачі встановлюється рівним 0 і приймач ігнорує вміст цих байтів.

Приклад упаковки сигналу CBR2G5 в OPU1 показаний на рис. 4.10. Біти вхідного сигналу групуються по 8 (всі 8 бітів можуть не відноситися до одного байта вхідного сигналу) в байти даних D, які і розміщуються в області корисного навантаження OPU1. В OPU2/OPU3 при упакованні сигналів CBR10G/CBR40G (рис. 4.11 і 4.12) вводяться додаткові байти фіксованого вирівнювання швидкостей FS (fixed stuff). Один раз за тривалість циклу OPU1/OPU2/OPU3 можливе проведення операції позитивного або негативного узгодження швидкостей.

	15	16	17	18	Стовбець	3824
	RES	JC	D			
1	RES	JC	D		3805D	D
2	RES	JC	D		3805D	D
3	RES	JC	D		3805D	D
4	PSI	NJO	PJO	D	3805D	D

Рисунок 4.10 – Упакування сигналу CBR2G5 в OPU1

	Стовбець										
	15	16	17		1904	1905		1920	1921		3824
Рядок	1	RES	JC	118 x 16D			16FS		119 x 16D		
	2	RES	JC	118 x 16D			16FS		119 x 16D		
	3	RES	JC	118 x 16D			16FS		119 x 16D		
	4	PSI	NJO	PJO	15D + 117x16D			16FS		119 x 16D	

Рисунок 4.11 – Упакування сигналу CBR10G в OPU2

	Стовбець														
	15	16	17		1264	1265	... 1280	1281		2544	2545	... 2560	2561	...	3824
Рядок	1	RES	JC	78 x 16D		16FS		79 x 16D		16FS		79 x 16D			
	2	RES	JC	78 x 16D		16FS		79 x 16D		16FS		79 x 16D			
	3	RES	JC	78 x 16D		16FS		79 x 16D		16FS		79 x 16D			
	4	PSI	NJO	PJO	15D + 77x16D		16FS		79 x 16D		16FS		79 x 16D		

Рисунок 4.12 – Упакування сигналу CBR40G в OPU3

Завдання 4.1. Для OPU_k ($k = 1, 2, 3$) розраховувати період проходження і швидкість передавання бітів області корисного навантаження.

Розв'язок.

При розробці рекомендацій ITU-T для ОТН виходили з можливості транспортування STM-16 за допомогою інформаційних структур першого рівня ієрархії. Тому пропускна здатність OPU1 складає

$$B_{\text{OPU1}} = B_{\text{STM-16}} = 270 \times 9 \times 8 \times 8000 \times 16 = 2488320000 \text{ біт/с.}$$

У загальному випадку, область корисного навантаження OPU_k містить байти вхідного трафіка та байти фіксованого вирівнювання швидкості (FS). Тому швидкість передавання області корисного навантаження OPU2 і OPU3 відповідно в $3808/(3808-16)$ і $3808/(3808-16 \times 2)$ рази більше швидкості вхідного сигналу (див. рис. 4.10 - 4.12). Для будь-якого значення k , збільшення швидкості передавання області корисного навантаження OPU_k за рахунок введення байтів узгодження FS можна виразити в наступному виді:

$$K_{FS}(k) = \frac{3808}{3808 - 16 \times (k - 1)} = \frac{238}{239 - k} \quad (4.1)$$

Період проходження OPU_k розрахуємо за формулою:

$$T_{\text{OPUk}} = \frac{N_{\text{біт OPUk}}}{B_{\text{кн_OPUk}}} = \frac{3808 \times 4 \times 8}{K_{FS}(k) \times N \times B_{\text{OPU1}}} \quad (4.2)$$

де N – кількість STM-16 в OPU_k ($N=1$ для OPU1; $N=4$ для OPU2; $N=16$ для OPU3);

$B_{\text{кн_OPUk}}$ – швидкість передавання біт області корисного навантаження OPU_k;

$N_{\text{біт OPUk}}$ – кількість біт в OPU_k (не залежить від рівня ієрархії k).

Підставивши (4.1) в (4.2) для OPU1 отримуємо:

$$T_{\text{OPU1}} = \frac{3808 \times 4 \times 8}{\frac{238}{238} \times 1 \times 2488320000} = 48,971193 \times 10^{-6} \text{ с.}$$

Проведемо аналогічні розрахунки для OPU2 і OPU3:

$$T_{\text{OPU2}} = \frac{3808 \times 4 \times 8}{\frac{238}{237} \times 4 \times 2488320000} = 12,191358 \times 10^{-6} \text{ с}$$

i

$$T_{\text{OPU3}} = \frac{3808 \times 4 \times 8}{\frac{238}{236} \times 4 \times 2488320000} = 3,034979 \times 10^{-6} \text{ с.}$$

Результати проведених розрахунків зведені в табл. 4.4. Період і частота проходження циклів зазначені приблизно з точністю до третього знака (за аналогії з даними Рек. ITU-T G.709).

Таблиця 4.4 – Параметри OPU_k

Тип OPU	Швидкість передачі області корисного навантаження, кбіт/с	Період проходження T_{OPU} , мкс	Частота проходження, кГц
OPU1	2488320	48,971	20,420
OPU2	238/237×9953280	12,191	82,025
OPU3	238/236×39813120	3,035	329,491
OPU4	238/227×99532800	1,168	856,387

4.2.3 Упакування кадрів GFP в OPU_k

Упакування кадрів GFP в область корисного навантаження OPU_k ($k = 0, 1, 2, 3, 4$, flex) здійснюється побайтово. Оскільки кадри GFP мають змінну довжину, вони можуть займати два послідовно передані блоки OPU_k. У потік кадрів GFP додаються порожні кадри для узгодження швидкості із пропускнуою здатністю області корисного навантаження OPU_k. Перед упакуванням потік інформаційних і порожніх кадрів GFP скремблюється.

Заголовок OPU_k (рис. 4.13) складається з ідентифікатора структури навантаження PSI, який містить байт типу навантаження PT та індикатор аварії трибутарного сигналу CSF. Інші 254 байти та 7 бітів PSI[2] зарезервовані (RES). Область корисного навантаження містить 4×3808 байтів. Оскільки в заголовку OPU_k є 7 зарезервованих бітів, їх можна використовувати для передавання трафіка. Рекомендація ITU-T G.709 припускає формування блока OPU2 з розширеною областю корисного навантаження, що містить 4×3808 байтів плюс 7 байтів із заголовка OPU2 (рис. 4.14).

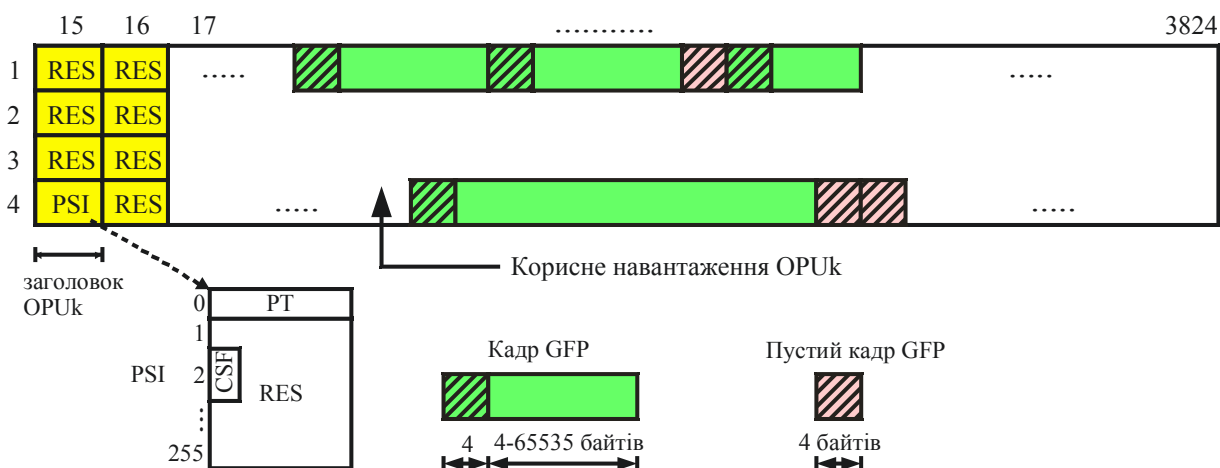


Рисунок 4.13 – Формат OPUk при упакованні кадрів GFP

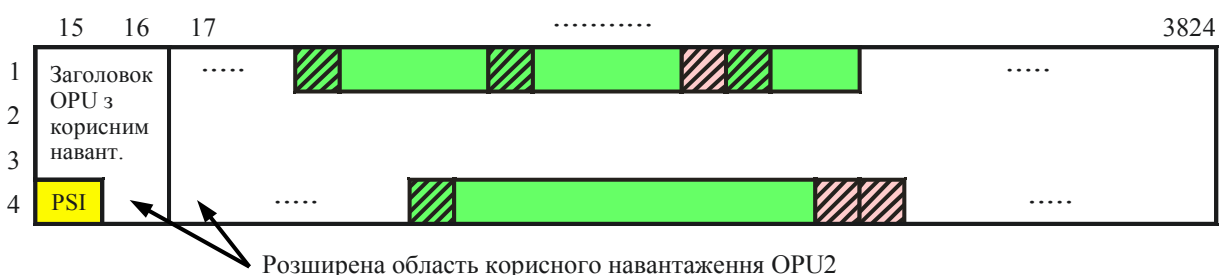


Рисунок 4.14 – Формат блока OPU2 з розширеною областю корисного навантаження при упакованні кадрів GFP

4.2.4 Віртуальна конкатенація OPUk

Для гнучкої організації каналів з необхідною пропускною здатністю застосовується віртуальна конкатенація блоків OPUk. Стандартом OTN передбачена можливість формування блока OPUk-Xv ($k = 1...3$; $X = 1...256$) і наступне транспортування складових блоків OPUk по незалежних маршрутах, аналогічно технології NG-SDH. Керування передачею групи блоків OPUk здійснюється за допомогою схеми керування пропускною здатністю лінії LCAS.

Блок OPUk-Xv є матрицею розміром $3810 \times X$ стовбців і 4 рядки, що містить по одному байту в кожній чарунці (рис. 4.15) і складається із двох частин:

- 1) заголовок – стовпці від $(14X + 1)$ до $16X$;
- 2) область корисного навантаження - стовпці від $(16X + 1)$ до $3824X$ з пропускною здатністю

$$B_{\text{пн OPUk-Xv}} = B \frac{238}{(239 - k)} \times 4^{(k-1)} \times 2388320 \text{ кбіт/с.} \quad (4.3)$$

Область корисного навантаження блока OPUk-Xv побайтово демультиплексується на X окремих блоків OPUk. Всі OPUk мають різний час затримки проходження сигналу, тому на прийманні виконується їхнє вирівнювання в часі з метою безпомилкового доступу до корисного навантаження.

Заголовок кожного блоку OPUk (рис. 4.16, а) складається з наступних чотирьох полів: ідентифікатора структури навантаження PSI, заголовка віртуального зчіплювання VCON (рис. 4.16, б) і допоміжної інформації в стовпці 16 (наприклад, біти вирівнювання швидкостей JC і NJO при асинхронному упакованні).

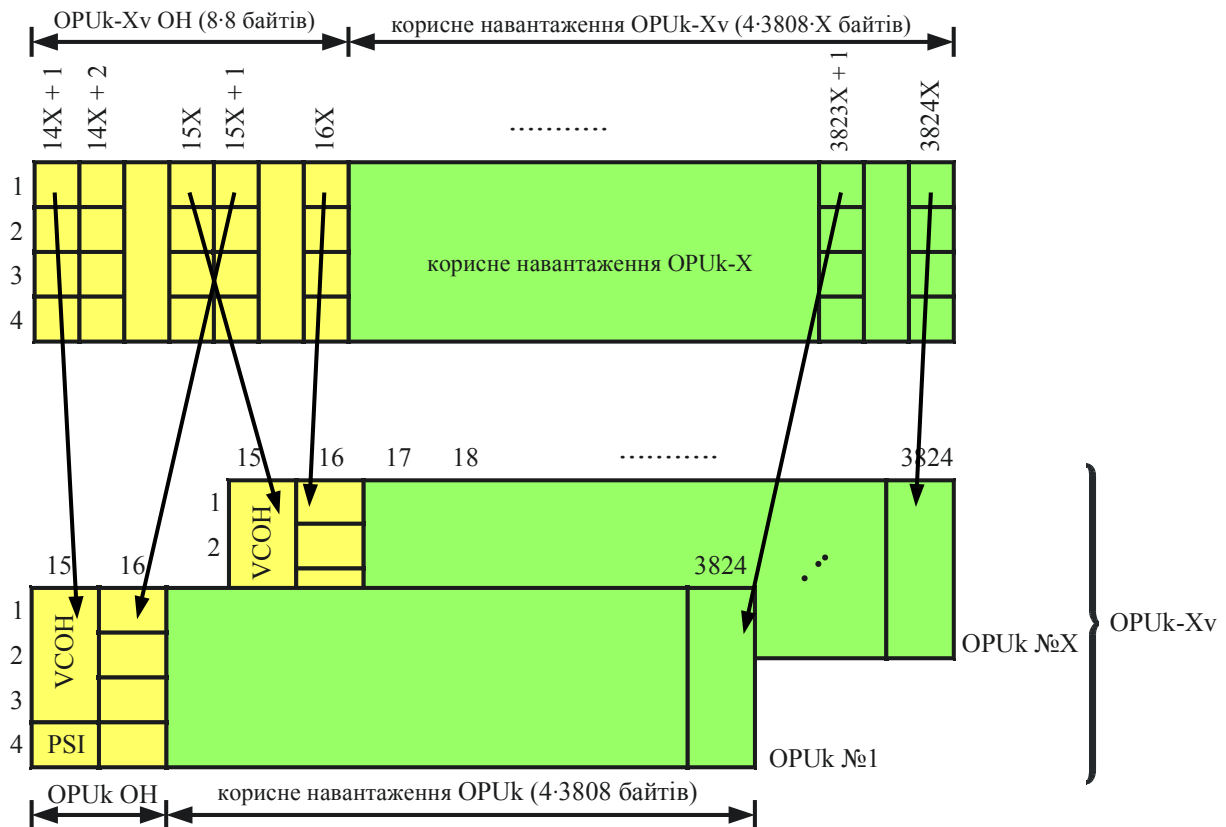


Рисунок 4.15 – Структура блока OPUk-Xv

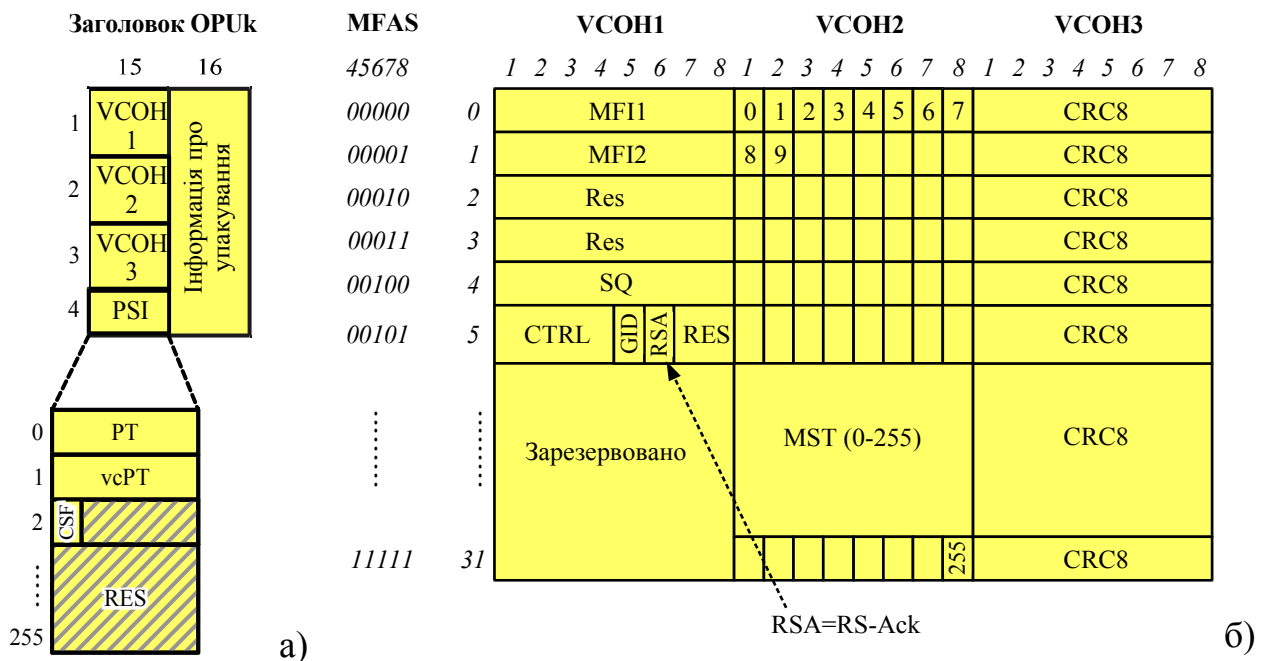


Рисунок 4.16 – Заголовок блока OPUk-Xv:
а) загальна структура; б) структура байт VCON1-VCON3

Ідентифікатор структури навантаження PSI складається зі стандартних байта PT і біта індикатора аварії сигналу користувача CSF. В PSI[1] розміщується байт показчика типу корисного навантаження vcPT (payload type), який показує тип завантаженого в OPUk-Xv трафіка. В табл. 4.5 надані кодові комбінації даного байта для розповсюджених типів трафіка. Зарезервовані байти RES на даний момент містять 0 в усіх розрядах.

Таблиця 4.5 – Кодові комбінації показчика типу навантаження vcPT

Кодове слово vcPT		Примітка
BIN	HEX	
0 0 0 0 0 0 0 1	01	Експериментальне використання
0 0 0 0 0 0 1 0	02	Асинхронне упакування CBR сигналів
0 0 0 0 0 0 1 1	03	Синхронне упакування CBR по бітах
0 0 0 0 0 1 0 0	04	Упакування трафіка АТМ
0 0 0 0 0 1 0 1	05	Упакування кадрів GFP
1 1 1 1 1 1 0 1	FD	Упакування тестового сигналу з нульовими значеннями
1 1 1 1 1 1 1 0	FE	Упакування тестової псевдовипадкової послідовності

Заголовок VCON складається із трьох байтів VCON1-VCON3, які організовані в надцикл для транспортування структури розміром 3×32 байти (рис. 4.16, б). Всі три байти, розміщені в одному рядку та передаються в одному OPUk. Передача матриці VCON синхронізована із сигналом надциклової синхронізації MFAS (Multiframe Alignment Signal), розташованим у заголовку OTUk. Нумерація циклів здійснюється шляхом використання останніх 5 біт з номерами 4–8 сигналу MFAS. Структура VCON повторюється 8 разів усередині надцикла, що містить 256 циклів і служить для передавання сигналізації схеми LCAS. Розглянемо призначення відповідних заголовків докладніше:

1) Для виміру та компенсації диференціальної затримки проходження сигналу між елементами однієї групи VCG виконується обробка сигналів синхронізації MFAS, MFI1 і MFI2 двома етапами. *Перший етап* передбачає використання MFAS, який є лічильником від 0 до 255 та інкримінується в кожному циклі ODUk. *На другому етапі* використовуються однобайтові поля MFI1/MFI2 заголовка VCON для організації 16-бітного лічильника (MFI1 – старший байт, MFI2 – молодший байт), що набуває значення від 0 до 65535. Інкримінування відбувається на початку кожного надциклу при MFAS = 0, що дозволяє організувати надцикл із $2^{24}=16777216$ ODUk/OPUk. На початку OPUk-Xv значення лічильників MFI1 і MFI2 однакові для всіх OPUk, що входять до його складу. Описаний процес ресинхронізації дозволяє компенсувати диференціальну затримку від 125 мкс.

2) Індикатор послідовності SQ ідентифікує порядок, у якому окремі OPuk поєднуються при формуванні блока OPuk-Xv. Кожний блок OPuk має окремий фіксований номер послідовності в діапазоні від 0 до (X-1). При організації каналів з фіксованою пропускнуою здатністю кожному OPuk надається фіксований номер SQ без можливості його зміни в процесі функціонування.

3) Керуюче слово CTRL передається 1–4 бітами байта VCON1[5] і служить для синхронізації передавача і приймача елемента групи VCG.

4) Поле стану елемента (MST) є сигналом для інформування передавача LCAS про стан відповідного йому приймача. Кожному OPuk виділяється один біт у байті VCON2 циклів 0–31. Передача сигналів MST усіх можливих 256 елементів OPU1 групи VCG ($X_M=256$) займає $48,971 \times 32 = 1567,072$ мкс.

5) Ідентифікатор групи GID дозволяє приймачу LCAS здійснювати перевірку, що всі вхідні дані надходять від одного передавача. Сигнал передається за допомогою біта 5 байта VCON1[5].

6) Біт підтвердження зміни послідовності RS-ACK передається від приймача до передавача для підтвердження зміни номера в послідовності SQ.

7) Циклічний надлишковий код CRC обчислюється для байт VCON1/VCON2 за поліномом $x^8 + x^3 + x^2 + 1$ і передається байтом VCON3.

Формат блока OPuk-4v для упакування сигналів CBR з постійною швидкістю типу STM-64/256 показаний на рис. 4.17. Він дозволяє виконувати синхронне або асинхронне передавання, для чого передбачені байти JC, NJO і PJO. Пропускню здатність можна розрахувати за виразом (4.3).

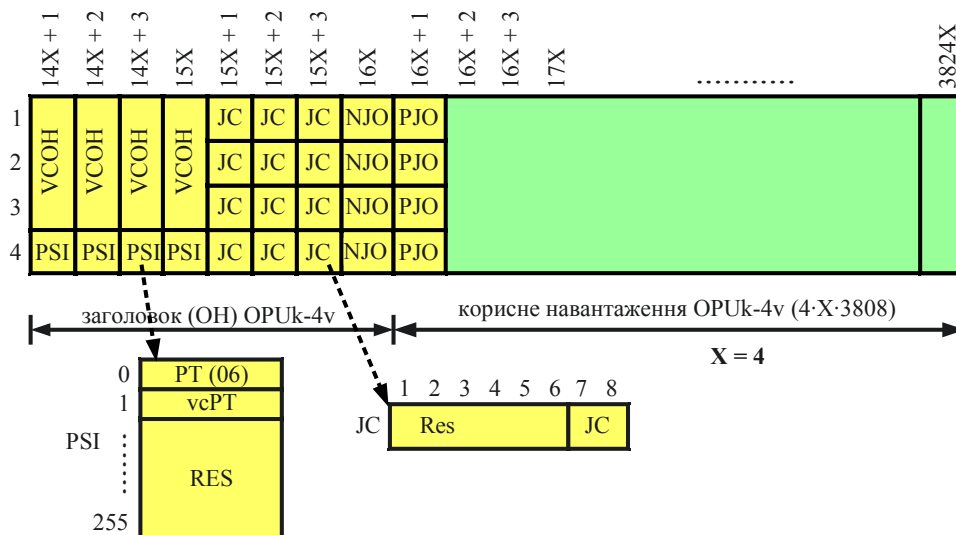


Рисунок 4.17 – Заголовок блока OPuk-Xv

4.3 Блок даних оптичного каналу ODU

Блок даних оптичного каналу ODUk – це інформаційна структура ОТН, яка використовується для транспортування корисного навантаження (OPuk) і виконує наступні функції:

- моніторинг тракту транспортування OPuk;

- організацію тандемних (транзитних) з'єднань у випадку організації маршруту оптичного каналу з окремих фрагментів, що належать різним операторам зв'язку;
- автоматичне захисне переключення (APS);
- організація загальних каналів зв'язку для передавання додаткової службової інформації оператора зв'язку.

Маршрут ODUkP (ODUk path) представляє інформаційну структуру, яка використовується для створення та підтримки тракту ODUk між точками закінчення маршруту. Організований тракт може бути одно- або двонаправлений, включаючи фрагменти користувача та оператора мережі зв'язку.

Заголовок ODUk включає наступні службові поля (рис. 4.18):

- моніторинг тракту PM (path monitoring);
- моніторинг тандемного з'єднання TCMi ($i = 1, 2, \dots, 6$) (tandem connection monitoring);
- автоматичного захисного перемикачання і каналу захисту APS/PCC ODUk (automatic protection switching and protection communication channel);
- загальних каналів зв'язку GCC1, GCC2 (general communication channels);
- повідомлення про тип пошкодження і трансляції локального пошкодження каналу зв'язку FTFL (ODUk fault type and fault location reporting communication channel). Розглянемо ці поля детальніше.

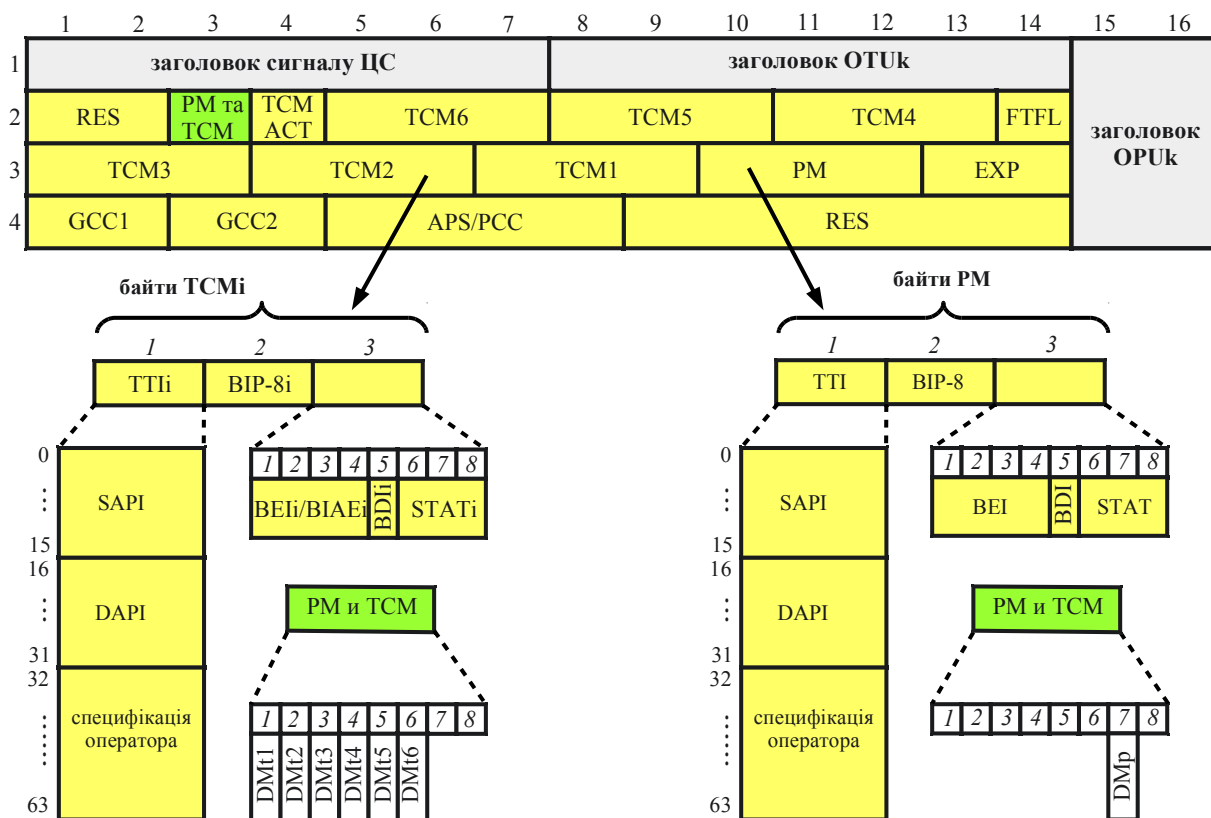


Рисунок 4.18 – Заголовок блока даних ODUk

Заголовок моніторингу тракту РМ передачі ODUk містить три байти в рядку 3, стовбці 10–12. На додаток до нього також використовується додатковий **заголовок РМ і ТСМ** – один біт № 7 байта, розміщеного в рядку 2, стовпець 3. У свою чергу, заголовок моніторингу тракту РМ містить наступні елементи:

1) **однобайтовий ідентифікатор маршруту траси ТТІ** (trail trace identifier), який використовується для організації циклу ТТІ – інформаційної структури розміром в 64 байти (рис. 4.17). Положення циклів ТТІ узгоджується із сигналом синхронізації ODUk/OTUk, який дозволяє створювати надцикл із 256 циклів ODUk/OTUk. В одному надциклі ODUk/OTUk розташовується $256/64 = 4$ циклів ТТІ по 64 байта в кожному. Перші 16 байтів циклу ТТІ служать для передавання ідентифікатора точки доступу джерела SAPI (source access point identifiers), а наступні 16 байт - для передавання ідентифікатора точки доступу призначення DAPI (destination access point identifiers). Байти SAPI[0] і DAPI[0] завжди містять нульове значення. Інші 15 байтів містять ідентифікатор відповідної точки доступу (access point) до мережі (табл. 4.6).

Ідентифікатор точки доступу складається з 15 символів (байтів) – три символи міжнародного сегмента та 12 символів національного сегмента. Всі символи використовують 7–бітне кодування символів для обміну інформацією (Рек. ITU-T T.50). Міжнародний сегмент ідентифікатора містить 3 символи коду країни згідно з ISO 3166 (наприклад, UKR, USA, FRA і т.д.). Поле національного сегмента складається з двох частин: коду МСЕ оператора зв'язку ICC (ITU carrier code) згідно з Рек. ITU-T M.1400 та унікального коду точки доступу UAPC (unique access point code).

Таблиця 4.6 – Структура ідентифікатора точки доступу

Номер байта SAPI/DAPI														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Міжнародний сегмент			Національний сегмент											
СС			ICC	UAPC										
СС			ICC		UAPC									
СС			ICC			UAPC								
СС			ICC				UAPC							
СС			ICC					UAPC						
СС			ICC						UAPC					
СС			ICC							UAPC				

2) **контроль парності з перемешуванням ВІР-8** (bit interleaved parity) служить для контролю якості передавання OPUk в області корисного навантаження ODUk. Алгоритм розрахунку контрольної суми ВІР-8 аналогічний SDH, однак контрольне слово циклу i передається із затримкою – у циклі $(i + 2)$ згідно з рис. 4.19.

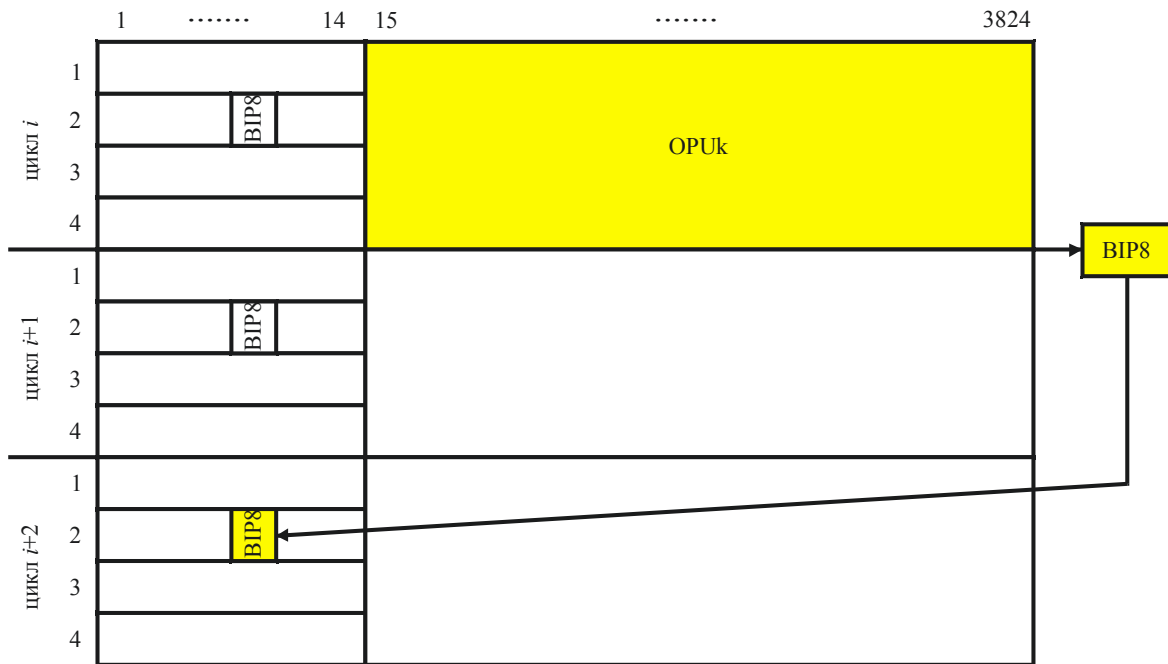


Рисунок 4.19 – Передача контрольного слова BIP-8 заголовка ODUk

3) однобітове поле **індикації дефекту (пошкодження) у зворотному напрямку BDI** (backward defect indication) служить для передавання сигналу статусу аварії, сформованого функцією закінчення маршруту у вихідному (в бік передавача) напрямку. BDI = 1 при виявленні аварії, в інших випадках BDI = 0.

4) **індикація помилки у зворотній напрямок BEI** (backward error indication) служить для передавання у вихідному напрямку інформації про кількість виявлених за допомогою BIP-8 помилок. BEI може набувати значення 0...8.

5) **біти статусу STAT** (status bits), що вказують на наявність сигналу технічного обслуговування (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Інтерпретація статусу ODUk

Біти 6-8 байта № 3 поля PM	Статус
0 0 0	Зарезервовано для стандартизації в майбутньому
0 0 1	Сигнал тракту в нормальному режимі
0 1 0 - 1 0 0	Зарезервовано для стандартизації в майбутньому
1 0 1	Сигнал обслуговування: ODUk-LCK
1 1 0	Сигнал обслуговування: ODUk-OCI
1 1 1	Сигнал обслуговування: ODUk-AIS

Біт вимірювання затримки в тракті DMP (path delay measurement) міститься в заголовку **PM/TCM** і служить для тестування розповсюдження сигналу по тракту ODUk. Сигнал DMP має постійне значення (0 або 1), яке

інвертується на початку процедури вимірювання затримки. У такий спосіб зміна $0 \rightarrow 1$ у послідовності ...0000011111... або зміна $1 \rightarrow 0$ у послідовності ...1111100000... відповідає моменту початку процедури вимірювання. Встановлене значення біта зберігається до початку наступної процедури вимірювання затримки. Процес тестування показаний на рис. 4.20.

Рисунок 4.20 – Вимірювання затримки в тракті ODUk

Передавач мережного елемента 1 у момент часу t_1 інвертує стан біта DMr на одиницю. У момент часу t_2 він надходить на далекий кінець лінії (вхід приймача мережного елемента 2), де створений шлейф каналу DMr. Приймач мережного елемента 1 фіксує момент часу t_3 приходу інвертованого стану біта DMr. Слід зазначити, що однобічна затримка не дорівнює половині двосторонньої затримки, тобто $t_2 - t_1 \neq t_3 - t_2$, оскільки маршрути ОН створюють за симплексним принципом.

У розглянутому прикладі TCM1 використовується клієнтом для моніторингу QoS. TCM2 використовується оператором А для контролю якості з'єднання "з кінця в кінець" маршруту ODUk. TCM3 використовується для контролю якості передачі в межах фрагмента одного оператора зв'язку. І нарешті, TCM4 використовується оператором А для організації моніторингу захисного перемикавання. На даний момент процедура адміністративної організації між операторами TCM не стандартизована, хоча наявність заголовків TCM технічно дозволяє створювати таку можливість.

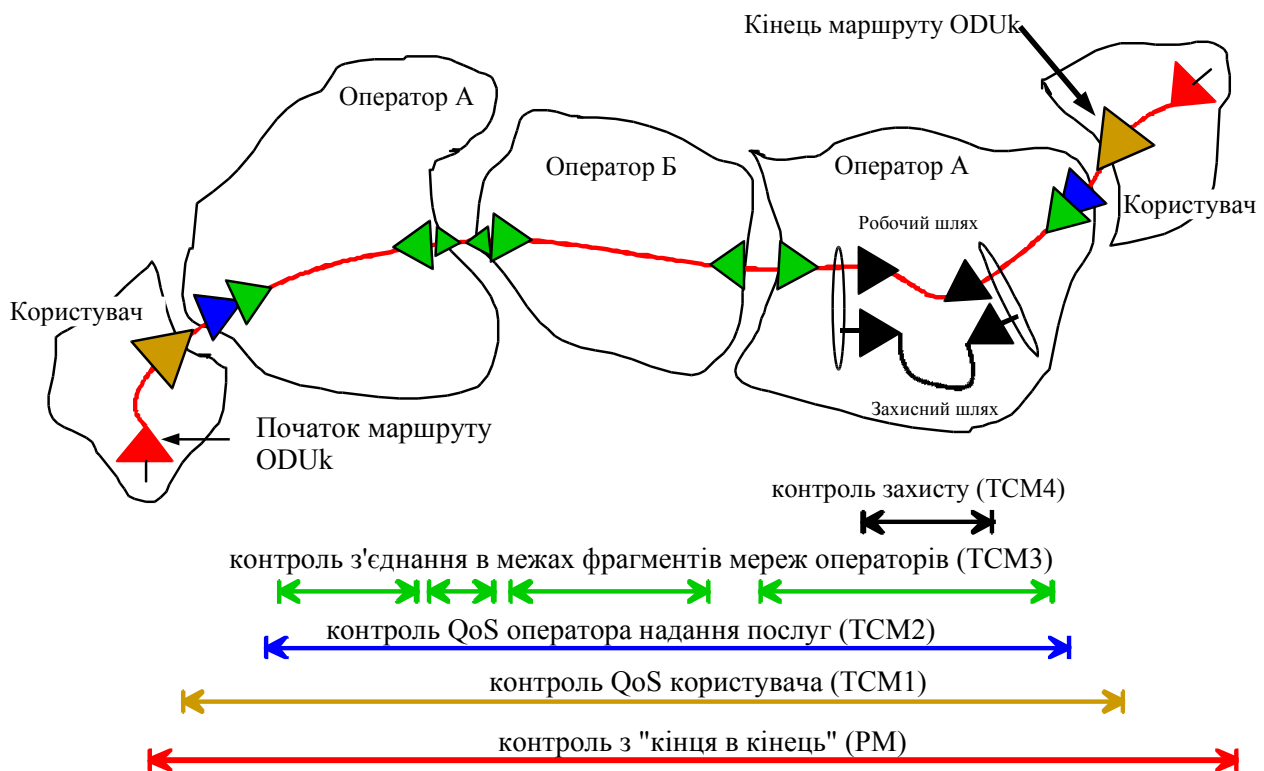


Рисунок 4.21 – Використання полів PM і TCM для секціонування траси ODUk

TCM також підтримує моніторинг з'єднань ODUk для наступних мережних додатків (згідно з Рек. ITU-T G.805 і Рек. ITU-T G.872):

- з'єднань UNI — UNI (моніторинг з'єднання через транспортну мережу загального користування від точки входу до точки виходу);
- з'єднань NNI to NNI (моніторинг з'єднання ODUk через мережу оператора від точки входу до точки виходу);
- моніторинг підрівня (sublayer) для лінійного 1+1, 1:1 і 1:n захисту з'єднання підмережі з метою виявлення аварії сигналу або деградації його параметрів якості;
- моніторинг підрівня ODU для організації захисного переключення SPRing, виявлення ушкоджень і випадків погіршення параметрів якості сигналу;
- моніторинг тандемного з'єднання оптичного каналу для можливості виявлення випадків деградації сигналу або його зникнення (з локалізацією пошкодження) у комутованому з'єднанні, оптичного каналу та ініціювання наступного автоматичного відновлення з'єднання під час аварій у мережі.

Кількість контрольованих з'єднань уздовж маршруту ODUk може змінюватися від 0 до 6. Самі ж з'єднання можуть бути наступних трьох типів: вкладені, перекриті та каскадні. Організація вкладених і каскадних з'єднань показана на рис. 4.22. Контрольовані з'єднання A1-A2/B1-B2/C1-C2 і A1-A2/B3-B4 є вкладеними, а B1-B2/B3-B4 – каскадними.

вказаних інформаційних структур індивідуально підбираються фірмами-розробниками обладнання. Загальна структура інформації, що передається в каналі OSC показана на рис. 4.24.

Безпосередньо в каналі OSC передаються наступні види інформації:

1) *загальне керування зв'язком* (General management communications, COMMS). В залежності від структури побудови мережі керування оператора зв'язку, інформація COMMS може також передаватися в каналі OSC. Тому даний канал для деяких додатків дозволяє транспортувати інформацію про керування зв'язком, яка може включати: сигналізацію, голосовий зв'язок, завантаження програмного забезпечення та інше;

2) *канал повідомлень синхронізації* (OTN synchronisation message channel, OSMC) використовується для передавання повідомлень мережі синхронізації (SSM) та протоколу точного часу (Precision Time Protocol, PTP);

3) *заголовки інформаційних структур* OTS-O, OMS-O, OCh-O та OTSiG-O.

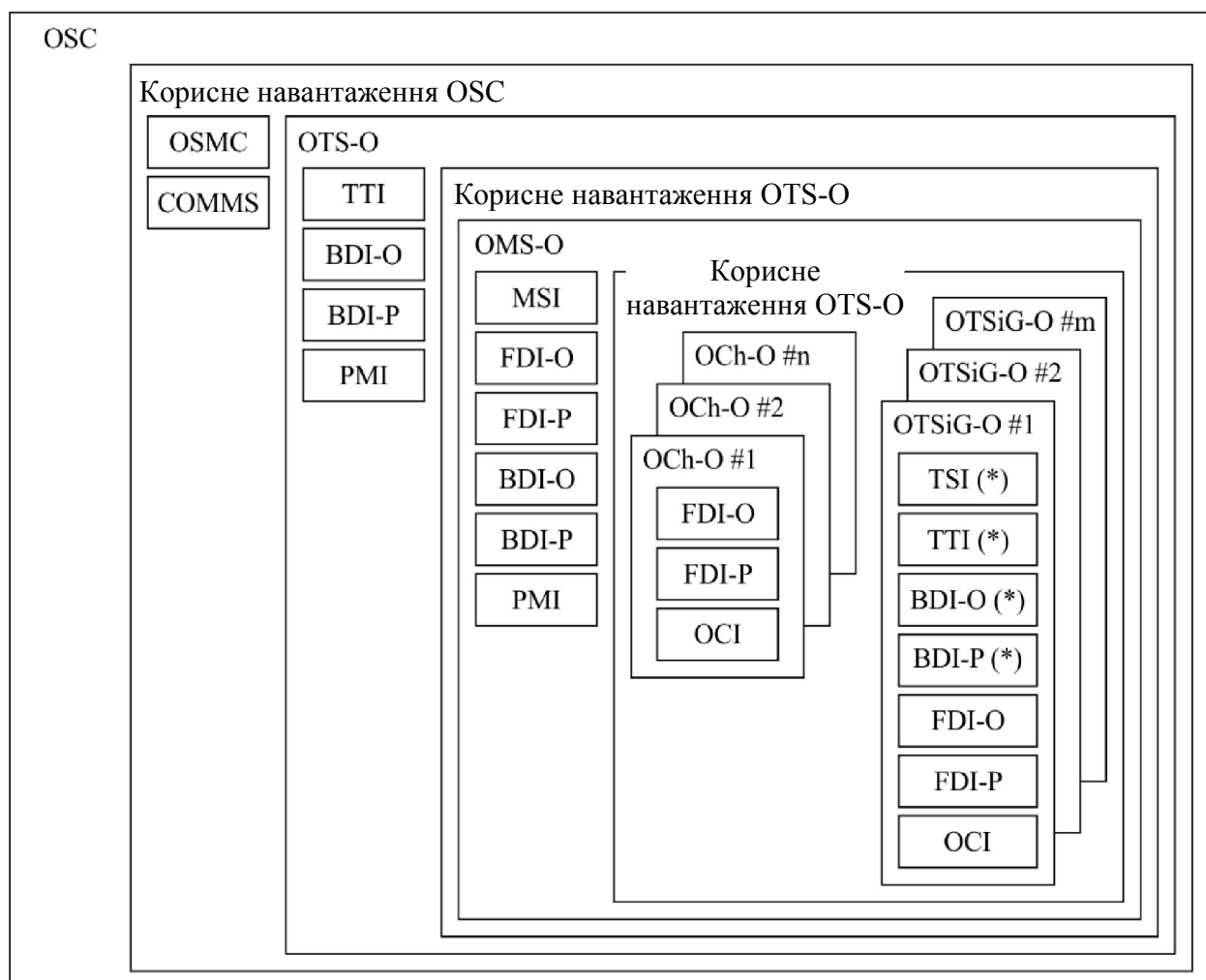


Рисунок 4.24 – Структура заголовків OTS-O, OMS-O, OCh-O та OTSiG-O в каналі OSC

Заголовок OTS-O містить неасоційовану інформацію, яка супроводжує корисне навантаження OTS-P. Він містить інформацію про обслуговування та експлуатаційну інформацію для підтримки функціонування оптичної секції передавання OTS. Закінчення секції OTS-O знаходяться в точках вводу-виводу сигналу OTS-P.

В OTS-O знаходяться наступні інформаційні елементи:

- ідентифікатор маршруту траси OTS-TTI;
- індикації дефекту (пошкодження) у зворотному напрямку OTS-BDI-P та OTS-BDI-O;
- індикатор відсутності корисного навантаження (payload missing indication, OTS-PMI), який вказує на відсутність факту введення сигналу корисного навантаження з метою подальшої заборони формування службового повідомлення про втрату сигналу.

Заголовок OMS-O містить неасоційовану інформацію, яка супроводжує корисне навантаження OMS-P. Містить інформацію про обслуговування та експлуатаційну інформацію для підтримки функціонування оптичної мультиплексної секції OMS. Заголовок OMS-O формується в точках введення-виведення сигналу корисного навантаження OMS-P.

В OMS-O знаходяться наступні інформаційні елементи:

- OMS-FDI-P;
- OMS-FDI-O;
- OMS-BDI-P;
- OMS-BDI-O;
- OMS-PMI;
- OMS-MSI.

Сигнали *індикації пошкодження в прямому напрямку* (forward defect indication, FDI) використовуються для моніторингу рівня OMS для попередження формування сигналів аварії вхідного напрямку, що викликані детектуванням пошкоджень вихідного сигналу на серверному рівні та переривають приймання сигналу корисного навантаження клієнта. Сигнал FDI передається у вхідному напрямку як індикатор наявності дефекту у вихідному напрямку.

Поле індикації дефекту у зворотному напрямку BDI передається у вихідному напрямку для індикації наявності проблеми з прийомом корисного навантаження OMS-P, яка виявлена функцією закінчення маршруту OMS-P.

Ідентифікатор структури мультиплексування OMS (multiplex structure identifier, MSI) використовується в передавачі для кодування формату OCh-P/OTSiG та відповідних частотних слотів навантаження OMS-P. Він передається у вхідному напрямку з метою виявлення неузгодженості в структурі мультиплексування сигналу між приймачем і передавачем.

Список літератури

1. Бакланов И.Г. NGN: принципы построения и организации / Бакланов И.Г.; под ред. Ю.Н. Чернышова. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 400 с.
2. Бакланов И.Г. SDH → NGSDH: практический взгляд на развитие транспортных сетей / Бакланов И.Г. – М.: Метротек, 2006. – 736 с.
3. Сети следующего поколения NGN / [Росляков А.В., Самсонов М.Ю., Шибеева И.В. и др.]. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 424 с.
4. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения / Ю.В.Семенов. – СПб.:Наука и Техника, 2005. – 240 с.
5. Будылдина Н.В. Технологии глобальных компьютерных сетей. – Учеб. пособ. / Будылдина Н.В.. – Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2006. – 264 с.
6. Рекомендація МСЕ-Т Y.110. Global Information Infrastructure principles and framework architecture (Принципи та архітектура глобальної інформаційної інфраструктури).
7. Рекомендація МСЕ-Т Y.101. Global Information Infrastructure terminology: Terms and definitions (Глобальна інформаційна інфраструктура: Терміни та визначення).
8. Битнер В.И. Лекции по дисциплине "Сети следующего поколения" / Битнер В.И. – Новосибирск: СибГУТИ, 2008. – 252 с.
9. Рекомендація МСЕ-Т Y.2001. Общий обзор СПП.
10. Рекомендація МСЕ-Т Y.2091. Terms and definitions for Next Generation Networks (Терміни та визначення для Мереж Наступного Покоління).
11. Рекомендація МСЕ-Т Y.2011. General principles and general reference model for Next Generation Networks (Основні принципи та опорна модель для Мереж Наступного Покоління)
12. Рекомендація МСЕ-Т Y.2012. Functional requirements and architecture of next generation networks (Функціональні вимоги та архітектура для Мереж Наступного Покоління).
13. Рекомендація МСЕ-Т Y.2031. Архитектура эмуляции сетей КТСОП/ЦСИС.
14. Рекомендація МСЕ-Т G.707/Y.1322. Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH) (Інтерфейси вузлів мережі для синхронної цифрової ієрархії SDH).
15. Рекомендація МСЕ-Т G.7042/Y.1305. Схема регулировки пропускной способности линии (LCAS) для виртуальных сцепленных сигналов.
16. Рекомендація МСЕ-Т X.85/Y.1321. IP over SDH using LAPS (IP поверх SDH з використанням LAPS).
17. Рекомендація МСЕ-Т X.86/Y.1323. Ethernet over LAPS (Ethernet через LAPS).
18. Рекомендація МСЕ-Т G.7041/Y.1303. Generic framing procedure (GFP) (Основна процедура фреймування (GFP)).
19. Рекомендація МСЕ-Т G.872. Architecture of optical transport networks (Архітектура оптичних транспортних мереж).
20. Рекомендація МСЕ-Т G.870/Y.1352. Terms and definitions for optical transport networks (OTN) (Терміни та визначення для оптичних транспортних мереж (OTN)).

Навчальне видання

Педяш Володимир Віталійович

Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління

Конспект лекцій

Редактор Л.А. Кодрул
Комп'ютерне верстання Ж.А. Гардиман