

**С.І. Приходько, О.С. Жученко,
О.В. Сєверінов, О.М. Усачов**

**ЦИФРОВІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ,
КОМУТАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Харків 2009



УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

С.І. Приходько, О.С. Жученко,
О.В. Сєверінов, О.М. Усачов

**ЦИФРОВІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ,
КОМУТАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів
вищих навчальних закладів*

За загальною редакцією В.І. Басова

Харків 2009

УДК 621.391.2(075.8)

ББК 32.81я73

Ц-752

Цифрові системи передачі, комутації та управління:
Навчальний посібник / С.І. Приходько, О.С. Жученко,
О.В. Северінов, О.М. Усачов; За заг. ред. В.І. Басова. – Харків:
УкрДАЗТ, 2009. – 270 с.

ISBN 5-7763-0082-7

Розглядаються цифрові методи передачі інформації та принципи побудови цифрових систем передачі, що використовуються на залізничному транспорті. Велика увага приділяється системам мультиплексування. Викладені основи побудови існуючих та перспективних цифрових транспортних мереж, зокрема широкосмугових цифрових мереж інтегрального обслуговування.

Для студентів та слухачів Української державної академії залізничного транспорту.

Іл. 173, табл. 14, бібліогр.: 20 назв.

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів
(№ 1.4/18-Г-2047 від 23 листопада 2007 року)*

За загальною редакцією В.І. Басова

Рецензенти:

доктор фіз.-мат. наук, професор С.В. Смеляков (ХУПС),
доктор техн. наук, професор І.Д. Горбенко (ХНУРЕ)

©Українська державна академія

залізничного транспорту, 2009.

Приходько Сергій Іванович,
Жученко Олександр Сергійович,
Северінов Олександр Васильович,
Усачов Олександр Михайлович

ЦИФРОВІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ, КОМУТАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Відповідальний за випуск Жученко О.С.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 21.04.08 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 14,5. Обл.-вид.арк. 14,75.

Замовлення № Тираж 250. Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.

Друкарня УкрДАЗТу,
61050, Харків - 50, пл. Фейєрбаха, 7

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	11
1. ПРИЗНАЧЕННЯ, СПОСОБИ ПОДАННЯ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ.....	15
1.1. Транспортні мережі та їх функції	15
1.2. Способи подання транспортних мереж	17
1.3. Технічні засоби транспортних мереж.....	20
2. ПРИНЦИПИ РОЗДІЛЕННЯ КАНАЛІВ.....	22
2.1. Загальні характеристики сигналів.....	22
2.1.1. Визначення та принципи класифікації сигналів	22
2.1.2. Основні характеристики та способи опису сигналів	28
2.1.3. Класифікація цифрових сигналів з точки зору часових співвідношень між ними.....	33
2.2. Загальна схема методів розділення сигналів (каналів)...	35
2.3. Частотне розділення каналів	36
2.3.1. Загальні принципи частотного розділення каналів ...	36
2.3.2. Оптичне частотне мультиплексування.....	41
2.3.3. Техніка оптичного частотного мультиплексування ..	43
2.4. Часове розділення каналів	51
2.4.1. Загальні принципи часового розділення каналів	51
2.4.2. Синхронне та асинхронне об'єднання цифрових потоків.....	56
2.4.3. Організація циклової структури цифрового потоку ..	61
2.4.4. Синхронний і асинхронний режими організації передачі	63
2.4.5. Оптичне часове мультиплексування.....	65
2.5. Кодове розділення каналів	67
2.5.1. Загальні принципи кодового розділення каналів.....	67
2.5.2. Системи оптичного множинного доступу з кодовим розділенням каналів	71

3. ЦИФРОВА КОМУТАЦІЯ.....	73
3.1. Призначення та функції цифрової комутації	73
3.2. Просторова комутація.....	74
3.3. Багатоланкові комутаційні схеми	78
3.4. Цифрова комутація каналів з часовим розділенням	84
3.5. Двокоординатна комутація.....	90
3.6. Складність реалізації комутаційних схем з часовим розділенням	92
3.7. Комутаційні схеми типу простір – час – простір та час – простір – час	94
4. СИСТЕМИ ПЕРВИННОГО ГРУПОУТВОРЕННЯ	104
4.1. Загальні принципи побудови систем первинного групоутворення.....	104
4.2. Структура циклу апаратури первинного групоутворення.....	106
4.3. Апаратурна реалізація систем первинного групоутворення.....	114
5. ПЛЕЗІОХРОННА ЦИФРОВА ІЄРАРХІЯ PDH	122
5.1. Технологія плезіохронної цифрової ієрархії PDH	122
5.2. Структура кадру вторинної системи мультиплексування ІКМ-120	126
5.3. Основні недоліки плезіохронних систем мультиплексування.....	128
6. СИНХРОННА ЦИФРОВА ІЄРАРХІЯ SDH.....	129
6.1. Технологія синхронної цифрової ієрархії SDH.....	129
6.2. Структура синхронних транспортних модулів STM	133
6.3. Основні елементи STM-1.....	137
6.4. Принципи розміщення контейнерів і блоків STM-1.....	142
6.5. Розміщення цифрових потоків PDH у контейнерах SDH.....	148
6.6. Трактовий і секційний заголовки. Показчики.....	152
6.7. Виявлення помилок у системі SDH	162
6.8. Апаратура мереж SDH.....	164
6.9. Базові топології мереж SDH.....	170
6.10. Забезпечення відмовостійкості мереж SDH.....	173
6.11. Архітектура мереж SDH	177

7. ТЕХНОЛОГІЯ АТМ	182
7.1. Основи технології АТМ.....	182
7.2. Еталонна конфігурація широкосмугової цифрової мережі інтегрального обслуговування	186
7.3. Еталонна модель протоколів широкосмугової цифрової мережі інтегрального обслуговування.....	192
7.4. Фізичний рівень	196
7.5. Рівень АТМ.....	205
7.6. Рівень адаптації АТМ	214
7.7. Архітектурні аспекти побудови мереж АТМ.....	224
8. СИНХРОНІЗАЦІЯ В ЦИФРОВИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ	232
8.1. Основні поняття й визначення	232
8.2. Основні схеми розподілу сигналів синхронізації	233
8.3. Відновлення тактової частоти	238
8.4. Основні методи синхронізації.....	242
8.5. Особливості синхронізації мереж SDH	245
9. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖАМИ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ TMN	254
9.1. Загальні принципи TMN.....	254
9.2. Функціональна архітектура TMN	268
9.3. Інформаційна архітектура TMN.....	260
9.4. Фізична архітектура TMN	262
9.5. Практична реалізація TMN.....	264
9.6. Особливості побудови систем управління мережами SDH.....	264
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	269

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АІМ	– амплітудно-імпульсна модуляція
АПЧ	– автоматичне підстроювання частоти
АТС	– автоматична телефонна станція
АЦО	– аналого-цифрове обладнання
АЦП	– аналого-цифровий перетворювач
ВТЧ	– виділювач тактової частоти
ГЗ	– генератор задавальний
ГКН	– генератор, керований напругою
ЗП	– запам'ятовуючий пристрій
ІКМ	– імпульсно-кодова модуляція
КІ	– канальний інтервал
ЛОМ	– локальна обчислювальна мережа
ОЦК	– основний цифровий канал
ПВП	– псевдовипадкова послідовність
ПЧП	– комутаційна схема простір-час-простір
РПН	– регенераційний пункт, що не обслуговується
РПО	– регенераційний пункт, що обслуговується
СУВ	– сигнал управління й взаємодії
УТС	– установка телефонна станція
ВЦМІО	– вузькосмугова цифрова мережа інтегрального обслуговування
ФАПЧ	– фазове автопідстроювання частоти
ФК	– фазовий компаратор
ФНЧ	– фільтр нижніх частот
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач
ЦП	– цифровий потік
ЦСП	– цифрова система передачі
ЦСС	– цикловий синхросигнал
ЧПЧ	– комутаційна схема час-простір-час
ШСС	– широкосмуговий сигнал
ШЦМІО	– широкосмугова цифрова мережа інтегрального обслуговування
ЕТО	– експлуатація й технічне обслуговування

ІНШОМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

AAL	– ATM Adaptation Layer	– рівень адаптації ATM
ADM	– Add/Drop Multiplexer	– мультиплексор вводу/виводу
AFI	– Authority and Format Identifier	– ідентифікатор повноважень адміністрації й формату
AIS	– Alarm Indication Signal	– сигнал зазначення аварії
ANSI	– A National Standard Institute	– Американський національний інститут стандартизації
ATM	– Asynchronous Transfer Mode	– асинхронний режим переносу
AU	– Administrative Unit	– адміністративний блок
AUG	– Administrative Unit Group	– група адміністративних блоків
B-ISDN	– Broadband Integrated Services Digital Network	– широкопasmова цифрова мережа інтегрального обслуговування
B-NT	– Broadband Network Termination	– широкопasmове мережне закінчення
B-TA	– Broadband Terminal Adapter	– широкопasmовий термінальний адаптер
B-TE	– Broadband Terminal Equipment	– широкопasmове кінцеве обладнання
CDM	– Code Division Multiplexing	– кодовий розподіл каналів
CDMA	– Code Division Multiple Access	– множинний доступ з кодовим розподілом каналів
CRC	– Cyclic Redundancy Check	– циклічний контроль із надмірністю
DEMUX	– Demultiplexer	– демультимплексор
MUX	– Multiplexer	– мультиплексор

DWDM	– Density Wavelength Division Multiplexing	– щільне хвильове мультиплексування
EDFA	– Erbium-Doped Fiber Amplifier	– підсилювач на волокні, легваному ербієм
ES	– End System	– кінцева система
ESI	– End System Identifier	– ідентифікатор кінцевої системи
FDDI	– Fiber Data Distributed Interface	– розподілений інтерфейс передавання даних по оптичному волокну
FDM	– Frequency Division Multiplexing	– частотний розподіл каналів
GFC	– Generic Flow Control	– загальне управління потоком
HDWDM	– High Density Wavelength Division Multiplexing	– високощільне хвильове мультиплексування
HEC	– Header Error Control	– контроль помилок у заголовку
IP	– Internet Protocol	– протокол Internet
IS	– Intermediate System	– проміжна система
ISDN	– Integrated Services Digital Network	– цифрова мережа інтегрального обслуговування
ISO	– International Standards Organization	– Міжнародна організація стандартів
ITU-T	– International Telecommunication Union-Telephony group	– Міжнародний Союз електрозв'язку, підрозділ телефонії
LAN	– Local Area Network	– локальна мережа
MID	– Multiplexing Identifier	– ідентифікатор мультиплексування
MSON	– Multiplexing Section OverHead	– заголовок мультиплексорної секції

MSP	– Multiplex Section Protection	– резервування мультиплексорної секції
NNI	– Network-to-Network Interface	– мережний інтерфейс
OADM	– Optical Add/Drop Multiplexer	– оптичний мультиплексор вводу/виводу
O-CDMA	– Optical Code Division Multiple Access	– оптичний множинний доступ з кодовим розподілом
OSI	– Open System Interconnection	– еталонна модель взаємодії відкритих систем
OTDM	– Optical Time Division Multiplexing	– оптичне часове мультиплексування
OXC	– Optical Cross Connect	– оптичний крос-комутатор
PDH	– Plesiochronous Digital Hierarchy	– плезіохронна цифрова ієрархія
POH	– Path Over Head	– трактовий заголовок
PRC	– Primary Reference Clock	– первинний пристрій синхронізації
Private UNI	– Private user-network interface	– приватний інтерфейс користувач-мережа
PT	– Payload Type	– тип корисного навантаження
PTR	– Pointer	– покажчик
Public UNI	– Public User-Network Interface	– інтерфейс користувач – мережа мережі загального користування
QoS	– Quality of Service	– якість обслуговування
RSOH	– Regenerator SOH	– заголовок регенераторної секції
SAR	– Segmentation and Reassembly	– сегментація й складання
SDH	– Synchronous Digital Hierarchy	– синхронна цифрова ієрархія

SEC	– Synchronous Equipment Clock	– пристрій синхронізації обладнання
SMUX	– Synchronous Multiplexor	– синхронний мультиплексор
SOH	– Section Over Head	– секційний заголовок
SSU	– Synchronization Supply Unit	– вторинний пристрій синхронізації
STM	– Synchronous Transport Module	– синхронний транспортний модуль
TDM	– Time Division Multiplexing	– часове мультиплексування
TE	– Terminal Equipment	– вузькосмуговий кінцевий пристрій
TM	– Terminal Multiplexer	– термінальний мультиплексор
TMN	– Telecommunication Management Network	– мережа управління зв'язком
TU	– Tributary Unit	– навантажувальний блок
TUG	– Tributary Unit Group	– група навантажувальних блоків
VC	– Virtual Container	– віртуальний контейнер
VCI	– Virtual Channel Identifier	– ідентифікатор віртуального каналу
VPI	– Virtual Path Identifier	– ідентифікатор віртуального шляху
WDM	– Wavelength Division Multiplexing	– хвильове мультиплексування

ВСТУП

Залізничний транспорт є однією з базових галузей економіки. Стабільне та ефективне функціонування залізничного транспорту є необхідною умовою для забезпечення обороноздатності, національної безпеки і цілісності держави, підвищення рівня життя населення.

Для забезпечення ефективної роботи залізничного транспорту необхідна сучасна система управління технологічними процесами й сферами діяльності залізничного транспорту. Реорганізація системи управління тісно пов'язана з використанням нових телекомунікаційних технологій та засобів обчислювальної техніки.

Історично склалося, що мережі зв'язку характеризуються дуже вузькою спеціалізацією. Для кожного виду зв'язку існує, щонайменше, одна мережа, що транспортує інформацію. Через це є велика кількість виділених мереж, кожна з яких вимагає власного етапу розробки, виробництва й технічного обслуговування. При цьому вільні ресурси однієї мережі не можуть використовуватися іншою мережею. Такі мережі позбавлені гнучкості, тому що практично не адаптуються до змін вимог щодо швидкості передавання, обсягів інформації, часу доставки й кількості помилок.

Перші мережі з використанням цифрових технологій передавання даних з'явилися в 60-х роках ХХ століття і були пов'язані з системами цифрової телефонії. Ці системи використовували принцип імпульсно-кової модуляції (ІКМ) і методи мультиплексування для передачі декількох телефонних каналів єдиним потоком даних по кабелю. У США був стандартизований канал T1, що зі швидкістю 1 544 кбіт/с передавав 24 голосових каналів, а в Європі за стандарт був прийнятий канал E1, що мав швидкість передачі 2 048 кбіт/с і дозволяв передавати 30 телефонних каналів. Пізніше канали T1/E1 були прийняті за первинні рівні мультиплексування в системах цифрової телефонії.

На початку 70-х років, внаслідок стрімкого розвитку мікропроцесорної техніки, почали з'являтися комп'ютерні мережі. Мережні технології розвивалися донедавна паралельно для глобальних і локальних мереж. Технології глобальних мереж були спрямовані в основному на розвиток цифрових телефонних

мереж, що використовуються для передачі голосу. Технології локальних мереж – навпаки, використовувалися, в основному, для передавання даних.

Розвиток цифрових телефонних мереж йшов по шляху ущільнення каналів як за рахунок мультиплексування первинних каналів T1/E1, так і за рахунок використання більш раціональних методів модуляції.

Мультиплексування первинних каналів призвело до появи ще трьох стандартизованих каналів T2/E2 (6 312/8 448 кбіт/с), T3/E3 (44 736/34 368 кбіт/с), T4/E4 (274 176/139 264 кбіт/с) з більш високими швидкостями передавання даних. Ці групи каналів одержали назву плезіохронної (тобто майже синхронної) цифрової ієрархії – PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy), що дотепер широко використовується в мережах цифрової телефонії й для передачі даних.

Подальший розвиток технологій високошвидкісних телекомунікацій призвів до появи двох нових технологій: синхронної оптичної мережі – SONET (Synchronous Optical Network) і синхронної цифрової ієрархії – SDH (Synchronous Digital Hierarchy), що часто розглядаються як єдина технологія SONET/SDH. Ці технології були орієнтовані на використання волоконно-оптичних кабелів як середовища передавання.

Технології локальних мереж, орієнтованих на передавання даних, а не голосу, розвивалися не по лінії ущільнення каналів, а по лінії збільшення смуги пропускання, необхідної для передачі спочатку текстової, потім графічної, а зараз і мультимедійної інформації. У результаті швидкість передавання даних у локальних мережах зросла з 2 Мбіт/с до 100 – 1000 Мбіт/с.

Однак внаслідок споконвічної орієнтації технології локальних мереж на локальну передачу даних вона має ряд непереборних недоліків для передачі трафіка мультимедіа, що вимагає постійної часової затримки, а також для створення великих мереж передавання даних внаслідок закладених у технологію обмежень по відстані. Для усунення цих недоліків був розроблений цілий ряд пристроїв: маршрутизатори, комутатори, маршрутизуючі комутатори і навіть комутатори з інтеграцією служб, що дозволяють здійснювати пріоритетизацію трафіка, а значить і більш-менш забезпечити постійну часову затримку для мультимедійних даних. Однак ці пристрої не вирішили всі наявні проблеми й виявилися ефективними, знову ж, у локальних мережах або для їхнього об'єднання.

Паралельно з розвитком технологій локальних мереж з'явилися нові технології, призначені забезпечити створення комп'ютерних мереж масштабу підприємства, корпоративних, регіональних і глобальних мереж передавання даних, що зв'язують безліч локальних мереж. Першою такою технологією була X.25. Існує також технологія Frame Relay – ретрансляція кадрів, що дозволяє передавати дані зі швидкістю до 45 Мбіт/с. На цьому етапі розвитку з'явилася технологія цифрової мережі інтегрального обслуговування – ISDN (Integrated Services Digital Network), не орієнтована на тип даних, що передаються.

Однак через низькі швидкості передавання, що підтримує ISDN (64кбіт/с – 2 Мбіт/с), дуже швидко виникла ідея побудови на її основі широкопasmової цифрової мережі інтегрального обслуговування – ШЦМІО (B-ISDN – Broadband Integrated Services Digital Network), що використовує технологію асинхронного передавання АТМ (Asynchronous Transfer Mode – режим асинхронного передавання) і може застосовуватися на високих швидкостях передавання.

Технологія АТМ, забезпечуючи передачу всіх видів інформації у вигляді пакетів фіксованої довжини – чарунок, дозволяє відмовитися від традиційної форми розподілу ресурсів у вигляді каналів з постійною смугою пропускання й перейти до розподілу за потребою, коли кожний споживач у будь-який момент часу одержує той мережний ресурс, що йому необхідний, у вигляді віртуального каналу зі змінною швидкістю передавання. Таким чином, для технології АТМ характерна одночасна реалізація двох принципів: пакетної комутації й установаження віртуальних з'єднань.

Технологія АТМ може використовуватися як для побудови високошвидкісних локальних мереж, так і магістралей, що об'єднують традиційні локальні мережі. Крім того, організаціями зі стандартизації вже розроблено багато стандартів на сумісність АТМ. Це дозволяє виробникам створювати комутатори, котрі можуть взаємодіяти з комутаторами інших виробників, а також із традиційним обладнанням локальних мереж.

Технологія АТМ була розроблена як універсальна технологія, котра не залежить від типу трафіка, що передається, її можуть використовувати всі існуючі служби й служби, які можуть з'явитися в майбутньому, тому що АТМ визначає протоколи на рівнях вище фізичного. В якості транспортної мережі АТМ може

використовувати існуючі канали SDH і PDH. Це дає можливість постійного вдосконалювання алгоритмів кодування й стиснення інформації. Всі наявні ресурси мережі можуть бути використані всіма службами, що дає можливість їхнього оптимального розподілу й забезпечує високу ефективність використання мережних ресурсів. Транспортування всіх видів інформації одним способом дає можливість проектування, створення, управління й обслуговування однієї мережі, що скорочує витрати й робить її найбільш економічною мережею електрозв'язку на сьогоднішній день.

За планами розробників, однаковість, забезпечувана АТМ, полягає в тому, що одна транспортна технологія зможе забезпечити перераховані нижче можливості:

- передачу в рамках однієї транспортної системи комп'ютерного й мультимедійного трафіка, чутливого до затримок, причому для кожного виду трафіка якість обслуговування буде відповідати його потребам;

- ієрархію швидкостей передавання даних з гарантованою пропускнуою спроможністю для відповідальних додатків;

- високу гнучкість і адаптованість мережі як до зміни рівня вимог користувачів щодо якості обслуговування, так і до появи нових служб, вимоги яких до семантичної й часової прозорості мережі ще чітко не визначені;

- загальні транспортні протоколи для локальних і глобальних мереж;

- збереження наявної інфраструктури фізичних каналів або фізичних протоколів: T1/E1, T3/E3, SDH, FDDI;

- взаємодію з успадкованими протоколами локальних і глобальних мереж: IP, Ethernet, ISDN;

- зниження витрат на проектування, будівництво й експлуатацію мережі, а також на розроблення мережного обладнання, тому що створюється й експлуатується одна мережа замість безлічі вторинних мереж.

Отже, в навчальному посібнику розглядаються технології PDH, SDH та АТМ. Багато уваги приділяється принципам мультиплексування каналів у цифрових системах передачі, системам синхронізації та управління мережами на залізничному транспорті. Докладно розглянуто утворення первинного цифрового потоку E1, що лежить в основі всіх технологій транспортних мереж.

1. ПРИЗНАЧЕННЯ, СПОСОБИ ПОДАННЯ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

1.1. Транспортні мережі та їх функції

Поняття транспортної – первинної мережі електрозв’язку. Передача інформації з одного місця до іншого, наприклад, з однієї будівлі або міста до іншого, а так само між безліччю пунктів призводить до поняття мережі передачі або мережі електрозв’язку. У цій мережі пункти приймання і передачі інформації називають вузлами, сполученими лініями зв’язку.

Первинна мережа визначається як сукупність середовищ передачі, типових каналів, трактів і ліній передачі, що сполучають між собою вузли і кінцеві пристрої, або ж як сукупність технічних і програмних засобів зв’язку, що забезпечують передачу і розподіл інформації.

Первинна мережа має ієрархічну структуру і є основою телекомунікаційної інфраструктури, що забезпечує організацію уніфікованих (типових) каналів і трактів передачі для користувачів та з’єднань між собою станцій комутації телефонної мережі, передавання даних і т.ін.

Основна функція первинної мережі полягає в передачі – транспортуванні – інформації між пунктами. Це може бути інформація телефонних абонентів, користувачів Інтернет, програми телебачення, різного роду управляюча інформація для контролю і технічного обслуговування мережі, сигнали взаємодії між комутаційними станціями, інформація обліку вартості послуг – тарифікації, виділені сигнали синхронізації тощо.

При переході до функціональних принципів опису і класифікації мереж і систем передачі, прийнятих ІТУ-Т (International Telecommunication Union-Telephony group), для мереж такого вигляду ввели термін “транспортні мережі” за аналогією з перевезеннями вантажів транспортними засобами.

Первинна і вторинна мережі. Поняття первинної і вторинної мереж дуже відносні. Частина мереж електрозв’язку, що функціонально забезпечує передачу й утворює мережу типових каналів і трактів з уніфікованими стиками (інтерфейсами), визначена як первинна.

Мережі, що утворені на базі первинної мережі і використовують ці уніфіковані тракти для організації телефонної передачі, передавання даних або телепередач, визначені як вторинні.

З погляду сучасних принципів класифікації мереж, ключовою ознакою вторинної мережі слід вважати те, що вона безпосередньо пов'язана з наданням послуг користувачу. За багатьма ознаками вторинні мережі співпадають з сучасними мережами надання прикладних або додаткових послуг, “інтелектуальними мережами” тощо, для яких характерне використання ресурсів вже створених, існуючих мереж передачі інформації.

Сучасна цифрова транспортна мережа може бути побудована на основі трьох технологій: плезіохронної цифрової ієрархії PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy), синхронної цифрової ієрархії SDH (Synchronous Digital Hierarchy) і асинхронного режиму перенесення ATM (Asynchronous Transfer Mode).

Технологія ATM, як технологія побудови первинної мережі, є поки молодію і до кінця не випробуваною. Ця технологія відрізняється від технологій PDH і SDH тим, що охоплює не тільки рівень первинної мережі, але і технологію вторинних мереж, як зображено на рис. 1.1. У результаті при розгляданні технології ATM важко відділити її частину, що належить до технології первинної мережі, від частини, тісно пов'язаної з вторинними мережами.

Мережі підтримки – синхронізації, сигналізації та управління. З погляду транспортної мережі, її функції можуть бути розділені на дві групи – це основні (транспортні) і допоміжні (підтримки). Перша функціональна транспортна група забезпечує передачу будь-якої інформації з одного місця в інше. Друга функціональна група реалізує різні допоміжні операції. Іншими словами, друга група являє мережі підтримки, що забезпечують функції управління транспортною мережею, функції синхронізації, технічного обслуговування тощо.

1.2. Способи подання транспортних мереж

Узагальнене подання мережі електрозв'язку. Мережа електрозв'язку в узагальненому вигляді наведена на рис. 1.1. У центрі рисунка розташоване ядро транспортної мережі електрозв'язку (фізичний шар) – три середовища передачі: відкритий простір (радіохвилі), металеві дротяні і волоконно-оптичні лінії.

Навколо ядра розташований шар транспортної мережі – це шар трактів, каналів і різних технологій розділення каналів (мультиплексування) при багатократному використанні шарів, що створюють ядро.

Зовнішній шар є шаром вторинних мереж – клієнтів, які використовують транспортні послуги, що надаються первинною мережею.

Ієрархічне (рівневе) подання транспортної мережі. Дуже часто використовується подання систем передачі і мереж електрозв'язку у вигляді моделі, що складається з набору шарів або рівнів. Кожен такий набір може бути впорядкований за якою-небудь класифікуючою ознакою.

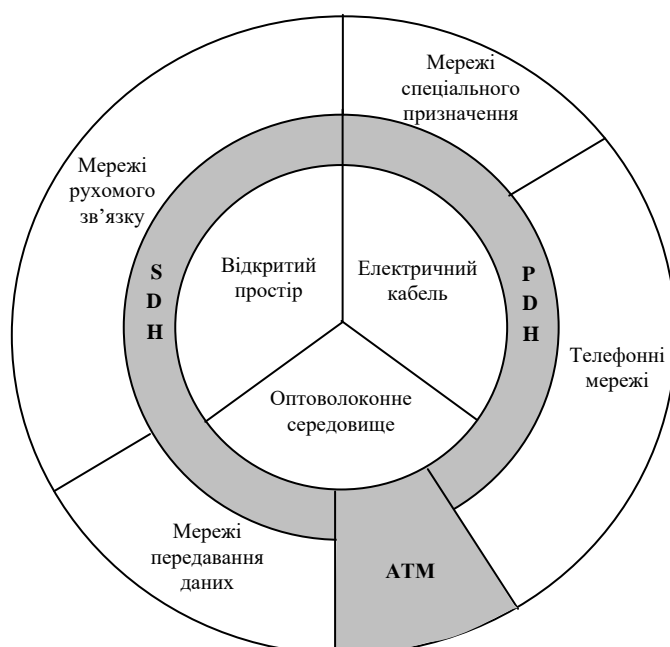


Рис. 1.1. Місце цифрової первинної мережі у системі електрозв'язку

На рис. 1.2 як приклад зображена модель транспортної мережі, розділена на шари (яруси) за адміністративно-територіальним принципом: від місцевого до міжнародного рівня. Така побудова транспортної мережі відображає існуючу державну адміністративну структуру.

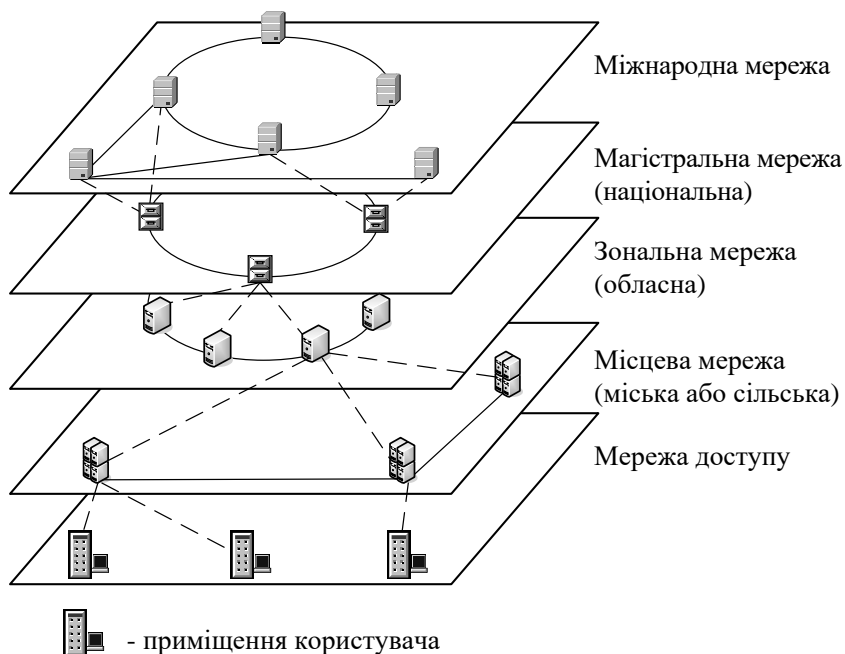


Рис. 1.2. Приклад багаторівневої побудови транспортної мережі

Орієнтування на адміністративний розподіл допускає трирівневу структуру транспортної мережі. Проте її можна доповнити четвертим “ярусом” – міжнародною мережею зв’язку, що об’єднує між собою держави, і п’ятим “ярусом”, часто називаним “останньою милею” – цей рівень транспортної мережі називається мережею доступу.

Мережами доступу називають мережі, що забезпечують транспортні функції (тобто перенесення інформації) на ділянці між користувачем (абонентом) і обслуговуючим вузлом (пунктом надання послуг). У мережі доступу задіяні існуючі розподільні мережі з мідними кабелями, десятки типів апаратури цифрових абонентних ліній, системи радіодоступу, системи супутникового зв’язку, атмосферні і волоконні системи оптичного зв’язку тощо.

Основне їх завдання – підвищення ефективності використання фізичного середовища на ділянці від абонента до постачальника послуг зв'язку.

Необхідно зазначити, що в сучасних мережах електрозв'язку фрагменти мережі доступу і базової мережі (наприклад, магістральної) можуть знаходитися в одному кабелі, використовувати сусідні тракти однієї системи передачі, переносити однакову інформацію, але єдина визначальна відмінність полягає в тому, що між точками підключення виконуються одні і ті ж функції.

Принцип розділення на функціональні рівні. З викладеного вище зрозуміло, що транспортні мережі являють складні системи з багатьма компонентами. У транспортній мережі одні і ті ж функції можуть бути реалізовані різними технічними засобами. Наприклад, передача може бути організована по повітряних лініях зв'язку з використанням аналогової апаратури або ж по волоконно-оптичних лініях цифровими методами. Проте в обох випадках функціональні принципи транспортування залишаються незмінними і можуть бути зведені до обмеженого числа елементів.

Прикладами транспортних функцій можуть служити:

- організація лінійного тракту і його адаптація з відповідним передавальним середовищем;
- мультиплексування (розділення каналів) – для досягнення необхідної пропускної спроможності;
- конфігурування і реконфігурування мережі.

Транспортна мережа, зображена на рис. 1.2, розділена за адміністративно-територіальним принципом. Кожен шар цієї мережі може бути представлений рівневою моделлю, наведеною на рис. 1.3.

Таким чином, основний принцип опису транспортної мережі полягає у використанні транспортних функцій мережі й обладнання незалежно від їх конкретної реалізації.

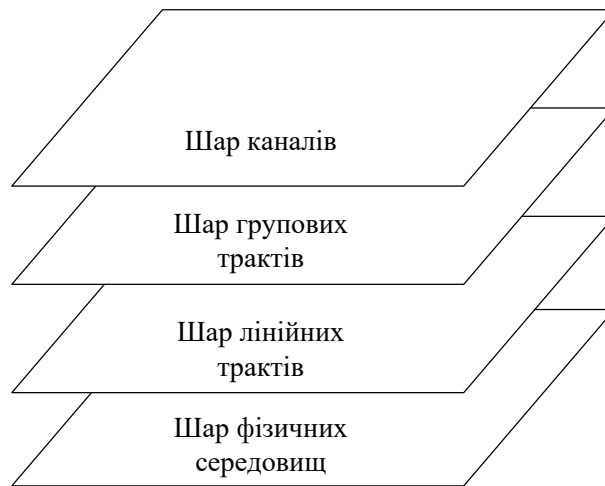


Рис. 1.3. Рівнева модель транспортної мережі

1.3. Технічні засоби транспортних мереж

Розвиток сучасних систем передачі визначається потенційною можливістю освоєних передавальних середовищ і досягненнями електроніки і обчислювальної техніки.

Як вже зазначалося, ядро – фізичний шар транспортної мережі електрозв’язку представляють три середовища передачі: відкритий простір, дротяні і волоконно-оптичні лінії, або, як їх ще називають, спрямовуючі системи.

Ці три напрями мають досить велике число різних видів.

1. Відкритий простір:

- радіолінії;
- радіорелейні лінії;
- супутникові радіолінії;
- атмосферні оптичні лінії зв’язку.

2. Дротяні:

- повітряні лінії зв’язку (мідні, біметалеві);
- симетричні кабельні лінії (“вита пара”);
- коаксіальні кабельні лінії зв’язку.

3. Волоконно-оптичні лінії зв’язку.

Засоби електрозв’язку у відкритому просторі, у металевих і волоконних спрямовуючих системах – лініях використовують спектр хвиль від наднизьких частот до частот оптичного діапазону.

Засоби електрозв'язку, що використовують відкритий простір, вимагають окремого розгляду і тому надалі розглядатися не будуть.

На повітряних лініях зв'язку цифрові системи передачі (ЦСП) не використовуються. На кабельних лініях зв'язку з металевими провідниками аналогові системи передачі з частотним розділенням каналів перевершують цифрові системи за числом організовуваних каналів, оскільки аналогові системи передачі з частотним розділенням значно ефективніше використовують частотний діапазон. Це дуже важливо в кабельних лініях, що мають частотно-залежні характеристики, в яких загасання сигналу збільшується пропорційно кореню квадратному від частоти сигналу.

Волоконно-оптичне середовище, разом з високою пропускнуою спроможністю, має виключно малу величину загасання, незначні спотворення сигналів і високу захищеність від зовнішніх впливів, що і зумовило її широке використання цифровими системами передачі.

У наш час напрям розвитку транспортних технологій в базовій транспортній мережі і мережах доступу визначається використанням двох середовищ – відкритого простору в радіо і світловому діапазоні та волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Контрольні запитання

1. Для чого призначена транспортна мережа?
2. На основі яких технологій будуються транспортні мережі?
3. Чим відрізняються первинна та вторинна мережі?
4. Для чого потрібні мережі підтримки?
5. Які принципи покладені в основу класифікації мереж?
6. Що називається мережею доступу?

2. ПРИНЦИПИ РОЗДІЛЕННЯ КАНАЛІВ

2.1. Загальні характеристики сигналів

2.1.1. Визначення та принципи класифікації сигналів

Сучасне визначення сигналу зводиться до його уявлення у вигляді фізичного явища або процесу, як функції часу, що несе повідомлення (інформацію) про яку-небудь подію, стан об'єкта спостереження, команди управління тощо.

Сигнали, як функції часу, класифікують за різними ознаками:

– за функціональним призначенням: сигнали – переносники інформації, вимірювальні і контрольні сигнали, сигнали синхронізації;

– за характеристиками області значень і області визначень: аналогові, дискретні, цифрові;

– за можливістю або неможливістю передбачення миттєвих значень реалізацій сигналу: випадкові і детерміновані.

Нижче стисло наведені тільки основні відомості про ці сигнали і їх характеристики.

Детерміновані періодичні і неперіодичні сигнали. Сигнали розділяють на дві великі групи – детерміновані і випадкові, засновані на можливості або неможливості передбачення миттєвих значень сигналу у будь-який момент часу. Якщо значення сигналу відомі або можуть бути обчислені, то такі сигнали називають детермінованими.

Детерміновані сигнали, у свою чергу, розділяються на періодичні і неперіодичні сигнали. *Періодичним* називається будь-який детермінований сигнал, для якого виконується умова

$$u(t) = u(t + kT), \quad (2.1)$$

де k – будь-яке ціле число;
 T – період.

Таким чином, миттєві значення періодичного сигналу повторюються через рівні проміжки часу (період T). Якщо

умова (2.1) не виконується, то детермінований сигнал називають *неперіодичним*.

Для прикладу, на рис. 2.1, *a* показаний графік періодичного сигналу – гармонійного коливання, миттєве значення якого визначається виразом

$$u(t) = U_m \sin(2\pi t / T). \quad (2.2)$$

Сигнали, що зустрічаються на практиці, не є чисто гармонійними коливаннями, але більшість з них можуть бути періодичними. На рис. 2.2, *a* показаний типовий періодичний негармонійний сигнал, який можна представити сумою двох гармонійних коливань.

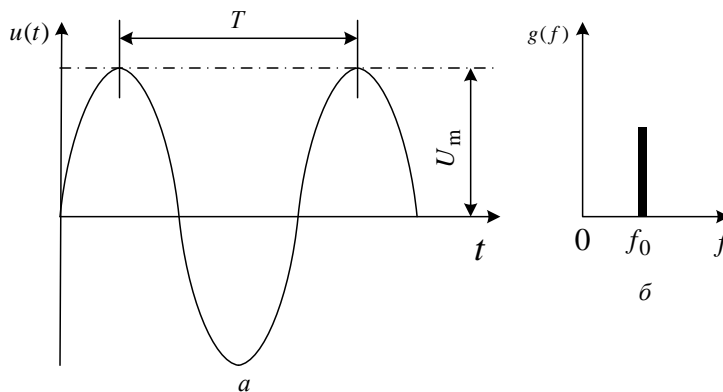


Рис. 2.1. Приклад детермінованого сигналу: періодичний гармонійний (синусоїдний) сигнал

Частота періодичних сигналів f пов'язана з періодом T співвідношенням

$$f = 1/T. \quad (2.3)$$

Для опису детермінованих періодичних сигналів, як правило, досить знання двох параметрів – максимального значення і частоти або періоду коливання. Всі значення такого сигналу можуть бути обчислені з використанням виразів (2.1) – (2.3). Опис величин через максимальні значення ефективний при

розгляданні тільки гармонійних коливань або їх сум (рис. 2.2, а), оскільки до них безпосередньо застосовні вказані вирази.

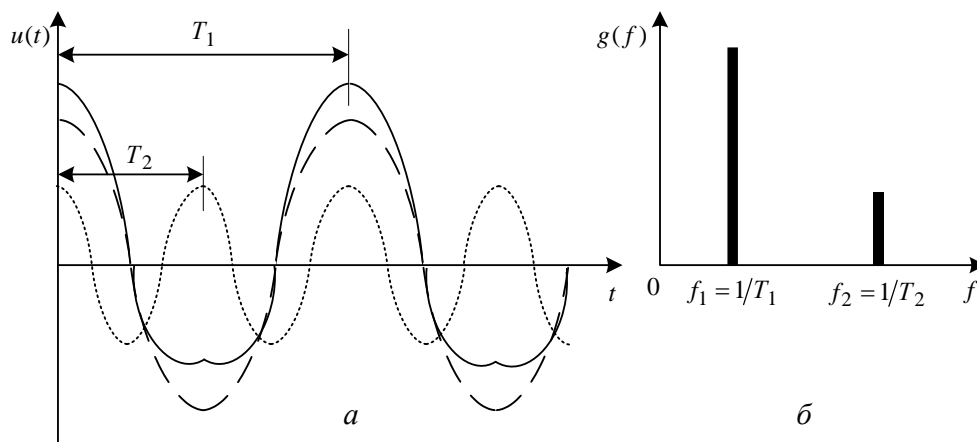


Рис. 2.2. Приклад детермінованого сигналу: періодичний негармонійний сигнал

Окрім розглянутих параметрів сигналів іноді використовуються і такі параметри, як середнє абсолютне значення і середньоквадратичне значення сигналу.

Середнє абсолютне значення гармонійного сигналу, усереднене за період, виражається формулою

$$U_{\bar{a}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

Середньоквадратичне значення (ефективне значення напруги) гармонійного сигналу, усереднене за період, виражається формулою

$$U_{\bar{e}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}.$$

Середньоквадратичне значення безпосередньо відображає енергію коливань.

Співвідношення між різними величинами називаються коефіцієнтом амплітуд \hat{E}_i (пік фактором) і коефіцієнтом форми \hat{E}_o (форм фактором) і мають такий вигляд:

$$\hat{E}_i = U_m / U_{\text{н\acute{e}a}};$$

$$\hat{E}_o = U_{\text{н\acute{e}a}} / U_{\text{н\acute{o}}}.$$

Для гармонійного коливання, $\hat{E}_i = 1,414$, $\hat{E}_o = 1,11$.

Випадкові сигнали. На відміну від детермінованих сигналів, форму яких ми знаємо точно, миттєві значення випадкових сигналів наперед невідомі і можуть бути передбачені з деякою імовірністю менше одиниці. Характеристики таких сигналів є статистичними, тобто мають імовірнісний характер.

Математична модель випадкового сигналу, що змінюється в часі, називається випадковим процесом. Випадковий процес, що описує явище, котре вивчається, задається ансамблем його реалізацій – випадкових функцій. Випадкова функція – це функція особливого вигляду, котра характеризується тим, що значення, які приймаються нею у будь-який момент часу, є випадковими величинами. Необхідно відзначити, що терміни “випадковий сигнал” і “випадковий процес” часто використовуються як синоніми. Як приклад на рис. 2.3 показана одна реалізація випадкового сигналу (процесу). Кожна така реалізація навряд чи повториться в майбутньому, і значення процесу можна передбачити тільки з якоюсь імовірністю.

Випадкові сигнали характеризуються функцією розподілу і щільністю імовірності, кореляційними і спектральними функціями. Випадкові сигнали також можуть бути так само описані числовими характеристиками, такими як імовірність перевищення заданої величини, середнє значення, дисперсія тощо.

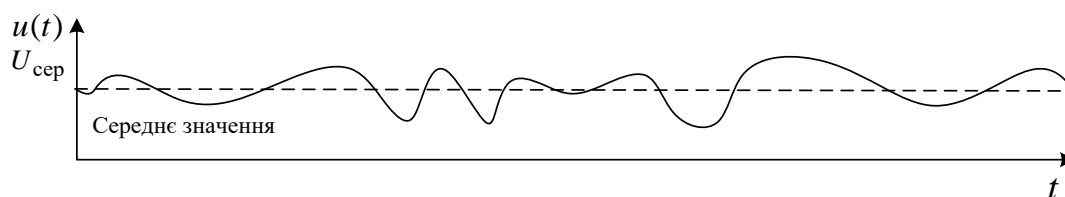


Рис. 2.3. Приклад реалізації випадкового сигналу

Випадкові процеси можуть бути стаціонарними і нестаціонарними. Процес називають стаціонарним у вузькому розумінні, якщо його багатовимірна щільність імовірності не залежить від часового зсуву. Якщо ж обмежити вимоги тим, щоб від часового зсуву не залежала лише одновимірна і двовимірна щільність імовірності, то такий випадковий процес буде стаціонарним у широкому розумінні.

Для стаціонарного випадкового процесу математичне очікування і дисперсія не залежать від часу, а кореляційна функція залежить не від самих моментів часу, а тільки від інтервалу між ними.

Класифікація сигналів за функціональним призначенням. Розглянемо один з варіантів класифікації сигналів за їх функціональним призначенням.

Сигнали – переносники. Інформація передається зміною одного або декількох параметрів сигналу. Така зміна параметрів називається модуляцією, а якщо модулюючий сигнал приймає дискретні значення, то – маніпуляцією. Початковий модульований сигнал називається несучим і виконує роль переносника.

Несучі сигнали широко використовуються в системах передачі з частотним розділенням каналів для перетворення і перенесення сигналів по направляючому середовищу.

Вимірювальні сигнали. На відміну від сигналу – переносника, вимірювальний сигнал має наперед відомі параметри, що використовуються для вимірювання характеристик і контролю тракту передачі. За відмінностями вимірювального сигналу від його ідеальної математичної моделі судять про характеристики тракту передачі. Через простоту генерації й обробки результатів вимірювань найчастіше використовуються детерміновані періодичні вимірювальні сигнали.

Контрольні сигнали. Як правило, це детерміновані сигнали, що вводяться в тракти систем передачі для контролю цілісності або якості з'єднань, регулювання параметрів або дистанційного управління елементами систем передачі.

Сигнали синхронізації. Сигнал синхронізації (тактовий сигнал, синхросигнал) – детермінований періодичний сигнал, що використовується для управління синхронізацією обладнання і мереж.

Для цілей синхронізації найчастіше використовуються гармонійні і цифрові сигнали, котрі будуть розглянуті далі.

Аналогові та дискретні сигнали. За характеристиками області визначення і області значень математичних моделей досліджуваних сигналів вони розділяються на аналогові, дискретні і цифрові.

Сигнали безперервного або дискретного часу, параметри яких представляються безперервною безліччю можливих значень, називаються аналоговими. Приклади аналогових сигналів наведені на рис. 2.1, 2.2, 2.3. Добре відомим прикладом аналогового сигналу є мовний сигнал на виході перетворювача акустичних коливань в електричні – мікрофон.

Сигнали безперервного або дискретного часу, параметри яких представляються кінцевою безліччю можливих значень, називаються дискретними.

Сигнали дискретного часу, параметри яких представляються кінцевою безліччю можливих значень, як правило, двома, називаються цифровими. Приклад цифрового сигналу показаний на рис. 2.4, а.

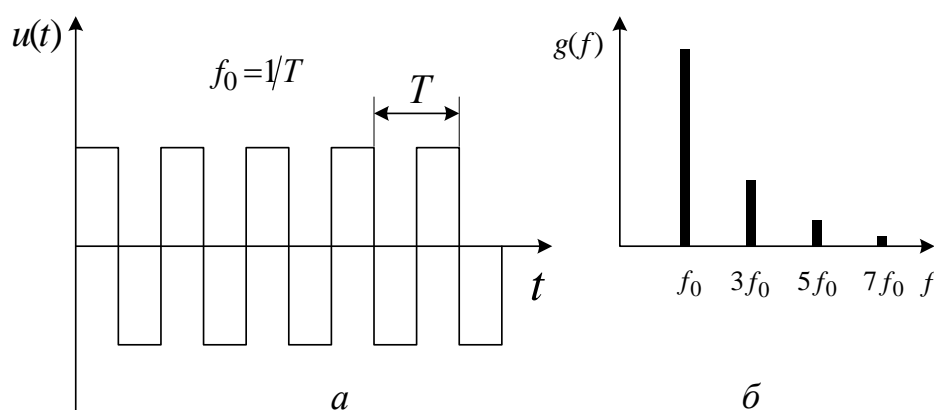


Рис. 2.4. Приклад детермінованого періодичного цифрового сигналу

Аналого-цифрове та цифро-аналогове перетворення. Відповідно до теореми Котельникова аналоговий сигнал, обмежений за частотою, може бути представлений рядом послідовних відліків і потім відновлений. Частота дискретизації повинна бути, принаймні, удвічі вище за найбільшу частоту в спектрі оброблюваного сигналу.

Наприклад, при цифровій передачі сигналів мови по телефонних каналах зв'язку обмежуються смугою частот від 300 до 3400 Гц. У цьому випадку загальноприйнятою є частота дискретизації $f_{\text{д}} = 8 \text{ кГц}$.

Аналого-цифрове перетворення (АЦП) є першим етапом цифрової обробки сигналів – елементом, що зв'язує аналогову і цифрову ділянки тракту.

Задача цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) прямо протилежна: він перетворить цифровий сигнал на аналоговий.

Робота АЦП складається з двох етапів: дискретизація вхідного безперервного сигналу, тобто перетворення його на форму амплітудно-модульованого імпульсного сигналу або сигналу імпульсно-кової модуляції (ІКМ), і потім квантування величини ІКМ сигналу за рівнем. У результаті на виході АЦП з фіксованою швидкістю, визначуваною періодом дискретизації, з'являються двійкові числа, тобто набори одиниць і нулів, відповідні рівням сигналу в моменти дискретизації.

Число двійкових розрядів АЦП звичайно вибирається рівним 8, включаючи знаковий розряд, так що діапазон чисел на виході АЦП складає від -127 до $+127$. У результаті на виході АЦП виходить потік 8-бітових чисел, що слідує з частотою 8 кГц, тобто потік інформації на виході АЦП складає 64 кбіт/с, що відповідає основній базовій швидкості цифрового потоку.

Промисловістю серійно випускаються АЦП і ЦАП у вигляді інтегральних мікросхем, котрі характеризуються певними значеннями розрядності і швидкодії.

2.1.2. Основні характеристики та способи опису сигналів

Часове та спектральне подання сигналів. Одним з ефективних методів опису сигналів є метод частотного аналізу. Він заснований на теоремі, вперше сформульованій Фур'є, і

полягає у тому, що будь-яку періодичну функцію, не дивлячись на складність її форми, можна розглядати як безліч синусоїдальних сигналів з гармонійно зв'язаними частотами (гармонік).

На рис. 2.1, б показана спектральна характеристика гармонійного сигналу, приведеного на рис. 2.1, а. На рис. 2.2, а показане негармонійне періодичне коливання, а на рис. 2.2, б – його частотний спектр, що складається з двох гармонійних сигналів (гармонік). На рис. 2.4, б показаний спектр періодичного прямокутного сигналу (див. рис. 2.4, а).

Як видно з рис. 2.1, 2.2, 2.4, для періодичних сигналів характерні спектри, що складаються з дискретних ліній. Цим вони відрізняються від неперіодичних сигналів з безперервними спектрами.

Цифрові сигнали. У цифровому електрозв'язку для передачі інформаційних повідомлень (даних) використовуються двійкові символи 0 і 1. Приклад такого повідомлення показаний на рис. 2.5, а.

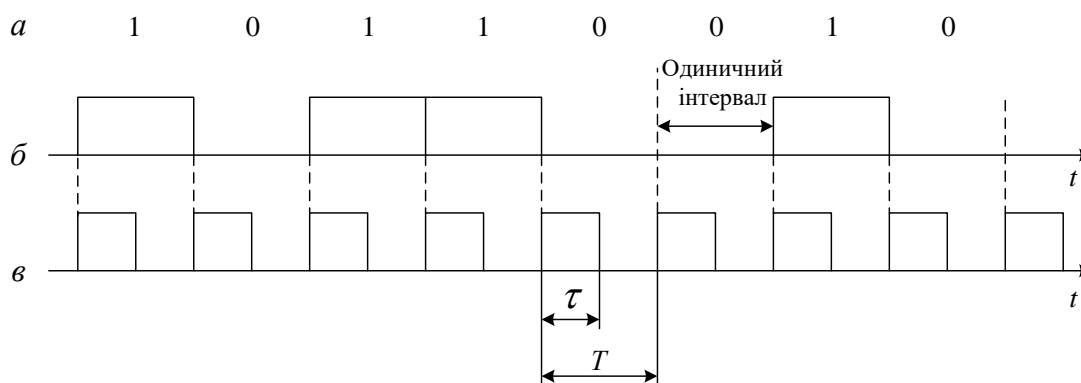


Рис. 2.5. Приклад інформаційного повідомлення з використанням двійкових символів

На рисунку 2.5, б показаний цифровий сигнал у вигляді послідовності прямокутних імпульсів, відповідної повідомленню 10110010. З рисунка видно, що кожен символ займає весь часовий інтервал, рівний періоду надходження бітів, який іноді називають одиничним інтервалом.

Основні параметри послідовності прямокутних імпульсів показані на рис. 2.6, де A – амплітуда імпульсу, T – період повторення імпульсів, τ – тривалість імпульсу.

Для того щоб звернути увагу на тривалість протікання перехідних процесів, на рис. 2.7 показана трапецоїдна форма імпульсів. Тривалість імпульсу τ в цьому випадку відлічується на рівні $0,5A$, а тривалість переднього і заднього фронту імпульсу ($\tau_{\phi 1}$, $\tau_{\phi 2}$) відлічується на рівні 10 і 90 % від амплітуди імпульсу A .

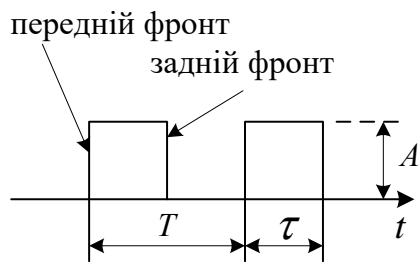


Рис. 2.6. Графічне подання прямокутного імпульсу

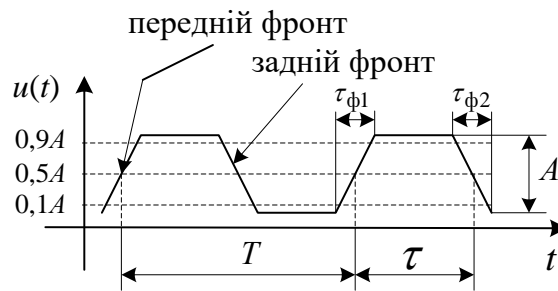


Рис. 2.7. Графічне подання трапецоїдного імпульсу

Значущі моменти цифрових сигналів. Під значущими моментами надалі матимемо на увазі будь-які точки в послідовності сигналів, що зручно використовувати для визначення часового положення імпульсів. Так, на рис. 2.7 при відліку тривалості імпульсів і періоду їх надходження значущі моменти вибрані на рівні половини амплітудного значення імпульсів, а на рис. 2.5 – по передніх фронтах.

Швидкість надходження цифрових сигналів. Частота надходження значущих моментів називається швидкістю цифрового потоку.

Тактова послідовність. У пристроях цифрового зв'язку потік даних, показаний на рис. 2.5, б, супроводжується тактовою синхронізуючою послідовністю, зображеною на рис. 2.5, а. Тактова послідовність є регулярною, періодичною послідовністю прямокутних імпульсів.

Тактова послідовність управляє процесами передачі, запису, перезапису, зчитування інформаційних сигналів даних. На рис. 2.8, б, в показані характерні осцилограми тактових послідовностей з однаковими значеннями тривалості імпульсів і

періодом проходження, але різною формою імпульсів і різними характерними точками – значущими моментами.

Тактові послідовності можуть характеризуватися шпаруватістю q – відношенням величини періоду проходження імпульсів T до тривалості імпульсу τ . Величина, зворотна шпаруватості, називається коефіцієнтом заповнення. Вона показує відсоток заповнення тактового інтервалу імпульсом.

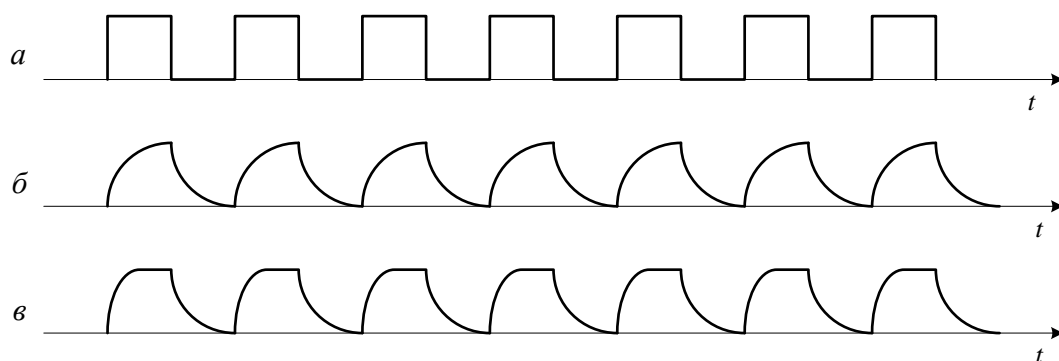


Рис. 2.8. Графічне подання тактових послідовностей

На рис. 2.9, *а, б* для прикладу показані тактові послідовності з різними значеннями шпаруватості. На рис. 2.9, *в* показана тактова послідовність з пропусками. Такого роду тактові послідовності часто використовуються в системах мультиплексування для вставлення і пропускання бітів або для інших службових цілей. На рис. 2.9, *в* тактова послідовність показана не у формі імпульсів, а як послідовність значущих моментів, позначених вертикальними лініями.

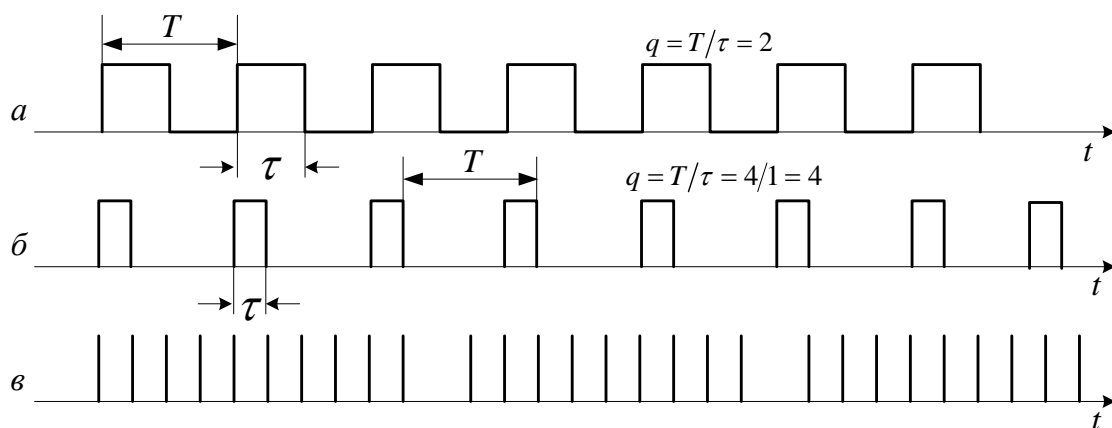


Рис. 2.9. Приклади тактових послідовностей

Спотворення форми цифрових сигналів. Обмеження частотного діапазону ліній передачі зверху призводить до згладжування фронтів імпульсної послідовності. На рис. 2.8, *a* показана ідеальна прямокутна послідовність при необмеженому діапазоні частот.

На рис. 2.8, *b* показана спотворена послідовність імпульсів після частотної фільтрації ідеальної прямокутної послідовності зі спадом амплітудно-частотної характеристики 6 дБ на октаву (20 дБ на декаду) і частотою зрізу (за рівнем 3 дБ), що дорівнює тактовій частоті, де тактова частота $f_{\text{д\`a\`e\`o}} = 1/T$ – величина, зворотна періоду проходження тактових імпульсів.

Часові і фазові спотворення: джитер і вандер цифрових сигналів. У регулярній тактовій послідовності – ізохронній (*ізо* – рівно, *хронос* – час) – інтервали часу між двома сусідніми значущими моментами рівні між собою, принаймні, в середньому. Тактовий сигнал з пропусками залишається ізохронним, якщо тривалість пропусків кратна цілому числу інтервалів часу між значущими моментами. У цифровій техніці зв'язки використовуються, як правило, регулярні, ізохронні детерміновані тактові сигнали. Моменти t_k надходження k -го значущого моменту в ідеальній регулярній тактовій послідовності

$$t_k = t_0 + kT, k = -\infty, \dots - 1, 0, 1, \dots \infty, \quad (2.4)$$

де T – одиничний тактовий інтервал;
 t_k – початок відліку.

Очевидно, що поняття ідеальної послідовності повністю відповідає визначенню періодичного сигналу (формула (2.1)).

Реальні сигнали з різних причин, що розглядаються нижче, мають відхилення значущих моментів від їх положення в ідеальній послідовності на деяку величину помилки – $\varepsilon(t)$, котра, в загальному випадку, довільно змінюється в часі. Моменти t'_k надходження k -го значущого моменту в такій послідовності можна представити виразом

$$t'_k = t_0 + k[T \pm \varepsilon(t)], k = -\infty, \dots - 1, 0, 1, \dots \infty. \quad (2.5)$$

На рис. 2.10 показаний приклад зсуву значущих моментів у часі (фазове тремтіння).

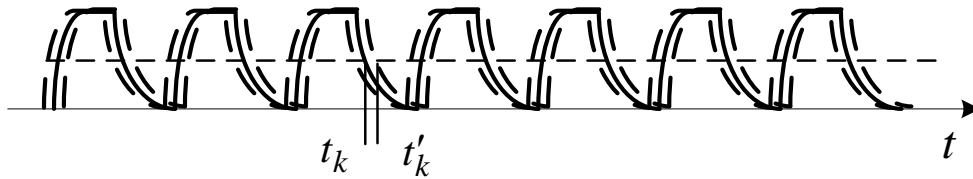


Рис. 2.10. Зсув значущих моментів у часі

Порівнюючи вирази (2.4) і (2.5), абсолютне значення джитера можна визначити як часові або фазові відхилення кожного значущого моменту сигналу, що приймається, від його очікуваного ідеального моменту часу:

$$\varepsilon(t) = t_k - t'_k = t_0 = \pm k\varepsilon(t), \quad k = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty.$$

Реальні фазові тремтіння можуть мати різні частотні складові: як періодичні, так і неперіодичні.

Коливання фази з частотою вище 10 Гц прийнято називати фазовими тремтіннями (джитером), а з частотою нижче 10 Гц – фазовими блуканнями (дрейфом, плаванням, вандером).

Для оцінки джитера можуть бути використані загальні характеристики сигналів. Найчастіше використовується середньоквадратичне значення джитера, пікове значення (амплітудне) і розмах – різниця між максимальним і мінімальним піковими значеннями, виражена в градусах, радіанах або одиничних тактових інтервалах.

2.1.3. Класифікація цифрових сигналів з точки зору часових співвідношень між ними

Принцип класифікації цифрових сигналів залежно від часових співвідношень між ними представлений на рис. 2.11.

Два ізохронні цифрові сигнали синхронні, якщо відповідні їм тактові сигнали мають, принаймні, в середньому однакову частоту, а фазове співвідношення – зсув фаз підтримується незмінним. Так, на виході схеми фазового автопідстроювання

частоти (ФАПЧ) одержують сигнал синхронізації, синхронний по відношенню до вхідного сигналу завдяки системі зворотного зв'язку, контролюючого фазову помилку між ними.

Два цифрові сигнали є асинхронними, якщо вони не синхронні.

Коли тактові сигнали мають, принаймні, в середньому однакову частоту, але фазове співвідношення не контролюється, то сигнали називаються мезохронними. Вони обидва періодичні, ізохронні, але асинхронні по відношенню один до одного. Наприклад, на виході системи автоматичного підстроювання частоти (АПЧ), контролюючої помилку частоти між вхідним і вихідним сигналами, одержують сигнал, що є мезохронним по відношенню до вхідного сигналу.

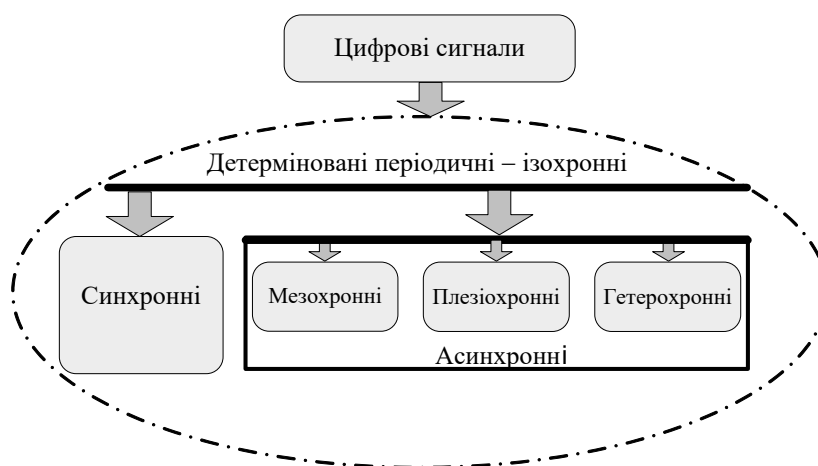


Рис. 2.11. Часові співвідношення між цифровими сигналами

У разі, коли тактові сигнали мають однакову частоту тільки номінально, а фактично вона може змінюватися в межах деякого допустимого діапазону, говорять про плезіохронні цифрові сигнали. Два цифрові сигнали з однаковою номінальною швидкістю, але одержувані від різних генераторів, звичайно плезіохронні.

Визначення плезіохронних сигналів не накладають ніяких обмежень на характер зміни значущих моментів сигналів усередині допусків. Типовий приклад плезіохронних сигналів – два цифрові сигнали зі швидкістю 2,048 Мбіт/с, що генеруються двома незалежними зразками обладнання.

Якщо ж тактові сигнали мають різні номінальні частоти, то відповідні цифрові сигнали є гетерохронними (наприклад, два цифрові сигнали з різними швидкостями).

2.2. Загальна схема методів розділення сигналів (каналів)

Загальна схема класифікації методів розділення сигналів (каналів) – мультиплексування (від англійського *multiplex* – “багатократний”) наведена на рис. 2.12. Основна мета мультиплексування – передача декількох сигналів (каналів) по одному тракту без взаємного впливу.

Умовно методи мультиплексування можна розділити на три групи:

- методи частотного мультиплексування або частотного розділення каналів (FDM – Frequency Division Multiplexing);
- методи часового мультиплексування або часового розділення каналів (TDM – Time Division Multiplexing);
- методи кодового розділення каналів (CDM – Code Division Multiplexing).

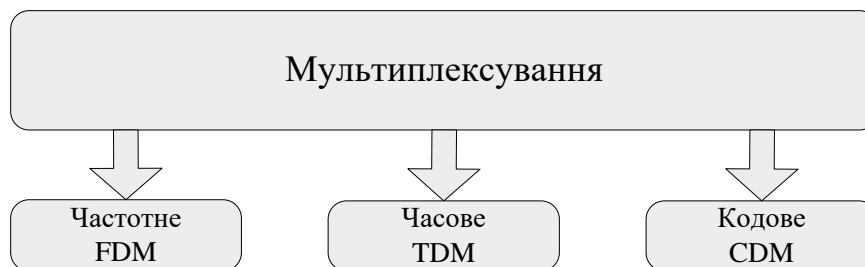


Рис. 2.12. Загальна схема класифікації методів мультиплексування

Зазначимо, що системи мультиплексування можуть бути з організацією циклів і фіксованим розміщенням груп сигналів – це цифрові системи передачі плезіохронної (PDH) і синхронної (SDH) цифрових ієрархій, і без організації циклів – у вигляді пакетів або чарунок одного джерела інформації (ATM). Ці дві групи методів являють два різні принципи або, як то кажуть, режим цифрової передачі – синхронні і асинхронні.

На практиці в техніці передачі повідомлень широке застосування знайшли методи частотного і часового розділення каналів, розгляд яких і складає зміст цього посібника. В основі цих методів розділення каналів, а також методів взаємних перетворень при взаємодії лежать часові і спектральні методи представлення сигналів.

Слід звернути увагу, що при класифікації методів часового розділення каналів і режимів передачі використані поняття “синхронний”, “асинхронний”, “плезіохронний”, котрі належать до понять синхронізації сигналів або процесів. Іншими словами, в основу класифікації методів часового мультиплексування і режимів передачі встановлені принципи синхронізації, що реалізовані в цих системах.

2.3. Частотне розділення каналів

2.3.1. Загальні принципи частотного розділення каналів

Техніка частотного розділення каналів (частотного мультиплексування, частотного ущільнення) спочатку була розроблена для телефонних мереж. Розглянемо особливості цього виду мультиплексування на прикладі телефонної мережі, призначеної для передачі аналогових сигналів.

Мовні сигнали мають спектр завширшки приблизно в 20 000 Гц, проте основні гармоніки, що визначають розбірливість мови, знаходяться в діапазоні від 300 до 3 400 Гц. Тому для передачі мови з задовільною розбірливістю достатньо утворити між двома співбесідниками канал із смугою пропускання в 3 100 Гц, який і використовується в телефонних мережах для з'єднання двох абонентів. У той же час смуга пропускання кабельних систем з проміжними підсилювачами, що сполучає телефонні комутатори між собою, звичайно складає сотні кілогерц, а іноді і сотні мегагерц. Проте безпосередньо передавати сигнали декількох абонентних каналів по широкосмуговому каналу неможливо, оскільки всі абонентні канали працюють в одному і тому ж діапазоні частот, і сигнали різних абонентів змішуватимуться між собою так, що розділити їх буде неможливо.

Для розділення абонентних каналів використовується техніка модуляції високочастотного несучого синусоїдного сигналу низькочастотним мовним сигналом. Приклад амплітудно-модульованого коливання показаний на рис. 2.13.

У результаті амплітудної модуляції спектр модулюючого сигналу переноситься в інший діапазон, який симетрично розташовується щодо несучої частоти і має ширину, приблизно співпадаючу з шириною спектра модулюючого сигналу. Якщо сигнали кожного абонентного каналу перенести у свій власний діапазон частот, то в одному широкосмуговому каналі можна одночасно передавати сигнали декількох абонентних каналів.

Схема простої системи багатоканального зв'язку з розділенням каналів за частотою наведена на рис. 2.14.

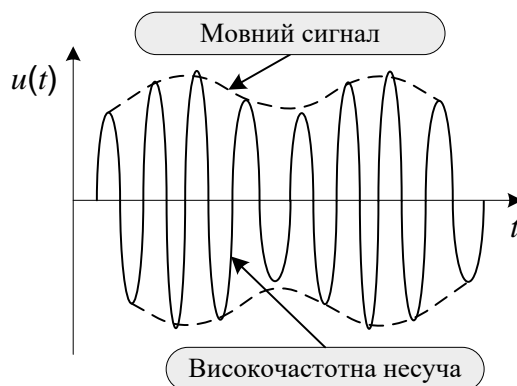


Рис. 2.13. Модуляція несучого коливання мовним сигналом

Спочатку, відповідно до повідомлень, котрі передаються, первинні (індивідуальні) сигнали від джерел повідомлень ДП-1, ..., ДП-N, що мають енергетичні спектри $G_1(\omega), G_2(\omega), \dots, G_k(\omega), \dots, G_N(\omega)$, модулюють піднесучі частоти ω_k кожного каналу. Цю операцію виконують модулятори M_1, M_2, \dots, M_N . Одержані на виході частотних фільтрів $\hat{O}_1, \hat{O}_2, \dots, \hat{O}_N$ спектри $g_k(\omega)$ каналних сигналів $s_k(t), k = 1, 2, \dots, N$ займають відповідно смуги частот, які в загальному випадку можуть відрізнятися по ширині від спектрів

повідомлень $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N$ (у загальному випадку $\Delta\omega_k \approx \Omega_k$). Для спрощення вважатимемо, що $\Delta\omega_k = \Omega$ і $\Delta\omega = N\Omega$.

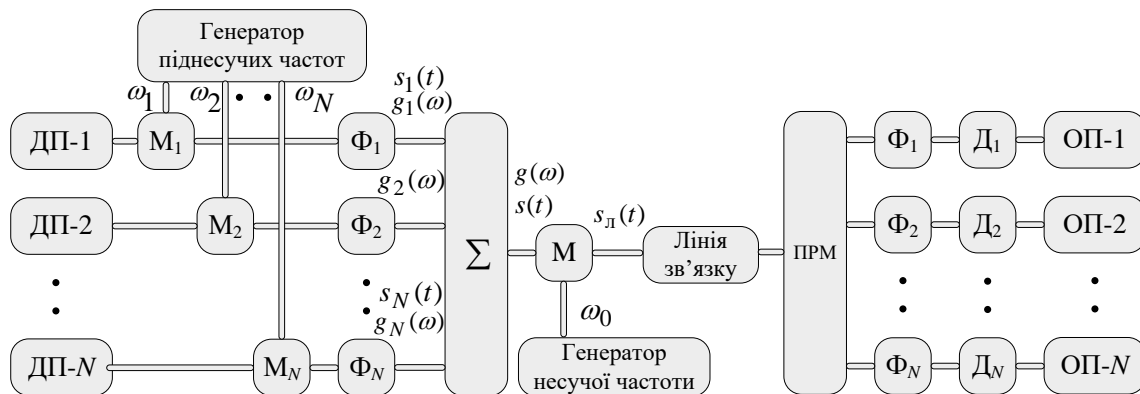


Рис. 2.14. Схема системи зв'язку з частотним розділенням каналів

Простежимо основні етапи утворення сигналів і їх зміни в процесі передачі, зображені на рис. 2.15.

Вважатимемо, що спектри індивідуальних сигналів кінцеві. Тоді можна підібрати піднесучі частоти ω_k так, щоб смуги $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_N$ попарно не перекривалися. За цієї умови сигнали $s_k(t), k = 1, 2, \dots, N$ взаємно ортогональні. Потім спектри $g_1(\omega), g_2(\omega), \dots, g_N(\omega)$ підсумовуються і їх сукупність $g(\omega)$ поступає на груповий модулятор **М**. Тут спектр $g(\omega)$ за допомогою коливань несучої частоти ω_0 переноситься в область частот, відведену для передачі даної групи каналів, тобто груповий сигнал $s(t)$ перетворюється на лінійний сигнал $s_{\text{л}}(t)$. При цьому може використовуватися будь-який вид модуляції.

На приймальному кінці лінійний сигнал поступає на груповий демодулятор (приймач – **ПРМ**), що перетворить спектр лінійного сигналу на спектр групового сигналу $g'(\omega)$. Спектр групового сигналу потім за допомогою частотних фільтрів $\hat{O}_1, \hat{O}_2, \dots, \hat{O}_N$ знов розділяється на окремі смуги $\Delta\omega_k$, відповідні окремим каналам. Нарешті, каналні демодулятори **Д** перетворюють спектри сигналів $g'_k(\omega)$ на спектри повідомлень $G'_k(\omega)$, котрі поступають до одержувачів повідомлень **ОП-1, ..., ОП-N**.

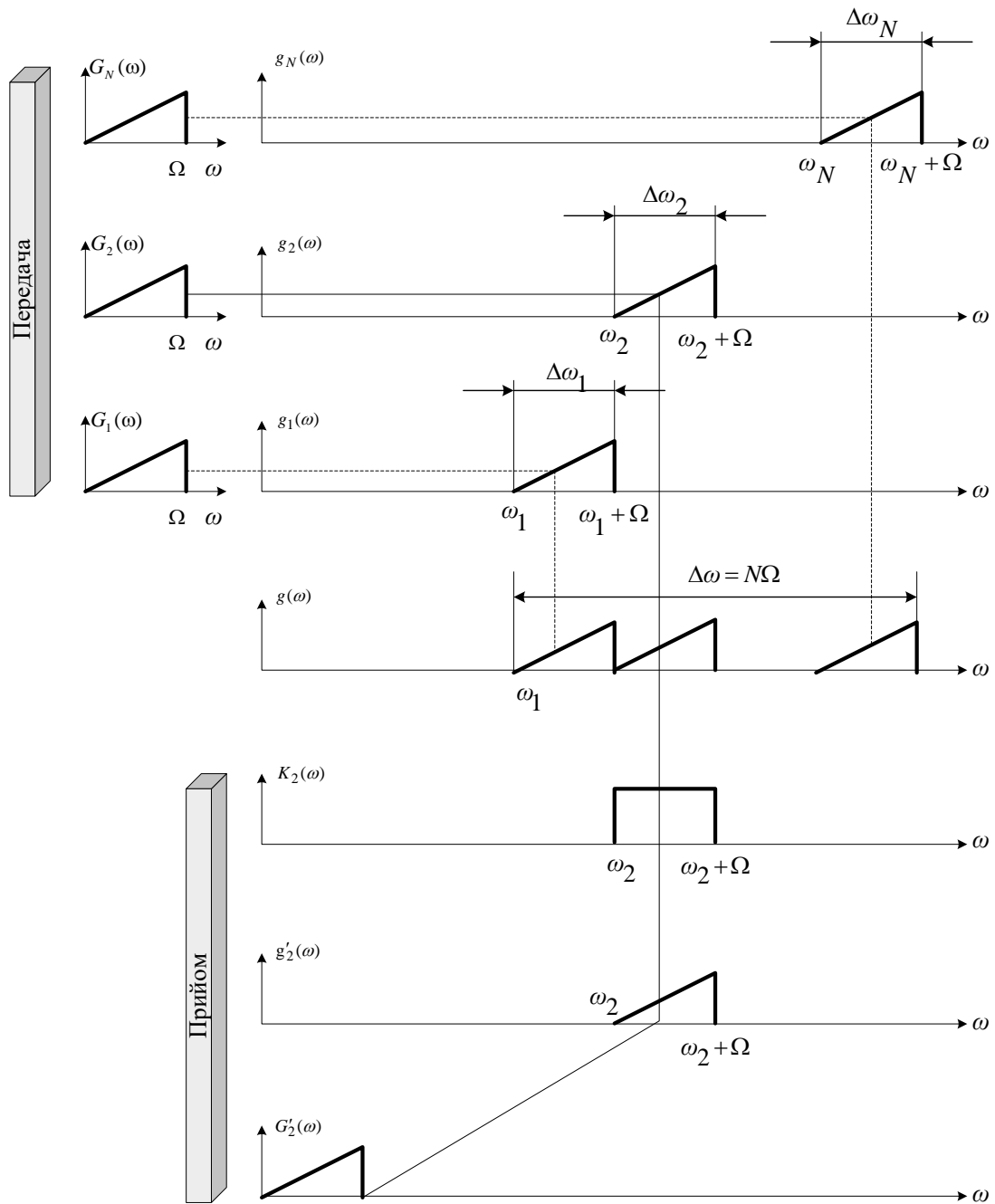


Рис. 2.15. Перетворення спектрів у системі з частотним розділенням каналів

З приведених пояснень легко зрозуміти значення частотного способу розділення каналів. Оскільки будь-яка реальна лінія зв'язку має обмежену смугу пропускання, то при багатоканальній передачі кожному каналу відводиться певна частина загальної смуги пропускання.

На приймальному боці одночасно діють сигнали всіх каналів, що розрізняються положенням їх частотних спектрів на шкалі частот. Щоб без взаємних перешкод розділити такі сигнали, приймальні пристрої повинні містити частотні фільтри. Кожний з фільтрів \hat{O}_k має пропустити без ослаблення лише ті частоти $\omega \in \Delta\omega_k$, що належать сигналу даного каналу; частоти сигналів всіх інших каналів $\omega \notin \Delta\omega_k$ фільтр повинен подавити.

Проте на практиці повне подавлення сигналів інших каналів неможливе через неідеальність частотних фільтрів. Внаслідок чого з'являються взаємні (перехідні) перешкоди між каналами. У реальних умовах доводиться також враховувати взаємні перешкоди нелінійного походження, наприклад за рахунок нелінійності характеристик групового каналу.

Для зниження перехідних перешкод до допустимого рівня доводиться вводити захисні частотні інтервали $\Delta\omega_{\text{зах}}$, що показано на рис. 2.16.

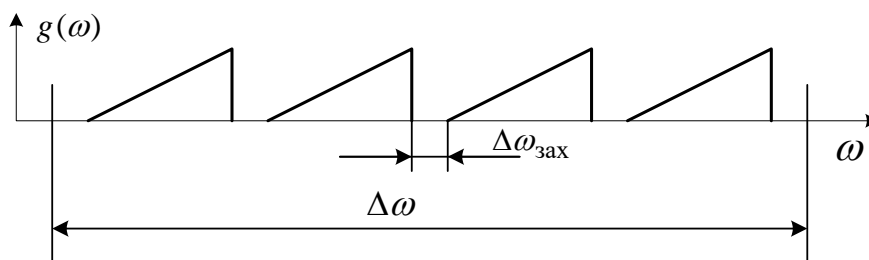


Рис. 2.16. Спектр групового сигналу з захисними інтервалами

Так, наприклад, у сучасних системах багатоканального телефонного зв'язку кожному телефонному каналу виділяється смуга частот 4 кГц, хоча частотний спектр звукових сигналів, що передаються, обмежується смугою від 300 до 3 400 Гц, тобто ширина спектра складає 3,1 кГц. Між смугами частот сусідніх каналів передбачені інтервали завширшки по 0,9 кГц, призначені для зниження рівня взаємних перешкод при виділенні сигналів реальними фільтрами. Це означає, що в багатоканальних системах зв'язку з частотним розділенням сигналів ефективно використовується лише близько 80 % смуги пропускання лінії

зв'язку. Крім того, необхідно забезпечувати високий ступінь лінійності всього тракту групового сигналу.

В аналогових телефонних мережах на основі частотного мультиплексування виділяють декілька рівнів ієрархії ущільнених каналів. Перший рівень ущільнення утворюють 12 абонентних каналів, котрі складають базову групу каналів, що займає смугу частот завширшки в 48 кГц з межами від 60 до 108 кГц. Другий рівень ущільнення утворюють 5 базових груп, що складають супергрупу зі смугою частот завширшки в 240 кГц і межами від 312 до 552 кГц. Супергрупа передає дані 60 абонентних каналів. Десять супергруп утворюють головну групу. Головна група передає дані 600 абонентів одночасно і вимагає від каналу зв'язку смугу пропускання завширшки не менше 2 520 кГц з межами від 564 до 3 084 кГц.

2.3.2. Оптичне частотне мультиплексування

Найперспективнішою технологією, котра дозволяє створювати гнучкі розгалужені оптичні мережі з практично необмеженими можливостями зростання смуги пропускання, є технологія хвильового мультиплексування WDM (Wavelength Division Multiplexing). Суть технології WDM полягає у тому, що по одному оптичному волокну одночасно передаються декілька інформаційних каналів на різних довжинах хвиль, що дозволяє максимально ефективно використовувати можливості оптичного волокна. Технологія WDM дозволяє в багато разів збільшити пропускну спроможність волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ), не прокладаючи нові кабелі і не встановлюючи на кожне волокно нове обладнання.

Спрощена схема однонаправленої WDM системи наведена на рис. 2.17. Схема включає термінальні мультиплексори **ТМ** (наприклад, апаратура SDH або АТМ), передавач, що складається з набору лазерних випромінювачів **L** (поодиночі на кожну довжину хвилі λ_i), підключених до оптичного мультиплексора **MUX** (Multiplexor), що виконує об'єднання випромінюваних хвиль у передавальне оптичне волокно. При цьому для збільшення дальності зв'язку на виході передавача встановлюється оптичний підсилювач, а з деяким інтервалом

уздовж волокна – лінійні оптичні підсилювачі. Причому залежно від відстані, швидкості цифрового потоку і типу використовуваного волокна сигнал може прямувати через модуль компенсації дисперсії, що передбачається, як правило, на кожному ступені посилення. На приймальному боці сигнал з виходу оптичного волокна може бути посилений оптичним передпідсилювачем, увімкненим на вході оптичного демультиплексора DEMUX (Demultiplexor), що служить для розділення сигналів по довжині хвилі, направляючи їх на відповідні фотодіоди **FD**, а потім – на приймальні термінальні мультиплексори **TM**.

Для того щоб компоненти систем WDM були взаємозамінні і могли взаємодіяти між собою, необхідно використовувати стандартний набір частот (довжин хвиль). Всіма питаннями, пов'язаними зі стандартизацією систем WDM займається міжнародний орган стандартизації – ІТУ-Т. Специфікація ІТУ-Т G.692 з оптичних інтерфейсів для багатоканальних систем з оптичними підсилювачами визначає стандартний набір частот – частотний план систем WDM.

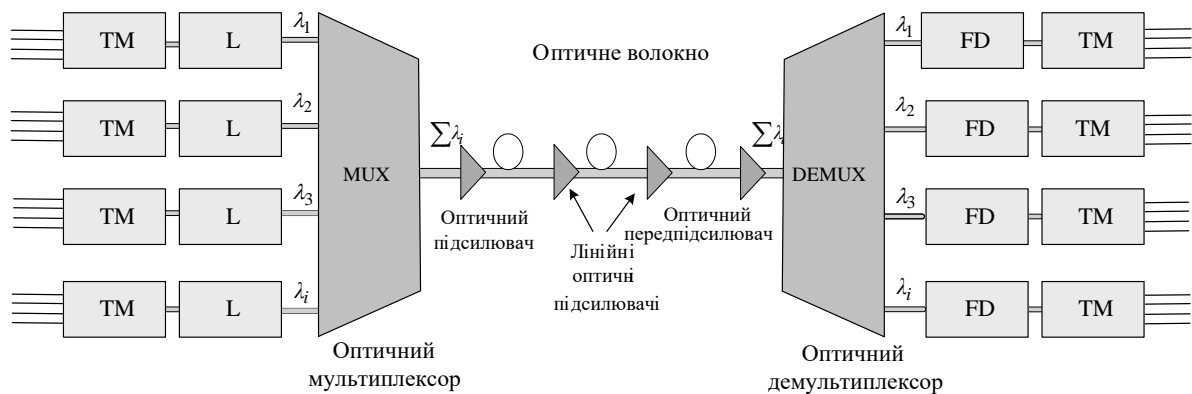


Рис. 2.17. Структурна схема однонаправленої WDM системи

Відповідно до рекомендацій G.692 до систем передачі з WDM висуваються вимоги сумісності за оптичними інтерфейсами з апаратурою існуючих однохвильових систем передачі SDH. У рекомендаціях G.692 визначені довжини хвиль і оптичні частоти для кожного каналу. Згідно з цими рекомендаціями багатохвильові системи передачі працюють у

діапазоні довжин хвиль 1530 ... 1565 нм. Для цього встановлений стандарт довжин хвиль, що є сіткою оптичних частот, в якій розписані регламентовані значення оптичних частот від 196,1 ТГц до 192,1 ТГц (1 ТГц = 10^{12} Гц) з інтервалами 100 ГГц і довжинами хвиль від 1528,77 нм до 1560,61 нм з інтервалом 0,8 нм. Стандарт складається з 41 довжини хвилі, тобто розрахований на 41 канал. Проте на практиці використовується 39 каналів з представленої сітки частот, оскільки два крайніх не використовуються, тому що вони знаходяться на схилах частотної характеристики оптичних підсилювачів, вживаних у системах WDM.

Останнім часом встановилася чітка тенденція зменшення частотного інтервалу між каналами – до 50 ГГц і навіть до 25 ГГц, що призводить до щільнішого розташування каналів у відведеному діапазоні довжин хвиль (1530 ... 1565 нм).

У наш час прийнято виділяти три типи систем WDM: звичайні (WDM), щільні DWDM (Density Wavelength Division Multiplexing) і високощільні HDWDM (High Density Wavelength Division Multiplexing). Хоча точні межі між ними чітко не визначені, розглянемо варіант класифікації, заснований на історичній практиці розроблення WDM систем і вказаному раніше стандарті G.692 з його канальним планом.

1. WDM системи мають частотне рознесення каналів не менше 200 ГГц, що зараз дозволяють мультиплексувати не більше 16 каналів.

2. DWDM системи забезпечують рознесення каналів не менше 100 ГГц і дають можливість мультиплексувати не більше 39 – 41 каналів.

3. HDWDM системи підтримують рознесення каналів 50 ГГц і менше. Такі системи в наш час дозволяють мультиплексувати більше 41 каналу.

2.3.3. Техніка оптичного частотного мультиплексування

Передавачі. У перших волоконно-оптичних передавачах електричні і електронно-оптичні елементи були окремими модулями. Сучасні передавачі мають гібридну конструкцію. Лазерні випромінювачі та інтегральні мікросхеми, котрі

модулюють випромінювання, об'єднані в єдиний компактний модуль, що дозволяє досягти великих частот модуляції і високої надійності. Такий модуль є, по суті, електронно-оптичним перетворювачем, в якому інтенсивність вихідного світлового сигналу модулюється вхідним цифровим електричним сигналом. При низьких швидкостях передачі модулюється керувальний струм (лазери з внутрішньою модуляцією), при високих – сам оптичний сигнал (лазери з зовнішньою модуляцією).

Фотоприймачі. Оптичний фотоприймач перетворює вхідні оптичні сигнали на електричні. Оптичний сигнал подається на фотоприймач безпосередньо з оптичного волокна, що забезпечується традиційним способом – їх торцевою стиковкою. Одержаний на фотоприймачі електричний сигнал необхідно підсилити до необхідного рівня і внести при цьому якомога менше шумів. Може знадобитися також фільтрація електричного сигналу фотоприймача. Всі ці операції звичайно виконуються одним гібридним модулем (що включає і модуль приймача), на який поступає вхідний оптичний сигнал з волокна. Модуль формує на виході відфільтрований електричний сигнал, який потім потрібно відповідним чином демодулювати. Складність процесу демодуляції залежить від технології модуляції, що використовується.

У лінії зв'язку після оптичного передавача часто встановлюють атенюатори, як показано на рис. 2.18, що дозволяють зменшувати їх вихідну потужність до рівня, відповідного можливостям розташованих далі мультиплексорів і підсилювачів.

Застосування могутніх лазерних випромінювачів у передавачах виправдане за відмови від необхідності використання проміжних підсилювачів сигналу на лінії. При цьому на певних ділянках мережі може знадобитися ослаблення потужності сигналу за допомогою атенюатора, щоб велика потужність сигналу не призводила до нелінійних явищ у деяких компонентах систем WDM. Виборче (за довжинами хвиль) ослаблення потужності часто потрібне і для того, щоб “вирівняти” спектр сигналу на вході оптичного підсилювача і забезпечити рівномірне посилення для всіх каналів.

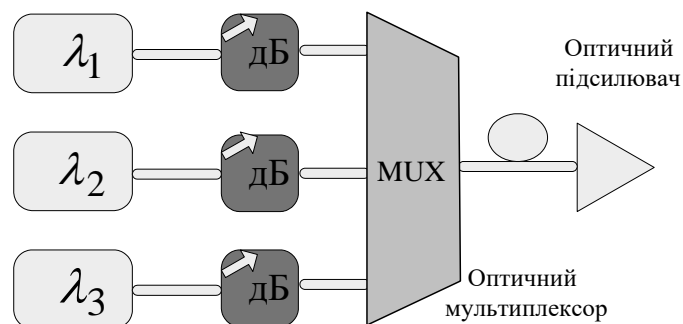


Рис. 2.18. Схема ввімкнення атенуюаторів

Пристрої оптичної крос-комутації. У мережах WDM комутатори застосовують для того, щоб при виникненні несправностей у мережі направити сигнал по іншому оптичному шляху або через іншу мережу.

Спочатку комутація у волоконно-оптичних мережах включала перетворення оптичного сигналу в електричну форму, виконання необхідних перемикачів і зворотне перетворення сигналу в оптичну форму. Цей громіздкий і дорогий процес обмежував швидкість комутації і знижував надійність систем WDM. Тому величезну практичну важливість придбали пристрої оптичної крос-комутації ОХС (Optical Cross Connect), в яких не відбувається оптоелектронного перетворення.

Для перенаправлення декількох каналів можуть використовуватися прості оптичні перемикачі. Проте вони не підходять для складної архітектури (кільцевої, комірчастої) мережі з великою кількістю вузлів і точок доступу, де необхідна гнучка швидка комутація великого числа каналів. Кілька років тому почали упроваджуватися технології оптичної крос-комутації.

Спочатку комутація була оптомеханічною – виконувалася за допомогою крихитних дзеркал, розміщених на шляху оптичного променя. Використання мікротехнології і технології на основі систем MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) дозволяє розмістити безліч комутуючих лінз і мікродзеркал разом з їх приводами на одному кремнієвому кристалі. Такі пристрої можуть мати сотні портів, володіти низькими втратами і використовуватися в широкому діапазоні довжин хвиль.

У наш час з метою розроблення пристроїв крос-комутації вивчаються можливості застосування повністю оптичних технологій на основі оптичних хвилеводів, рідких кристалів і технології циліндрових магнітних доменів, параметри яких можна швидко змінювати за допомогою температури, керувального електричного струму або оптичних вентилів (окремих оптичних підсилювачів, що можна швидко вмикати і вимикати).

Постійно зростаюча потреба на швидке, надійне і недороге обладнання для оптичної комутації в найближчому майбутньому стимулюватиме наукові дослідження і розробки в цій області.

Адресні пристрої введення/виведення каналів забезпечують селективну маршрутизацію каналів у системах WDM. У цих пристроях оптичні комутатори застосовуються разом з іншими компонентами, заснованими на технології комутації волокон або на технології комутації довжини хвилі. Адресні пристрої введення/виведення каналів дають можливість здійснювати маршрутизацію повністю на оптичному рівні і виключають, таким чином, необхідність перетворення оптичного сигналу в електричний і потім назад. Загальна схема пристрою оптичної крос-комутації ОХС зображена на рис. 2.19.

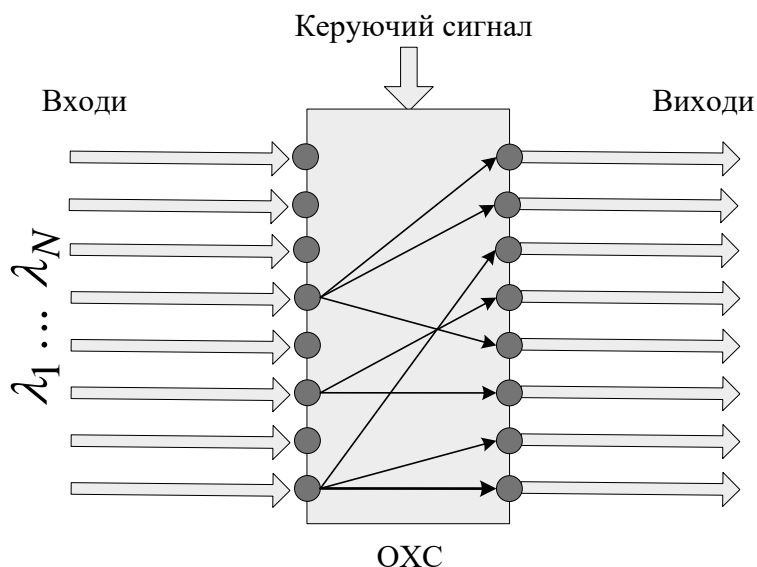


Рис. 2.19. Загальна схема пристрою оптичної крос-комутації

У цьому пристрої оптичні канали з різними довжинами хвиль, що поступають на вхідні порти, можуть перемикатися між всіма вихідними портами довільно.

У системах WDM часто виникає необхідність виділяти окремі інформаційні канали з заданою довжиною хвилі. У наш час є повністю пасивні оптичні пристрої, що виконують цю функцію і називаються хвильовими розгалуджувачами.

У перших системах WDM хвильові розгалуджувачі скрізь використовувалися для розділення довжин хвиль 1310 нм і 1550 нм або для об'єднання сигналу накачування з довжиною хвилі 980 нм або 1480 нм з вхідним сигналом з довжиною хвилі 1550 нм у волокні, легованому ербієм, що необхідно для роботи оптичного підсилювача.

Пристрої компенсації дисперсії. Показник заломлення оптичного волокна залежить від довжини хвилі сигналу, що призводить до залежності швидкості розповсюдження сигналу від довжини хвилі (матеріальна дисперсія). Навіть якщо показник заломлення не залежав би від довжини хвилі, сигнали різних довжин хвиль все одно розповсюджувалися б з різною швидкістю через внутрішні геометричні властивості волокна (хвилеводна дисперсія). Підсумкова дія матеріальної і хвилеводної дисперсій називається хроматичною дисперсією.

Хроматична дисперсія призводить до розширення оптичних імпульсів у міру їх розповсюдження по волокну. При великій протяжності лінії зв'язку це виявляється у тому, що імпульси, котрі близько йдуть, починають перекриватися, що ускладнює їх виділення. Пристрої компенсації дисперсії DCD (Dispersion Compensation Devices) додають сигналу рівну за величиною, але протилежну за знаком, дисперсію і відновлюють первинну форму імпульсів. Найбільш поширені два типи пристроїв DCD – волокна, компенсуючі дисперсію DCF (Dispersion Compensating Fibers), і ґрати, що компенсують дисперсію DCG (Dispersion Compensating Gratings).

Мультиплексори і демультиплексори. Кожен лазерний передавач у системі WDM видає сигнал на одній із заданих частот. Всі ці сигнали (канали) необхідно мультиплексувати (об'єднати один з одним) в єдиний складовий сигнал. Пристрій, що виконує цю функцію, називається оптичним

мультиплексором. Аналогічний пристрій на іншому кінці лінії зв'язку розділяє складовий сигнал на окремі канали і називається оптичним демультиплексором. Схема ввімкнення мультиплексора і демультиплексора зображена на рис. 2.20.

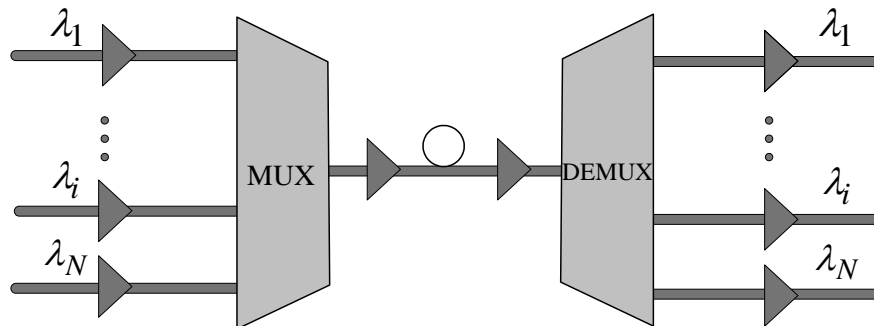


Рис. 2.20. Схема ввімкнення мультиплексора і демультиплексора

Оптичне мультиплексування і демультиплексування засноване на комбінованих або розташованих послідовно один за одним вузькосмугових фільтрах. Зокрема, для фільтрації застосовують тонкоплівкові фільтри, волоконні або об'ємні бреггівські дифракційні ґрати, зварні біконічні волоконні розгалужувачі, фільтри на основі рідких кристалів, пристрої інтегральної оптики (матриці фазових хвилеводних дифракційних ґрат або фазари).

У наш час найбільшого поширення набули пристрої оптичного мультиплексування і демультиплексування з частотним інтервалом між окремими каналами в 100 ГГц ($\sim 0,8$ нм), найпоширеніший в існуючих системах WDM. Пристрої мультиплексування, що з'являються останнім часом, можуть забезпечити велику густину розміщення каналів з частотним інтервалом 50 ГГц і менше. Сучасні оптичні мультиплексори створюються переважно на основі тонкоплівкових фільтрів, рідше – на матрицях хвилеводних дифракційних ґрат і волоконних бреггівських ґратах. При подальшому збільшенні густини розміщення каналів у системах DWDM і посилюванні вимог до оптичних пристроїв MUX/DEMUX, мабуть, змінюватиметься і спектр використовуваних технологій.

Оптичні мультиплексори введення/виведення каналів.

Мультиплексори і демультиплексори за допомогою різних методів хвильового розділення об'єднують декілька оптичних сигналів для передачі по одному волокну і розділяють ці сигнали після передачі. Проте часто вимагається додати в складовий сигнал або виділити з нього тільки один канал, не змінюючи при цьому всю структуру сигналу. Для цього застосовують оптичні мультиплексори введення/виведення каналів OADM (Optical Add/Drop Multiplexer), що виконують цю операцію без перетворення сигналів всіх каналів в електричну форму і потім назад. Схема ввімкнення оптичного мультиплексора введення/виведення зображена на рис. 2.21.

У наш час існують різноманітні пристрої, що дозволяють додавати і виділяти канали SDH з мереж WDM. Розробляються мультиплексори введення/виведення, конфігурацію яких можна змінювати дистанційно.

Оптичні підсилювачі. Підсилювачі на волокні, легованому ербієм, EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) за останні декілька років провели революцію в телекомунікаційній промисловості. Підсилювачі EDFA забезпечують безпосереднє посилення оптичних сигналів, без їх перетворення в електричні сигнали і назад, а також мають низький рівень власних шумів.

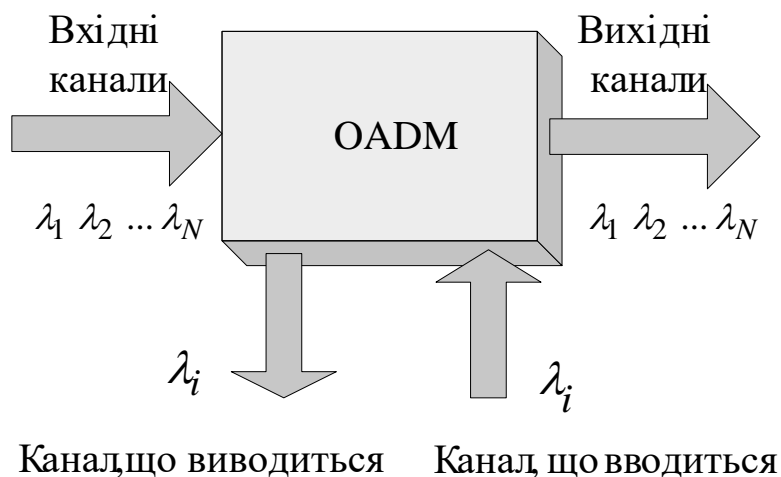


Рис. 2.21. Схема ввімкнення оптичного мультиплексора введення/виведення

Підсилювач EDFA складається з відрізка волокна, легованого ербієм. У такому волокні коливання певних довжин хвиль можуть посилюватися за рахунок енергії зовнішнього джерела накачування. У простих конструкціях EDFA посилення відбувається в достатньо вузькому діапазоні довжин хвиль – приблизно від 1525 нм до 1565 нм. У ці 40 нм уміщається декілька десятків каналів DWDM.

Найважливіший компонент підсилювача EDFA – лазер накачування. Він є джерелом енергії, за рахунок якої підсилюється оптичний сигнал. Для накачування підсилювачів EDFA підходять лазери з довжинами хвиль випромінювання 980 нм і 1480 нм. Енергія лазера накачування розподіляється в підсилювачі EDFA між всіма оптичними каналами. Чим більша кількість каналів, тим потрібна більша потужність накачування. У підсилювачах EDFA, розрахованих на велику кількість каналів, часто використовується декілька лазерів накачування.

Оскільки підсилювачі EDFA є оптичними, їх можна підключати безпосередньо до різного обладнання – комутаторів ATM, мультиплексорів SDH без негативного впливу один на одного. Така гнучкість – одна з основних переваг використання оптичних підсилювачів у системах DWDM.

Мережі з підсилювачами EDFA мають численні переваги. Пропускнуну спроможність таких мереж можна нарощувати економічно і поступово, додаючи нові канали у міру зростання потреби. Застосування підсилювачів EDFA дозволяє створювати повністю оптичні мережі, в яких обробка сигналу електронними компонентами відбувається тільки в початковій (де інформація вперше потрапляє в мережу) і кінцевій (де інформація досягає кінцевого одержувача) точках мережі. Кожна лінія зв'язку рівня STM-16 (сигнали систем синхронної цифрової ієрархії) обробляється в системі DWDM як окремий канал на окремій довжині хвилі, завдяки чому велика частина існуючого мережного обладнання безпосередньо включається до складу систем DWDM. За рахунок цього початкова вартість введення систем DWDM в експлуатацію достатньо низька.

Крім EDFA, є й інші варіанти оптичних підсилювачів. Альтернативні розробки направлені як на розширення або зсув

робочого діапазону, так і на спрощення конструкції і, відповідно, зменшення вартості оптичних підсилювачів.

Оптичне волокно. Оптичне волокно, укладене в кабель, є одним з найважливіших компонентів волоконно-оптичної мережі. Волокно – це фізичне середовище, по якому здійснюється передача інформації. Перші волокна, що стали широко використовуватися на лініях зв'язку великої протяжності, – *стандартні одномодові волокна* (специфікація G.652 за класифікацією ІТУ).

Не дивлячись на зростання швидкостей передачі даних і появу технології DWDM, що дозволяє у багато разів збільшити пропускну спроможність вже прокладеного кабелю, інтенсивність прокладання кабелю у всьому світі в майбутньому не впаде. Недавні дослідження показали, що передача каналів DWDM по волокну G.652 може відбуватися на значні відстані без втрати якості сигналу при використанні пристроїв компенсації дисперсії.

Виробники волокна розробили і інші типи волокон: *волокно зі зміщеною дисперсією* (G.653 за класифікацією ІТУ) і *волокно з ненульовою зміщеною дисперсією* (G.655 за класифікацією ІТУ). Розгляд особливостей вказаних волокон виходить за рамки даного навчального посібника. Зазначимо тільки, що волокно G.655 найкраще підходить для використання в системах DWDM.

2.4. Часове розділення каналів

2.4.1. Загальні принципи часового розділення каналів

Суть часового розділення каналів (часового мультиплексування) полягає у тому, що тракт передачі надається по черзі для передачі сигналів кожного каналу багатоканальної системи, як показано на рис. 2.22.

На передавальному боці за допомогою комутатора спочатку здійснюється передача імпульсу 1-го каналу, потім наступного каналу і так до останнього каналу за номером N , після чого процес повторюється періодично. Таким чином, відбувається формування групового сигналу.

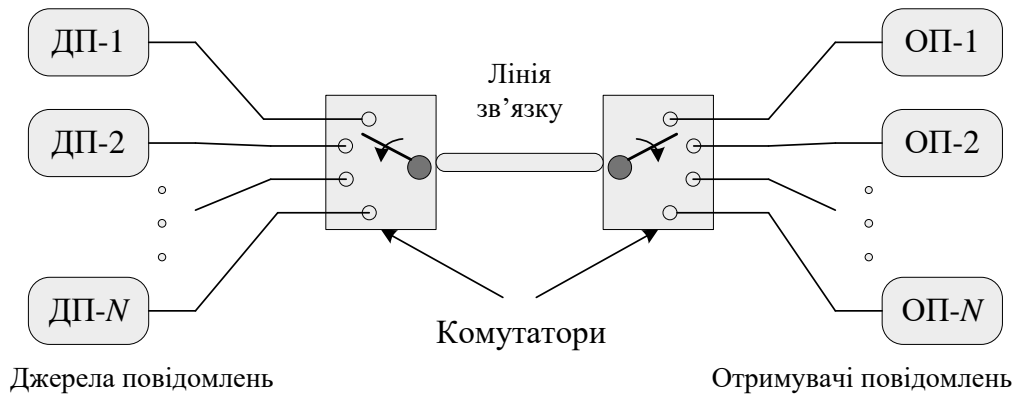


Рис. 2.22. Спрощена схема системи передачі з часовим розділенням каналів

Приклад часового мультиплексування сигналів імпульсно-кової модуляції (ІКМ) наведений на рис. 2.23.

При часовому мультиплексуванні сигналів утворюється часовий цикл групового сигналу, що дорівнює сумі часових (канальних) інтервалів $T_{\hat{\epsilon}_z}$ об'єднаних сигналів:

$$T_{\hat{\epsilon}_z} = \sum_{i=1}^N T_{\hat{\epsilon}_z},$$

де $T_{\hat{\epsilon}_z}$ – тривалість циклу – період об'єднання;

$T_{\hat{\epsilon}_z}$ – тривалість i -го канального інтервалу;

N – кількість канальних інтервалів у циклі.

Операція мультиплексування може проводитися послідовно кілька разів, поступово нарощуючи число об'єднаних каналів i , відповідно, швидкість передачі в групах.

На приймальному боці встановлюється аналогічний комутатор, котрий по черзі підключає груповий тракт до відповідних приймачів.

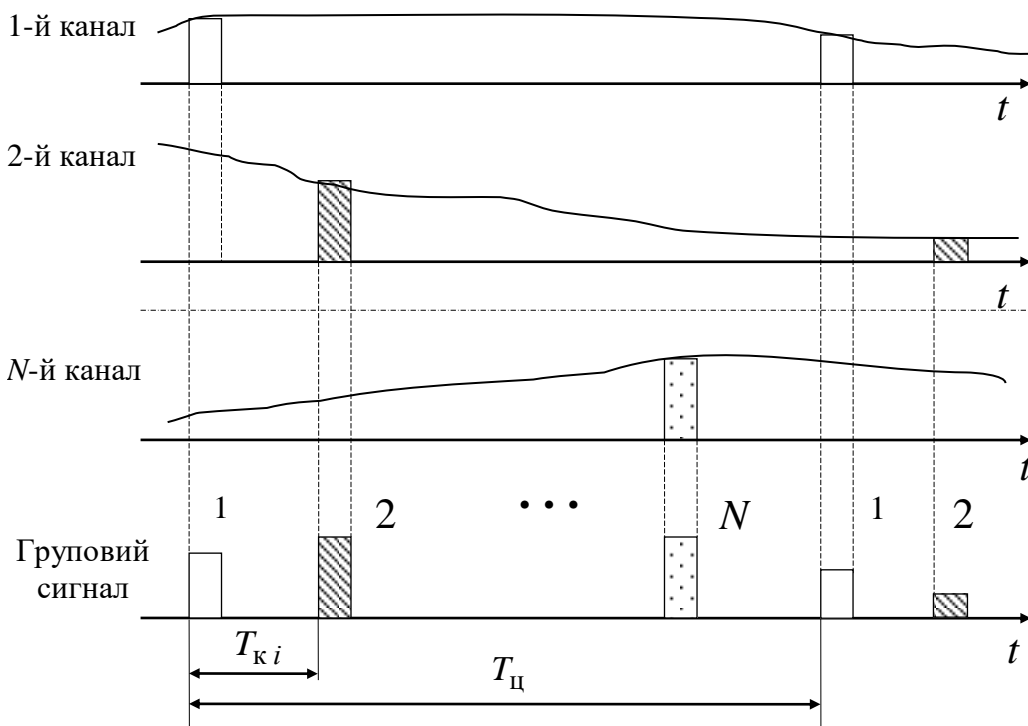


Рис. 2.23. Часове мультиплексування сигналів ІКМ

У певний проміжок часу до групової лінії зв'язку виявляється підключена тільки одна пара приймач/передавач. Це означає, що для нормальної роботи багатоканальної системи з часовим розділенням каналів необхідна синхронна і синфазна робота комутаторів на приймальному і передавальному боках. Для цього один з каналів займають під передачу спеціальних імпульсів синхронізації.

Розрізняють два способи формування групового сигналу: об'єднання за символами (посимвольний) і об'єднання за групами (поканальний, побайтний).

Об'єднання за групами (байтами). При груповому (поканальному або побайтному) об'єднанні до загального тракту по черзі підключаються групи імпульсів від кожного джерела сигналів. На рис. 2.24. як приклад зображено об'єднання трьох цифрових потоків (ЦП).

У кожному потоці об'єднуються трирозрядні кодові групи. Перемикач знаходиться у ввімкненому стані на кожному вході до тих пір, поки не буде передана ціла група символів. Якщо цифрові потоки поступають на входи безперервно, то для

кожного індивідуального потоку потрібен пристрій пам'яті для накопичення вхідних сигналів в очікуванні наступного циклу передачі.

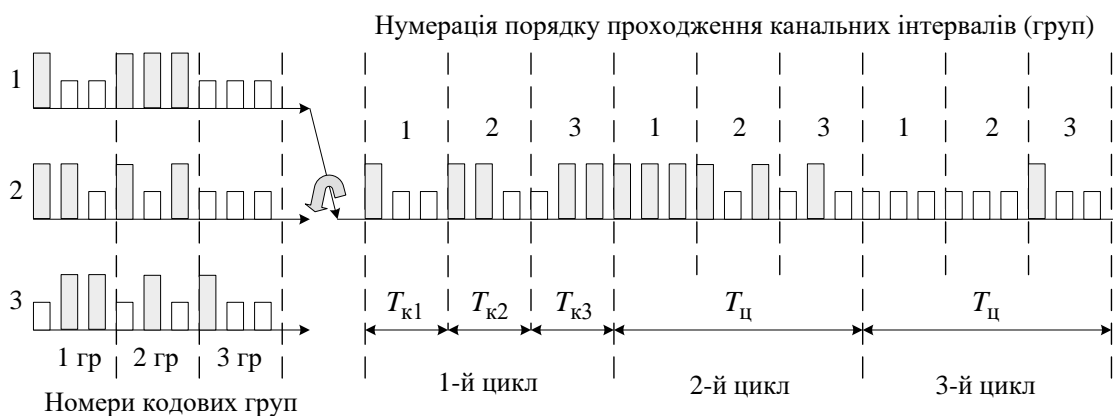


Рис. 2.24. Об'єднання каналів за групами (байтами)

На практиці побайтне об'єднання використовується в системах первинного групоутворення, коли доцільно зберегти цілісність кодових груп символів кожного каналу, а також у системах синхронної цифрової ієрархії.

Об'єднання за символами (бітами). При посимвольному об'єднанні цифрові потоки об'єднуються символ за символом, як показано на рис. 2.25. Розглянемо схему посимвольного об'єднання чотирьох цифрових потоків, зображену на рис. 2.26, і часові діаграми роботи цієї схеми, зображені на рис. 2.27. Цифрові потоки ЦП1 – ЦП4 подаються в схеми збігу П1 – П4, що по черзі відкриваються сигналами з виходів кільцевого регістра зсуву, керованого імпульсною послідовністю тактової частоти від задавального генератора генераторного обладнання (ГО). На виході схеми ЧИ з'являється груповий цифровий потік, тривалість символів якого зменшується в порівнянні з вхідними символами в 4 рази. Очевидно, що необхідними умовами такого об'єднання є синхронність і синфазність об'єднуваних потоків.

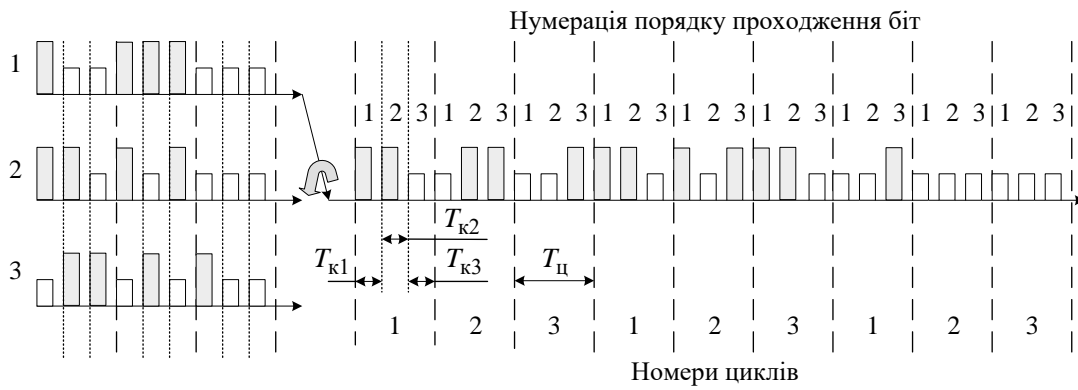


Рис. 2.25. Об'єднання каналів за символами (бітами)

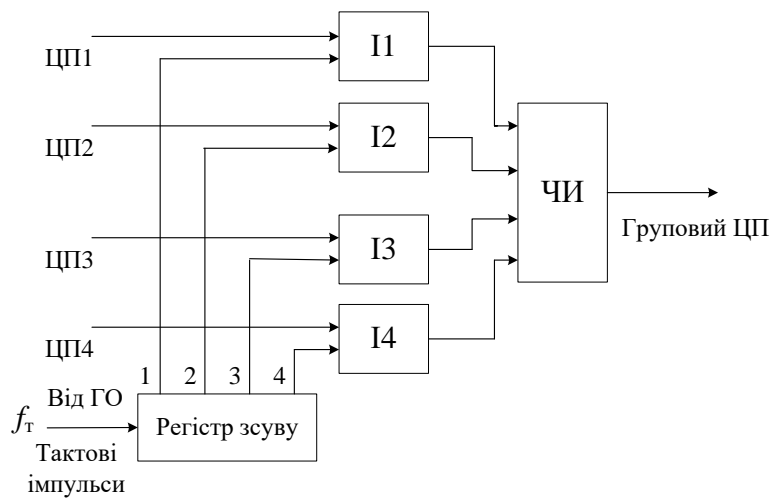


Рис. 2.26. Схема посимвольного об'єднання

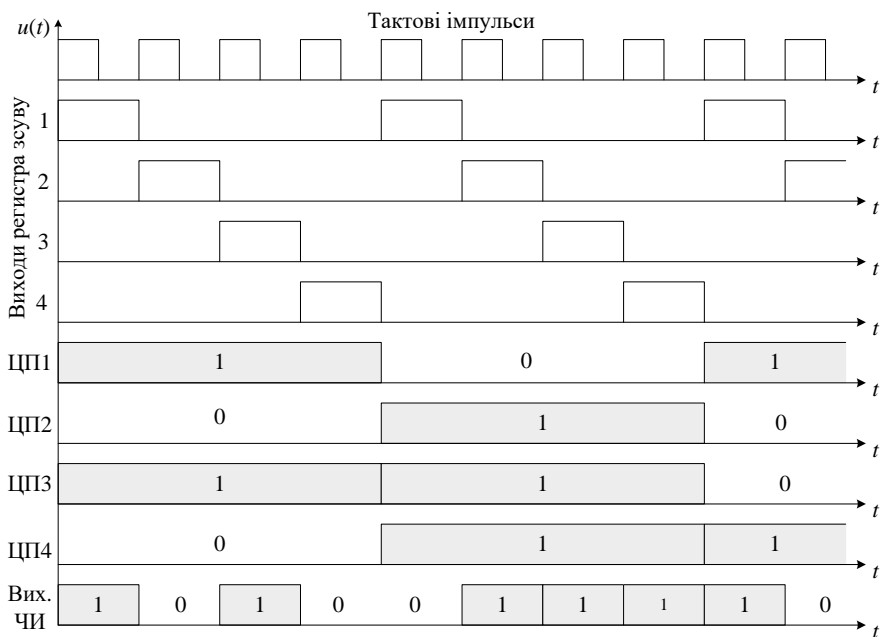


Рис. 2.27. Часова діаграма при посимвольному об'єднанні

При розділенні групового ЦП кожен четвертий символ прямує у свій приймач, де формуються початкові потоки ЦП1 – ЦП4. При розділенні необхідно здійснити початкове установлення фази кільцевого регістра зсуву щодо групового ЦП, що приходить.

На практиці побітне мультиплексування використовується в системах плезіохронної цифрової ієрархії.

2.4.2. Синхронне та асинхронне об'єднання цифрових потоків

Звичайно об'єднувані потоки формуються в апаратурі первинних систем передачі, задавальні генератори яких, як правило, не синхронізовані між собою і з генератором обладнання часового групоутворення, що призводить до деякої відмінності швидкостей об'єднаних цифрових потоків. Тому таке об'єднання цифрових потоків називають *асинхронним*.

У разі асинхронного об'єднання необхідно спочатку перетворити тактові частоти вхідних ЦП так, щоб вони стали кратними тактовій частоті групового ЦП, а потім встановити їх необхідні часові співвідношення, тобто забезпечити синфазність.

При синхронному об'єднанні швидкості цифрових потоків свідомо кратні тактовій частоті групового ЦП, тому синхронне об'єднання можна розглядати як окремий випадок асинхронного. У цьому випадку необхідне лише установлення часових співвідношень між вхідними потоками.

Тактові частоти визначають швидкість передачі символів цифрового потоку, тому перетворення тактових частот перед об'єднанням називається *узгодженням швидкостей* вхідних і групового цифрових потоків.

При узгодженні швидкостей з метою забезпечення синхронності і синфазності декількох цифрових потоків необхідно проводити записування символів цих потоків у запам'ятовуючі пристрої (ЗУ), зображені на рис. 2.28, частотами записування, що дорівнюють тактовим частотам ЦП1 – ЦП N , а також зчитування інформації з ЗУ за допомогою сигналів зчитування, що слідує з частотою $f_{\varphi \rightarrow \delta}$ і одержуються від одного генераторного обладнання. Записування і зчитування

символів проводиться через певні проміжки часу, називані періодами записування $T_{\text{зап}} = 1/f_{\text{зап}}$ і зчитування $T_{\text{зчит}} = 1/f_{\text{зчит}}$.

Частоти записування і зчитування можуть знаходитися в різних співвідношеннях між собою. Якщо $f_{\text{зчит}} = f_{\text{зап}}$, то на кожен записаний символ формується імпульс зчитування, і вхідна і вихідна імпульсні послідовності ЗУ не відрізняються між собою. Часовий інтервал між моментами записування і зчитування – постійна величина. Узгодження швидкостей у цьому випадку не потрібно, оскільки швидкість вхідного потоку відповідає частоті зчитування, а отже, вона кратна швидкості групового ЦП.

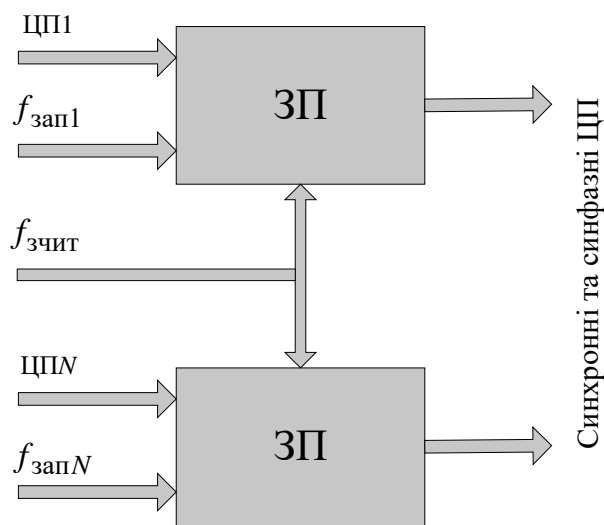


Рис. 2.28. Асинхронне об'єднання цифрових потоків за допомогою запам'ятовуючого пристрою

Якщо $f_{\text{зап}} < f_{\text{зчит}}$, то часовий інтервал між моментами записування і зчитування зменшується після кожного зчитування до тих пір, поки не наступить момент, коли при черговому зчитуванні на виході ЗУ нової інформації не з'явиться, оскільки в інтервалі $T_{\text{зчит}}$ інформаційні символи не записувалися. У цьому випадку в лічній імпульсній послідовності відбудеться повторення попереднього символу, тобто *позитивний часовий зсув*, що зображено на рис. 2.29. Для наочності на цьому ж рисунку стрілками показані, які символи на вході ЗУ будуть лічені на вихід ЗУ у відповідний момент зчитування.

Тривалість часового зсуву – інтервалу часу, вільного від нової інформації, дорівнює періоду слідування імпульсів, що зчитують. Після появи часового зсуву знов починається процес зменшення інтервалу.

Частота формування часових зсувів залежить від відношення частот записування і зчитування.

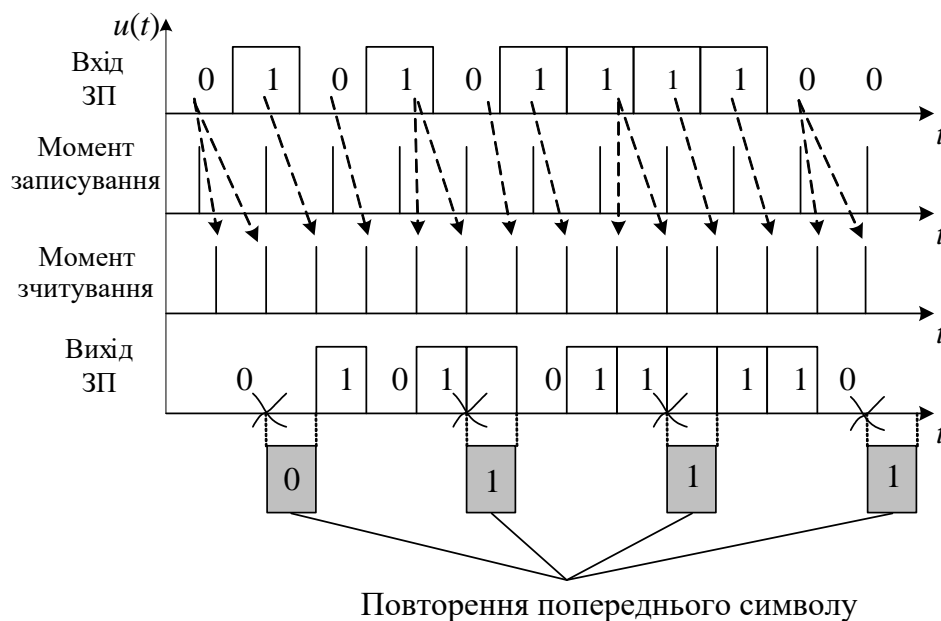


Рис. 2.29. Часова діаграма записування та зчитування символів при $f_{\text{з\`аї}} < f_{\text{з\`ед\`о}}$

Кількість інформаційних символів між сусідніми часовими зсувами дорівнюватиме округленому до найближчого цілого числа значенню:

$$R = \lfloor T_{\text{з\`ед\`о}} / (T_{\text{з\`аї}} - T_{\text{з\`ед\`о}}) \rfloor = \lfloor 1 / (f_{\text{з\`ед\`о}} / f_{\text{з\`аї}} - 1) \rfloor,$$

а період виникнення часових зсувів

$$T_{\text{з\`е}} = (R + 1) T_{\text{з\`ед\`о}}.$$

При синхронному об'єднанні відношення $T_{\text{з\`ед\`о}} / (T_{\text{з\`аї}} - T_{\text{з\`ед\`о}})$ або $1 / (f_{\text{з\`ед\`о}} / f_{\text{з\`аї}} - 1)$ – ціле число. У цьому випадку період

часових зсувів буде постійним ($T_{\pm\zeta} = const$), а лічена послідовність імпульсів називатиметься однорідною.

При $f_{\zeta\ddot{a}\ddot{i}} > f_{\zeta\pm\ddot{e}\ddot{o}}$ часовий інтервал між моментами записування і зчитування збільшується до такого моменту, коли за один період зчитування в елемент пам'яті записуватимуться два символи (рис. 2.30).

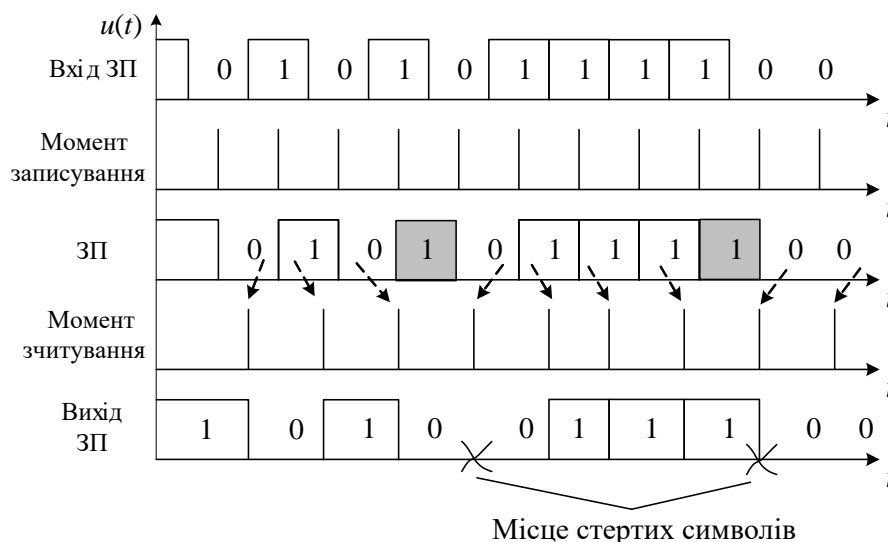


Рис. 2.30. Часова діаграма записування та зчитування символів при $f_{\zeta\ddot{a}\ddot{i}} > f_{\zeta\pm\ddot{e}\ddot{o}}$

Під час надходження другого імпульсу записування протягом $T_{\text{чит}}$ раніше записаний в ЗУ символ стирається, тобто в ліченій послідовності з'явиться *негативний часовий зсув* (на рис. 2.30 символи, що будуть стерті, заштриховані, а стрілками показані символи, котрі будуть лічені на вихід ЗУ у відповідний момент зчитування).

Поява позитивних і негативних часових зсувів порушує структуру цифрового потоку, оскільки в першому випадку в ньому з'являються додаткові інформаційні символи, а в другому – пропадає частина інформаційних символів. Таке явище називають *прослизанням*. Для усунення прослизань необхідно проводити корекцію цифрових послідовностей або узгодження швидкостей.

При позитивному часовому зсуві, коли $f_{\text{çàì}} < f_{\text{ç±èð}}$, в інформаційну послідовність на місце часового зсуву вводяться додаткові символи, що на приймальному боці при відновленні початкового сигналу вилучаються. Така процедура називається *позитивним узгодженням швидкостей*.

При негативному часовому зсуві, коли $f_{\text{çàì}} > f_{\text{ç±èð}}$, здійснюється *негативне узгодження швидкостей*, при якому “зайві” інформаційні символи вилучаються і передаються на приймальний бік по окремому службовому каналу, після чого вони вводяться в прийнятий по основному тракту цифровий сигнал на колишнє місце.

При синхронному об’єднанні ЦП імпульсна послідовність на виході ЗУ однорідна, тобто період виникнення часових зсувів постійний, вони знаходяться на строго певних місцях і повторюються через певне число інформаційних символів, що спрощує пошук часових зсувів на приймальному боці. Тому корекцію ЦП в цьому випадку можна проводити без передачі спеціальних команд, що управляють процесом узгодження швидкостей.

На відміну від часових зсувів, що виникають при синхронному об’єднанні, часові зсуви при асинхронному об’єднанні потоків, залежні від нестабільності частот генераторів, не мають постійного періоду проходження і виникають у довільні моменти часу. Тому корекція цифрових потоків проводиться спеціальними командами *узгодження швидкостей*, що формуються при виникненні часових зсувів на передавальній станції, розшифровуються на приймальній, де за командами узгодження швидкостей проводиться корекція цифрових потоків, котрі приймаються.

Оскільки об’єднувані ЦП, як правило, не синхронізовані між собою в апаратурі часового групоутворення (мультиплексування), основним режимом роботи є асинхронний. Пропускна спроможність тракту при асинхронному об’єднанні ЦП дещо гірша, ніж при синхронному, за рахунок передачі команд узгодження швидкостей.

2.4.3. Організація циклової структури цифрового потоку

Як було сказано вище, процес мультиплексування полягає в циклах послідовного об'єднання індивідуальних компонентних потоків, що періодично повторюються, в один загальний груповий потік.

На приймальному боці при розділенні (демультиплексуванні) групового цифрового потоку дуже важливо в необробленому потоці бітів (символів), що приймаються, правильно визначити початок і кінець циклів індивідуальних компонентних потоків. Для розв'язання цієї задачі в безперервному потоці імпульсів формується періодична мітка, що циклічно повторюється, або логічна ознака, котра обслуговує групу компонентних сигналів, що дозволяє достатньо просто знайти її в цифровому потоці і використати як часову точку відліку.

На передачі цифровий потік розбивається на певні логічні структури, звані цикли (від англ. frame – рамка). Ще їх називають блоками даних, кадрами і т.д. Формально цикл (frame) визначається як періодичний набір послідовності часових інтервалів, у якому відносне положення кожного часового інтервалу може бути визначене (ідентифіковано). Цикл – основна одиниця передачі цифрової інформації, використовувана в біт-орієнтованих протоколах.

Цикли мають спеціально організовані групи символів для визначення початку циклу в послідовності наступних один за одним бітів (рис. 2.31). Ці групи символів називаються цикловими синхросигналами ЦСС (від англ. FAS – Frame Alignment Signal), а іноді – прапорами. Звичайно ЦСС розміщують на початку циклу.

Структура циклу звичайно містить власну інформацію контролю (управління) для адресації і перевірки помилок.

Циклова синхронізація має першорядну вагу в цифровій передачі. Значення бітів, що приймаються, або ж, наприклад, правильне демультиплексування становлячих потоків залежить від точного визначення циклу.

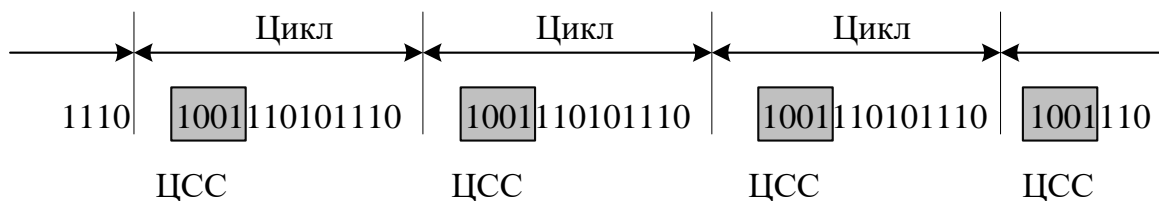


Рис. 2.31. Циклова структура цифрового потоку

Алгоритм визначення циклів (циклової синхронізації) на прийманні включає два основні стани – синхронізму і позасинхронізму, і два основні режими:

- пошуку ознак синхронізації циклів, тобто визначення циклів у потоці бітів, що приймається;
- утримання, коли приймальне обладнання знаходиться в стані циклового синхронізму і безперервно контролює межі циклу там, де, за припущенням, вони мають бути.

У початковому стані, наприклад при ввімкненні апаратури, система знаходиться поза цикловим синхронізмом. Для встановлення режиму циклового синхронізму ведеться “ковзний” пошук ЦСС, послідовно відстежуючи всі комбінації з довжиною, що дорівнює довжині ЦСС, на всіх позиціях потоку бітів, що приймається.

Як тільки знайдена послідовність бітів, еквівалентна ЦСС, система переходить у стан попереднього циклового синхронізму і його подальшого утримання для перевірки того, що це слово дійсно знаходиться там, де, за припущенням, починаються цикли. Під час пошуку комбінація ЦСС може імітуватися на будь-яких позиціях інформаційними бітами, тому пристрій синхронізації циклів для захисту від помилкових сигналів ЦСС або помилок у лінії переходить в нормальний стан утримання синхронізму тільки після декількох послідовно прийнятих безпомилкових синхрослів. Під час утримання синхронізму комбінація ЦСС може бути не пізнана через збої у лінії, зникнення циклового сигналу, прослизання циклу і т.ін. У цьому випадку пристрій виходить зі стану утримання синхронізму в режим пошуку тільки після декількох послідовно прийнятих помилкових комбінацій на місці ЦСС.

Задачу розроблення ефективного алгоритму циклової синхронізації можна сформулювати так:

- у нормальних умовах мінімізувати імовірність втрати циклового синхронізму через помилки в лінії (вимушеної втрати синхронізму);
- за відсутності синхронізму мінімізувати імовірність помилкового синхронізму в результаті імітації комбінації ЦСС випадковим потоком бітів, що приймаються;
- у разі втрати циклового синхронізму мінімізувати час його відновлення.

2.4.4. Синхронний і асинхронний режими організації передачі

У наш час існує досить велика кількість систем мультимплексування, що використовуються на практиці. Великий клас систем з TDM за принципами організації режиму передачі можна розділити на дві великі групи (рис. 2.32):

- синхронне TDM або синхронний режим організації передачі – СРП;
- асинхронне TDM або асинхронний режим передачі – АРП.

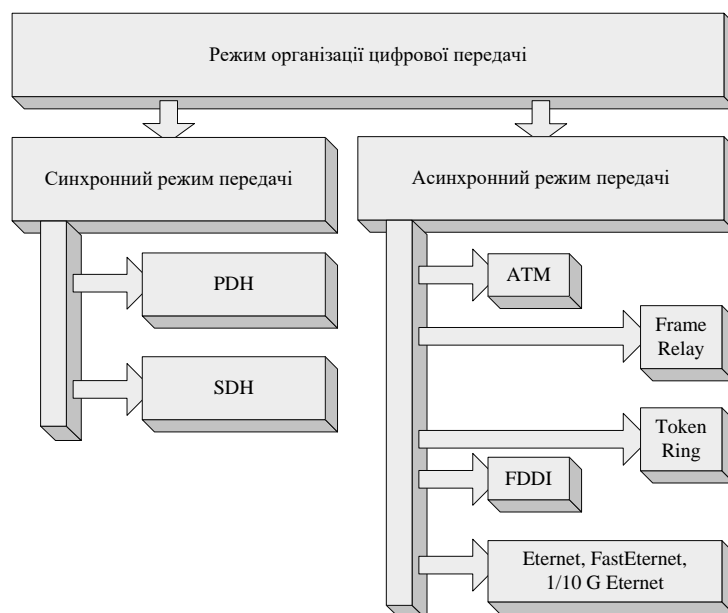


Рис. 2.32. Класифікація способів мультимплексування за принципами організації режиму передачі

Синхронне TDM включає системи передачі, що містять цикли з визначеним, кінцевим числом часових інтервалів. Інформація, що передається, розміщується в конкретному місці циклу. Кожен канал може бути однозначно визначений на позиції часового інтервалу в циклі. Найменування “синхронне” вибрано тому, що канали або тракти передачі розміщуються на відповідних часових інтервалах і завжди прибувають в один і той же час щодо відмітки циклу (циклового синхросигналу), що демонструє їх синхронізм щодо відмітки циклу. Таким чином, такі системи організують синхронний режим передачі в значенні циклової синхронізації.

Синхронний режим передачі використовується у всіх цифрових системах передачі плезіохронної і синхронної ієрархій, цифрових автоматичних телефонних станціях.

Асинхронне TDM або асинхронний режим передачі припускає передачу інформації без організації циклів (використовується пакетний режим передачі або пакетна комутація).

Пакетна комутація полягає в розділенні інформації джерела на пакети, що незалежно передаються і навіть прямують до місця їх призначення по різних маршрутах. Пакети містять сегменти даних джерела (наприклад, кодована мова) плюс деяку інформацію заголовка і можуть бути фіксованої або змінної довжини. Якщо для передачі використовуються пакети змінної довжини, то звичайно говорять про комутацію пакетів, а якщо пакети мають постійну довжину, то їх називають чарунками, а процес передачі відомий як комутація чарунок.

Пакетна комутація є ефективним засобом інтеграції даних і мови або інших сигналів у реальному часі в єдину мережу. Наприклад, для реалізації широкосмугової цифрової мережі інтегрального обслуговування (ШЦМІО або В-ISDN) міжнародними стандартизуючими організаціями був вибраний метод комутації чарунок – асинхронний режим передачі АТМ, що використовує чарунки завдовжки 53 байти.

Метод передачі з комутацією пакетів має такі характерні особливості:

- через випадковий характер пакетної комутації і, зокрема, через утворення черг усередині мережі при транспортуванні

пакети затримуються і поступають до місця їх призначення через випадкові проміжки часу;

– якщо пакети даного виклику маршрутизуються незалежно (тобто кожен може слідувати через мережу по різних трактах), то пакети можуть поступати в пункт їх призначення навіть не в тому порядку, в якому були передані;

– на приймальному боці неможливо виділити тактову частоту джерела інформації (передавача), що ґрунтуються тільки на фізичному рівні вхідного потоку бітів.

При пакетній передачі зі змінним часом доставки або навіть у неправильній послідовності прозоре транспортування мови (або будь-якого іншого трафіка, орієнтованого на комутацію каналів) через мережу з комутацією пакетів вимагає вирішення проблем синхронізації.

Зазначимо, що використання терміну “комутація” замість терміну “мультиплексування” – комутація пакетів, чарунок тощо – цілком коректно, бо комутатори і мультиплексори виконують практично одні і ті ж функції. Існує велика кількість мережних технологій, що використовують режим АРП (рис. 2.32): Ethernet, Frame Relay, АТМ, FDDI, Token Ring тощо.

2.4.5. Оптичне часове мультиплексування

Разом з електронними методами часового мультиплексування розробляються і схеми оптичного часового мультиплексування OTDM (Optical Time Division Multiplexing). Схема системи передачі з повністю оптичним часовим мультиплексуванням восьми цифрових інформаційних потоків ЦП1 – ЦП8 зі швидкостями 10 Гбіт/с зображена на рис. 2.33. Схема включає лазерний випромінювач **L**, модулятори **M1 – M8**, оптичний розподільник, оптичні підсилювачі, суматор і демультимплексор.

Потік оптичних імпульсів лазерного випромінювача **L** з періодом слідування T через оптичний підсилювач подається на оптичний розгалуджувач, що просторово розділяє світловий потік на вісім рівних частин, кожна з яких поступає на оптичні модулятори **M1 – M8**. З виходу кожного з модуляторів

випромінювання проходить через відповідні відрізки оптичних волокон, що виконують роль оптичних ліній затримки. При цьому час затримки з виходу модулятора **M1** вибирається дуже малим, таким, що його можна вважати рівним нулю, після виходу модулятора **M2** оптичні імпульси затримуються на $1/8T$ тощо, а після модулятора **M8** – на час $7/8T$.

Після цього з виходу всіх модуляторів потоки поступають на входи суматора (це такий же пристрій, як і оптичний розподільник, але ввімкнений у зворотному напрямі), з виходу якого груповий цифровий потік після посилення в оптичному підсилювачі подається в лінію передачі (тобто в оптичний кабель).

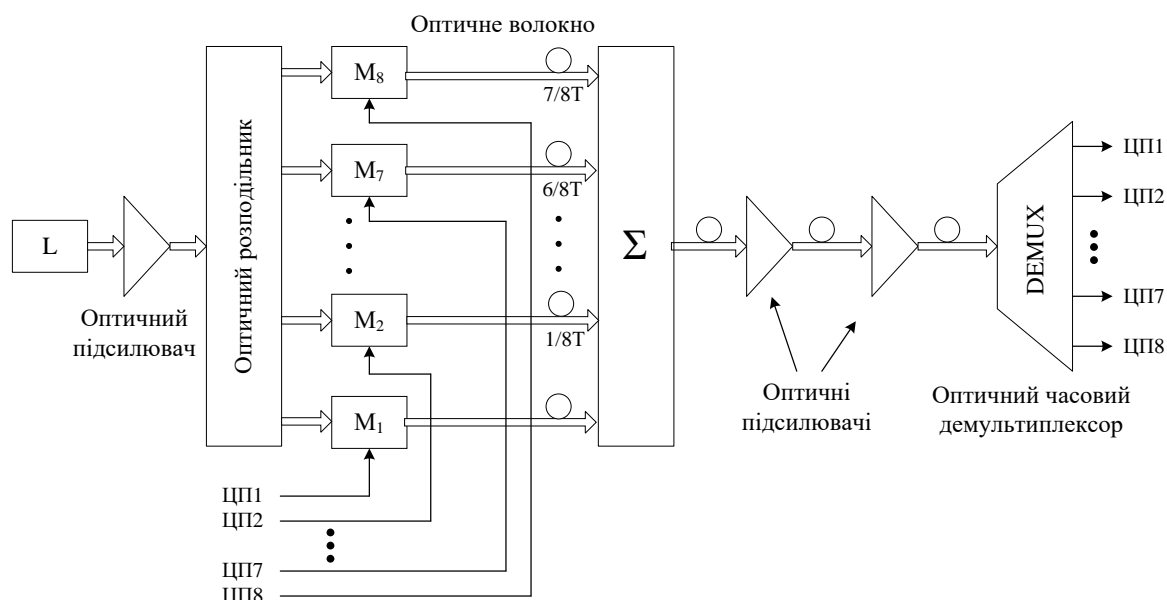


Рис. 2.33. Схема системи передачі з повністю оптичним часовим мультиплексуванням

З виходу лінії оптичний груповий цифровий потік посилюється підсилювачем і подається на оптичний часовий демультимплексор.

Таким чином, в описаній системі методом оптичного часового мультиплексування (OTDM) передається вісім цифрових інформаційних потоків зі швидкостями 10 Гбіт/с. Дана система призначена для передачі цифрових сигналів по оптичному волокну в діапазоні довжин хвиль 1530 ... 1560 нм. У

системі використані повністю оптичні елементи: лазерний випромінювач, оптичні розгалужувачі, модулятори, оптичні підсилювачі і оптичні лінії затримки.

У наш час роботи з розвитку систем OTDM і створення елементної бази для них продовжуються.

2.5. Кодове розділення каналів

2.5.1. Загальні принципи кодового розділення каналів

Принципи кодового розділення каналів – Code Division Multiplexing (CDM) засновані на використанні широкосмугових сигналів (ШСС), смуга яких значно перевищує смугу частот, необхідну для звичної передачі повідомлень, наприклад у вузькосмугових системах з частотним розділенням каналів.

Найбільше поширення кодове розділення каналів набуло, перш за все, у стільникових системах зв'язку. Проте зараз також ведуться роботи зі створення оптичних систем мультиплексування з кодовим розділенням.

Основною характеристикою ШСС є база сигналу, визначувана як добуток ширини спектра сигналу ΔF на тривалість сигналу T :

$$B = \Delta FT .$$

У цифрових системах, що передають інформацію у вигляді двійкових символів, тривалість ШСС T і швидкість передачі повідомлень V зв'язані співвідношенням $T = 1/V$. Тому база сигналу $B = \Delta F / V$ характеризує розширення спектра ШСС щодо ширини спектра повідомлення. Розширення спектра частот передаваних цифрових повідомлень може здійснюватися двома методами або їх комбінацією:

- прямим розширенням спектра частот;
- стрибкоподібною зміною частоти несучої.

При прямому розширенні спектра частот, як показано на рис. 2.34, вузькосмуговий сигнал помножується на псевдовипадкову послідовність (ПВП) з періодом повторення T , що складається з n елементів тривалістю τ_0 кожен.

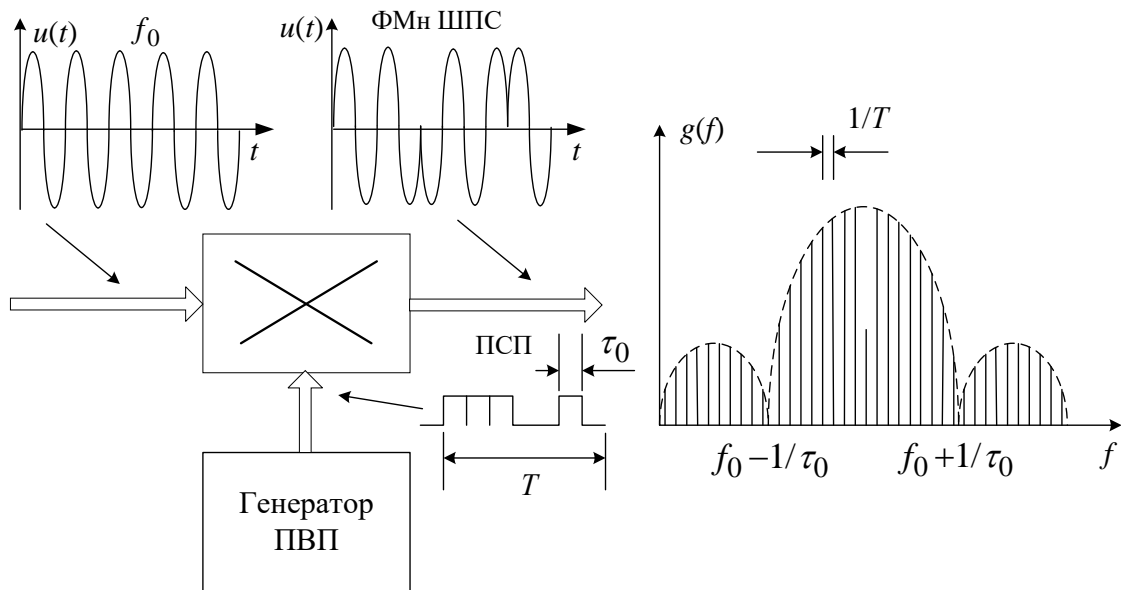


Рис. 2.34. Пряме розширення спектра частот

У цьому випадку база ШСС чисельно дорівнює кількості елементів ПВП $B = T / \tau_0 = n$.

Стрибкоподібна зміна частоти несучої, як правило, здійснюється за рахунок швидкої перебудови вихідної частоти синтезатора частот відповідно до закону формування псевдовипадкової послідовності. Схема формування ШСС за рахунок стрибкоподібної зміни частоти несучої зображена на рис. 2.35. Приймач системи поводитья аналогічно, змінюючи частоту гетеродина за точно таким же алгоритмом, забезпечуючи виділення і подальшу обробку тільки потрібного каналу.

Прийом ШСС здійснюється оптимальним приймачем, що для сигналу з повністю відомими параметрами обчислює кореляційний інтеграл

$$Z = \int_0^T y(t)u(t)dt,$$

де $y(t)$ – сигнал, котрий приймається, що являє собою суму корисного сигналу і завади;

$u(t)$ – опорний (еталонний) сигнал.

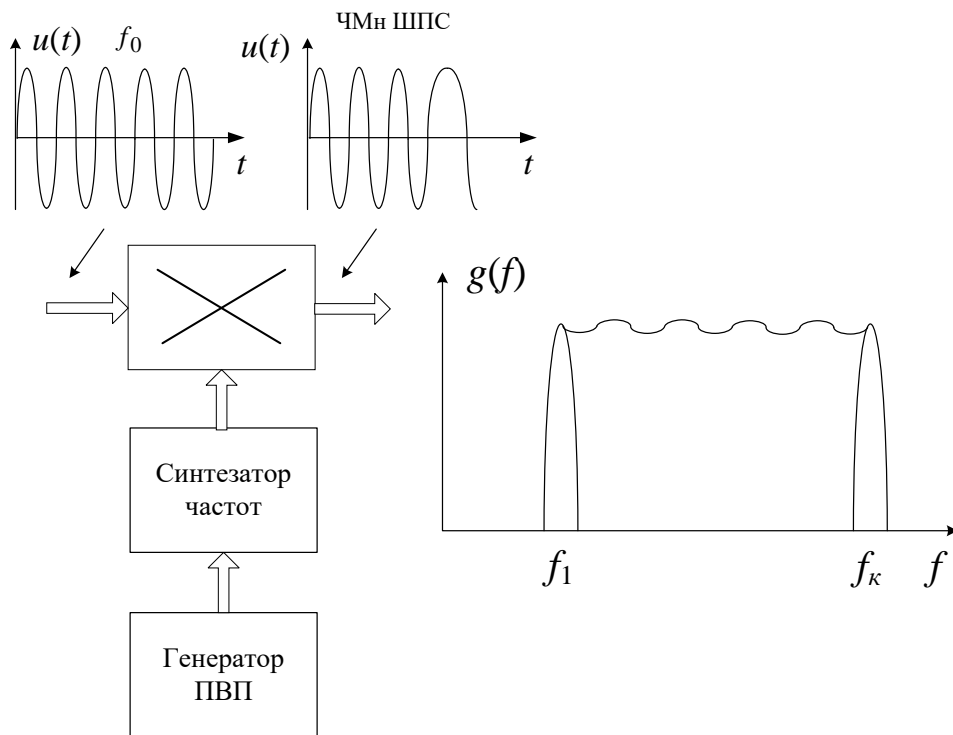


Рис. 2.35. Розширення спектра за рахунок стрибкоподібної зміни частоти несучої

Потім величина Z порівнюється з пороговим значенням. Значення кореляційного інтеграла знаходиться за допомогою корелятора, схема якого зображена на рис. 2.36, або узгодженого фільтра.

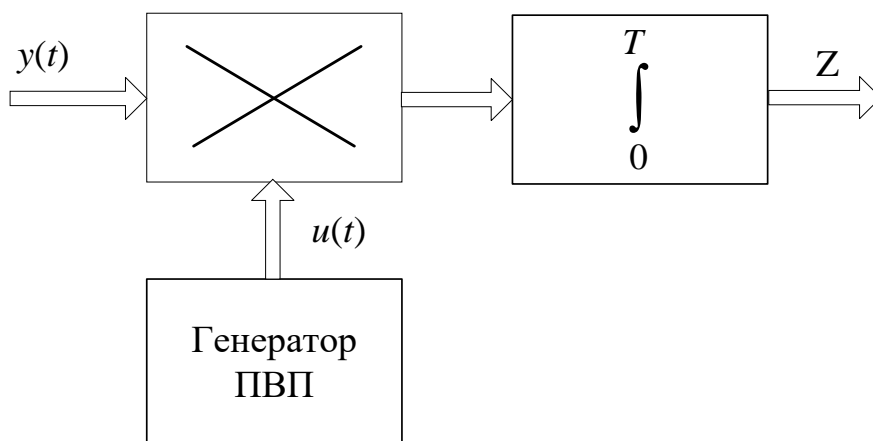


Рис. 2.36. Схема корелятора

Корелятор здійснює “стиснення” спектра широкосмугового вхідного сигналу $u(t)$ шляхом його множення на еталонну копію $u(t)$ з подальшою фільтрацією, що і призводить до поліпшення відношення сигнал/шум на виході корелятора у B раз в порівнянні з відношенням сигнал/шум на вході.

При виникненні затримки між сигналами, що приймаються, і опорним амплітуда вихідного сигналу корелятора зменшується і наближається до нуля, коли затримка стає рівною тривалості елемента ПВП τ_0 .

Зміна амплітуди вихідного сигналу корелятора при зміні затримки між сигналами, що приймаються, і опорним визначається видом автокореляційної функції – АКФ (при співпадаючих вхідної і опорної ПВП) і взаємкореляційної функції – ВКФ (при відмінних вхідної і опорної ПВП). На рис. 2.37 для прикладу наведені структура ПВП з $n = 15$ і вид її АКФ.

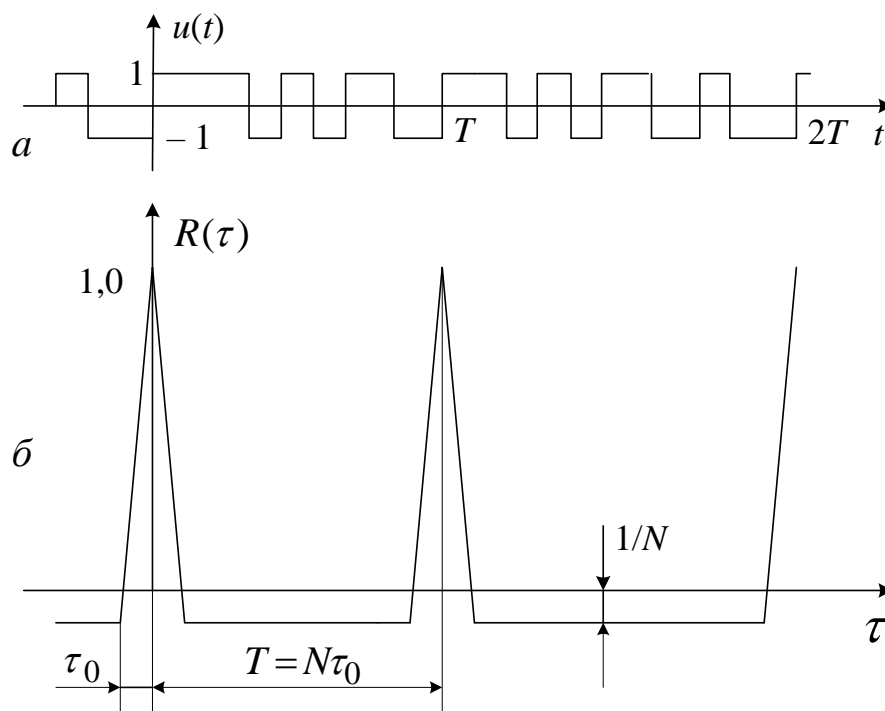


Рис. 2.37. Псевдовипадкова послідовність (ПВП):
а) структура; б) АКФ

Таким чином, вибираючи певний ансамбль сигналів з “хорошими” взаємними і автокореляційними властивостями

(малими значеннями викидів АКФ при ненульовому часовому зсуві опорного сигналу щодо того, котрий приймається, і малими значеннями ВКФ при будь-якому часовому зсуві сигналів), можна забезпечити в процесі кореляційної обробки ШСС розділення сигналів.

В існуючих і перспективних системах стільникового зв'язку переважно використовуються ШСС, формування яких здійснюється за методом прямого розширення спектра (CDMA – Code Division Multiple Access). Зовсім недавно з'явилися системи оптичного множинного доступу з кодовим розділенням O-CDMA (Optical Code Division Multiple Access), що застосовуються в мережах доступу.

Далі стисло розглянемо особливості систем оптичного множинного доступу з кодовим розділенням каналів.

2.5.2. Системи оптичного множинного доступу з кодовим розділенням каналів

Робота систем оптичного множинного доступу з кодовим розділенням (O-CDMA) заснована на розширенні спектра за рахунок стрибкоподібної зміни частоти несучою (рис. 2.35). Несуча частота в передавачі постійно змінює своє значення в деяких заданих межах за псевдовипадковим законом, індивідуальним для кожного каналу. Приймач системи поводитьсь аналогічно, змінюючи частоту гетеродина за точно таким же алгоритмом, забезпечуючи виділення і подальшу обробку тільки потрібного каналу.

У системах O-CDMA кожен біт інформації розбивається на n часових інтервалів. Передача сигналу проводиться короткими оптичними імпульсами, модульованими характерною послідовністю або кодовим словом протягом вказаних інтервалів, як показано на рис. 2.38.

Кожен користувач O-CDMA має унікальну послідовність, характерну тільки для нього. Кодер кожного передавача являє символ 1 у вигляді унікальної послідовності, проте символ 0 не кодується і представляється у вигляді послідовності нулів. Оскільки кожен символ представляється послідовністю з n часових інтервалів, ширина спектра потоку даних розширяється. Отже, O-CDMA є широкопasmовою технологією.

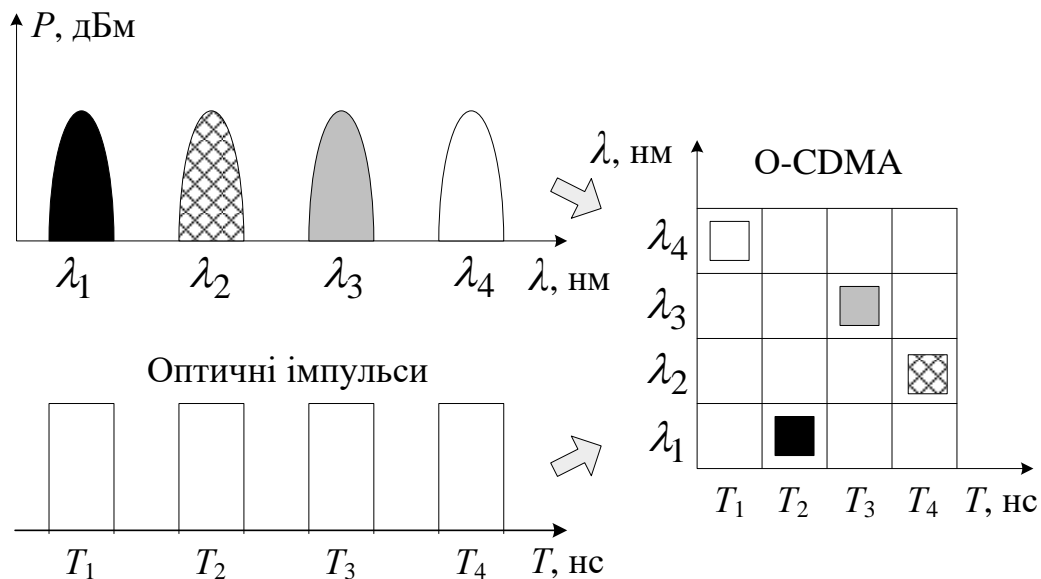


Рис. 2.38. Подання символу 1 в системі O-CDMA

Унаслідок того що використовуються унікальні послідовності, кількість користувачів (абонентів) мережі може бути набагато більша за кількість використовуваних довжин хвиль при застосуванні технології WDM (DWDM). Зазначимо, що системи оптичного множинного доступу з кодовим розділенням є перспективними системами і знаходяться у стадії розроблення.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення періодичних і неперіодичних сигналів.
2. Дайте визначення значущого моменту, одиничного тактового інтервалу, ізохронного сигналу, фазового тремтіння.
3. Які принципи закладені в основу класифікації методів мультиплексування?
4. Для чого призначені сигнали синхронізації?
5. Поясніть процедуру узгодження швидкостей цифрових потоків.
6. Поясніть особливості побудови систем передачі з частотним розділенням каналів.
7. Поясніть особливості побудови систем передачі з часовим розділенням каналів.
8. Поясніть особливості побудови систем передачі з кодовим розділенням каналів.

3. ЦИФРОВА КОМУТАЦІЯ

3.1. Призначення та функції цифрової комутації

Цифрова комутація – це процес, при якому з'єднання між входом і виходом системи встановлюється за допомогою операцій над цифровим сигналом без перетворення його на аналогову форму.

Очевидно, основною функцією будь-якої комутаційної системи є встановлення і роз'єднання з'єднань між каналами передачі відповідно до вимог, що поступають. Структура і функціонування комутаційної системи можуть змінюватися в широких межах, проте істотно залежать від конкретного застосування.

Можна виділити три основні категорії з'єднань, встановлювані при комутації мовних каналів: місцеві з'єднання ліній з лінією, транзитні (крізні) з'єднання і розподіл викликів.

Найзагальніша функція комутації зводиться до встановлення місцевих з'єднань між абонентськими шлейфами на кінцевій станції або між станційними шлейфами на установчій телефонній станції (УТС). Для здійснення цих з'єднань у першу чергу вимагається встановити сполучний шлях через комутаційну систему від лінії абонента, що викликає, до визначеної лінії абонента, що викликається. Кожна лінія повинна бути доступною будь-якій іншій. Цей рівень комутації іноді називають комутацією ліній.

Транзитні з'єднання вимагають встановлення сполучного шляху від визначеної вхідної (що викликає) лінії до вихідної лінії або групи вихідних (сполучних) ліній. Звичайно, бувають доступними більше однієї вихідної лінії. Наприклад, при встановленні з'єднання з групою міжстанційних сполучних ліній може використовуватися будь-хто в цій групі. Отже, структура системи при транзитній комутації може бути спрощена, оскільки існують альтернативи при виборі вихідної лінії. Крім того, навіть немає необхідності у тому, щоб будь-яка вихідна лінія була доступна будь-якій вхідній лінії.

Функції транзитної комутації мають бути реалізовані на всіх комутаційних системах телефонної мережі. Деякі системи, такі як

видалені концентратори і міжміські або транзитні комутаційні станції, обслуговують тільки транзитне навантаження (зокрема, не встановлюють місцевих з'єднань). Введені вище поняття пояснює рис. 3.1.

Розподільники викликів часто реалізуються на тому ж самому базовому обладнанні, що і УТС. Проте спосіб функціонування (програмне забезпечення) істотно відрізняється тим, що за відсутності прямих шляхів вхідні виклики можуть прямувати обхідним шляхом до будь-якого вільного оператора.

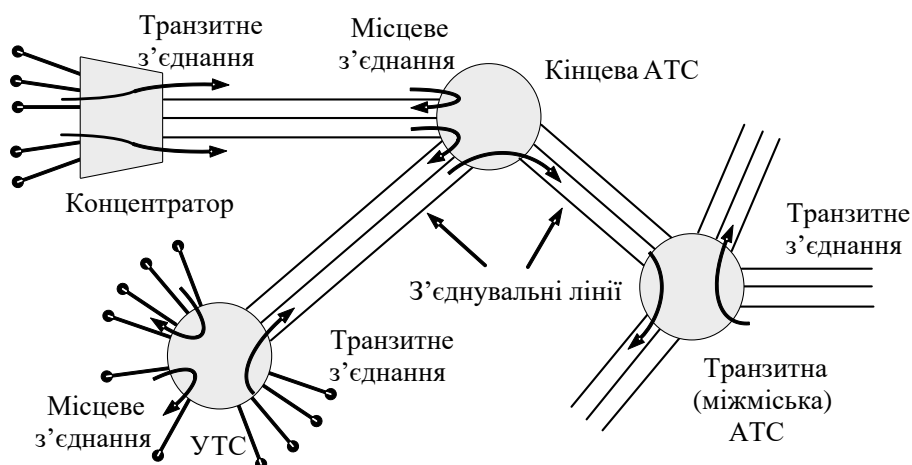


Рис. 3.1. Комутація для випадку місцевого та транзитного навантаження

Звичайно програмне забезпечення автоматичного розподільника викликів будується так, щоб деяким випадковим чином розподіляти поступаючі виклики серед операторів. Хоча це і не є обов'язковою вимогою того, щоб кожна вхідна лінія (або тракт) могла бути сполучена з будь-яким оператором, проте розподільники викликів, звичайно, проектуються так, щоб забезпечити повний доступ до будь-якого оператора.

3.2. Просторова комутація

Схематично просту комутаційну структуру можна уявити у вигляді прямокутних ґрат, складених з точок комутації так, як показано на рис. 3.2. Ця комутаційна схема може бути використана для з'єднання будь-якого з N входів з будь-яким з M

виходів. Якщо до входів і виходів приєднані дводровові ланцюги, то на кожне з'єднання потрібна тільки одна точка комутації (комутаційний елемент).

Прямокутні ґратчасті структури, складені з точок комутації, проектується так, щоб забезпечувати тільки міжгрупові (транзитні) з'єднання, тобто з'єднання одного виду: від групи входів до групи виходів. Такий спосіб роботи може знайти застосування у ряді випадків, зокрема:

- на видалених концентраторах;
- розподільниках викликів;
- кінцевих станціях або УТС при встановленні транзитних з'єднань;
- окремих ланках багатоланкових комутаційних схем.

У більшості перерахованих випадків вимога забезпечення можливості встановлення з'єднання будь-якого входу з будь-яким виходом не є обов'язковою. Так, у разі, коли кількість виходів у групі достатньо велика, можна забезпечити кожному входу доступ не до всіх, а лише до обмеженої кількості виходів. У таких випадках говорять про “обмежену доступність”. Перехід до схем з обмеженою доступністю дозволяє одержати значну економію точок комутації.

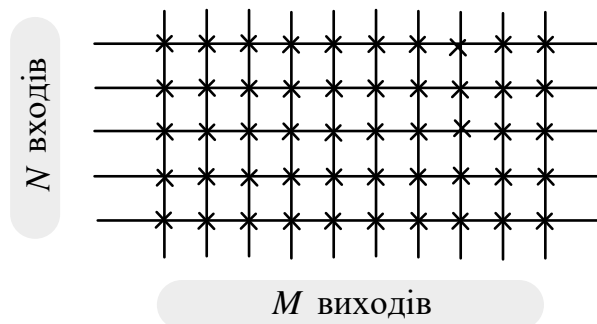


Рис. 3.2. Прямокутна повнодоступна комутаційна схема

Для побудови схем підключення групи виходів, доступних різним групам входів, розроблений метод, що одержав назву “неповнодоступного ввімкнення”. Приклад схеми неповнодоступного ввімкнення наведений на рис. 3.3. Зазначимо, якщо з'єднання входів з виходом здійснюється продумано, то негативний ефект обмеженої доступності мінімізується.

Наприклад, якщо необхідно з'єднати входи 1 і 8 на схемі рис. 3.3 з групою виходів, належить вибрати виходи 1 і 3, а не 1 і 4 з тим, щоб уникнути блокування входу 2, оскільки він може бути з'єднаний тільки з виходами 1 і 4.

Комутаційні схеми з неповнодоступним ввімкненням виходів часто використовуються для організації доступу до великих пучків сполучних ліній на електромеханічних станціях, де вартість точки комутації досить висока і розміри окремих комутаційних модулів обмежені. Неповнодоступне ввімкнення використовується також на окремих ланках комутації багатоланкових комутаційних схем великої місткості, де існує більше одного шляху до будь-якого заданого виходу.

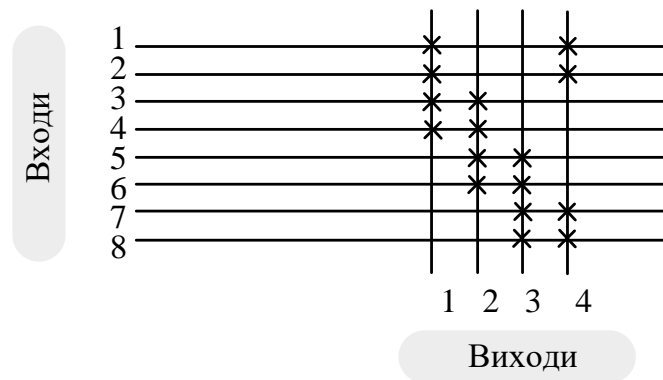


Рис. 3.3. Прямокутна неповнодоступна комутаційна схема

На рис. 3.4 наведені дві комутаційні структури, котрі можна використовувати для встановлення всіх можливих взаємних з'єднань дводротових ліній. Пунктирні лінії указують на те, що відповідні входи і виходи комутаційної схеми, призначеної для комутації дводротових ліній, дійсно сполучені один з одним так, щоб забезпечувався двосторонній зв'язок по дводротових ланцюгах. Проте при описі роботи комутаційних схем зручно розглядати входи і виходи дводротових комутаційних схем як окремі полюси.

Обидві структури на рис. 3.4 дозволяють встановити будь-яке з'єднання шляхом вибору однієї точки комутації.

Проте квадратна комутаційна схема, що називається також двосторонньою, дозволяє будь-яке з'єднання встановлювати двома шляхами.

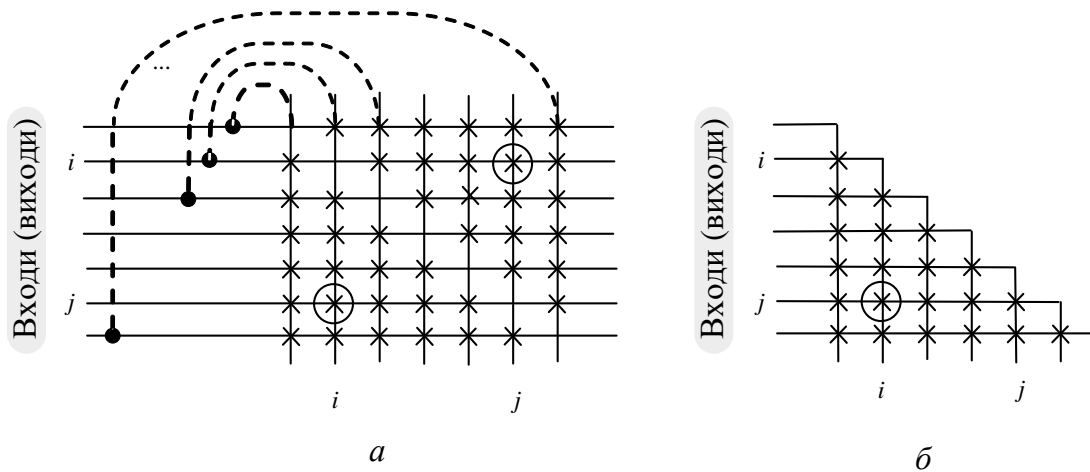


Рис. 3.4. Дводотові комутаційні схеми:
 а) квадратна; б) трикутна (петлева)

Наприклад, якщо вимагається з'єднати вхідну лінію i з вхідною лінією j , то відповідна точка комутації може бути вибрана або на перетині входу i з виходом j або на перетині входу j з виходом i . Для простоти точки комутації позначатимемо відповідно як (i, j) та (j, i) . Звичайно вмикається точка комутації (i, j) , якщо вимагає обслуговування вхід i , або точка (j, i) , якщо вимагає обслуговування вхід j .

У трикутній комутаційній схемі на рис. 3.4 виключені всі надмірні точки комутації. Проте зменшення числа точок комутації не обходиться без ускладнень. До того як встановити з'єднання між входом i комутаційного пристрою і входом j , елемент керування комутаційного пристрою повинен визначити, що більше за величиною – i або j . Якщо виявиться, що більше i , то вибирається точка комутації (i, j) . Якщо i менше, то має бути вибрана точка комутації (j, i) . Але при використуванні сучасної обчислювальної техніки для керування процесом комутації порівняння номерів ліній не являє суттєвих труднощів.

Комутаційні системи для чотиридротових ланцюгів вимагають встановлення роздільних з'єднань – для прямої і зворотної гілки ланцюга передачі. Таким чином, при обслуговуванні кожної вимоги необхідно встановити два різні з'єднання. На рис. 3.5 наведена структура квадратної комутаційної схеми, використуваної для встановлення обох з'єднань. Ця структура ідентична структурі квадратної матриці,

що зображена на рис. 3.4, *a*, для випадку комутації дводротових ланцюгів.

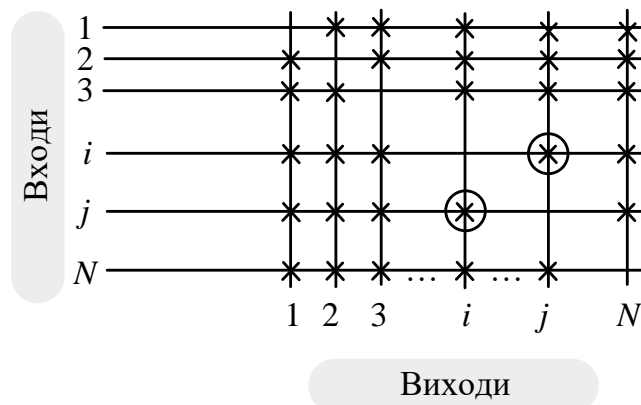


Рис. 3.5. Чотиридротова комутаційна схема

Відмінність полягає у тому, що відповідні входи і виходи не сполучені з загальним дводротовим входом. Будь-який вхід чотиридротової комутаційної схеми з'єднується з парою дротів, що створюють вхідний напрям передачі, а будь-який вихід з'єднується з парою дротів, котрі створюють вихідний напрям передачі. При встановленні з'єднання між чотиридротовими ланцюгами i і j в комутаційній схемі на рис. 3.5 повинні вмикатися обидві точки комутації: $i (i, j)$, $i (j, i)$. При реальній роботі системи ці дві точки комутації можуть вмикатися погоджено, тому їх можна виконати у вигляді деякого єдиного модуля.

3.3. Багатоланкові комутаційні схеми

У структурах комутаційних схем, описаних вище, з'єднання входу з виходом здійснювалося безпосередньо через одну точку комутації (у комутаційних схемах з чотиридротовою комутацією при кожному чотиридротовому з'єднанні займаються дві точки комутації, проте фактично для кожного з'єднання входу з виходом займається тільки одна точка). З цієї причини такі комутаційні структури одержали назву одноланкових.

Одноланкові комутаційні схеми характеризуються тим, що кожна окрема точка комутації може бути використана для

з'єднання певної пари вхід – вихід. Оскільки кількість пар вхід – вихід дорівнює $N(N-1)/2$ для трикутної комутаційної схеми або $N(N-1)$ – для прямокутної, то кількість точок комутації для комутаційних схем великої ємності стає неприпустимо великою. Крім того, велика кількість точок комутації, що доводиться на кожен ліній, підключену до входу або виходу схеми, створює додатково велике ємнісне навантаження на тракти передачі інформації. Інший серйозний недолік одноланкових комутаційних схем полягає у тому, що для кожного певного з'єднання потрібне ввімкнення цілком певної точки комутації. Якщо така точка комутації виходить з ладу, то виявляється, що відповідне з'єднання встановити не можна. Виняток становить квадратна дводротова комутаційна схема, що має надмірність і “зайві” точки комутації для кожного потенційного з'єднання. Проте, перш ніж зайві точки комутації можна буде використовувати як обхідні шляхи, необхідно буде модифікувати алгоритм вибору точки комутації.

Аналіз одноланкових комутаційних схем великої ємності показує, що точки комутації в таких схемах використовуються вельми неефективно. У кожному ряду і в кожному стовпці квадратної комутаційної схеми може працювати одночасно тільки одна точка комутації навіть за умови, що по всіх лініях поступили вимоги на встановлення з'єднання. Щоб підвищити ефективність використання точок комутації і тим самим зменшити їх кількість, необхідно зробити так, щоб будь-яку точку комутації можна було використовувати при встановленні декількох потенційних з'єднань. Проте при цьому для виключення можливості виникнення блокувань необхідно забезпечити для будь-якого потенційного з'єднання декілька сполучних шляхів.

Обхідні сполучні шляхи служать для виключення або зменшення блокування, а також для захисту від можливих пошкоджень. Багатоланкові комутаційні схеми дозволяють використовувати сукупність точок комутації для утворення декількох сполучних шляхів через комутаційну схему.

Комутаційна схема на рис. 3.6 є триланковою: входи і виходи в ній розділені на підгрупи з n входів і n виходів кожна. Входи кожної підгрупи обслуговуються окремою прямокутною комутаційною схемою – комутатором.

Вхідні комутатори (перша ланка) – це комутатори $n \times k$, де кожний з k виходів з'єднується з входом одного з k комутаторів другої (центральної) ланки. Міжланкові сполучні лінії часто називають проміжними (зв'язувальними) сполучними лініями.

Третя ланка складається з комутаторів $k \times n$, що забезпечують з'єднання кожного комутатора центральної ланки з групою n виходів.

Всі комутатори центральної ланки мають параметри $(N/n) \times (N/n)$, що дозволяє забезпечити з'єднання будь-якого комутатора першої ланки з будь-яким комутатором третьої ланки.

Зазначимо, що якщо всі комутатори є повнодоступними комутаційними схемами, то будь-яке конкретне з'єднання входу з виходом схеми може бути встановлене k різними шляхами. Кожний з k шляхів проходить через окремий комутатор центральної ланки. Саме завдяки цьому багатоланкова структура дозволяє забезпечити обхідні шляхи через комутаційну схему в тих випадках, коли треба обійти виникаючі пошкодження. Крім того, оскільки тепер кожна вхідна і вихідна лінія зв'язку підключається до обмеженої кількості точок комутації, то мінімізується і ємнісне навантаження.

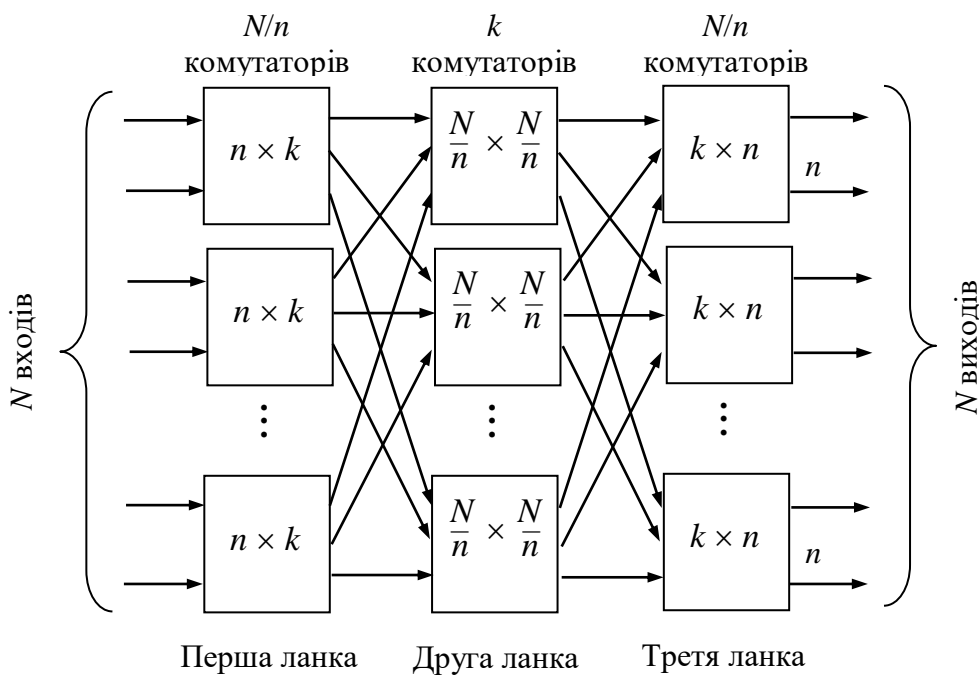


Рис. 3.6. Триланкова комутаційна схема

Загальна кількість точок комутації N_x , яка вимагається для побудови триланкової комутаційної схеми, що зображена на рис. 3.6, складає

$$N_x = 2Nk + k(N/n)^2, \quad (3.1)$$

де N – кількість входів (виходів);

n – розмір кожної групи входів (виходів);

k – кількість комутаторів центральної ланки.

Як вже було стисло зазначено, кількість точок комутації, визначена у формулі (3.1), може бути значно менша за кількість точок комутації, що вимагається для побудови одноланкових комутаційних схем. Проте спочатку слід визначити, скільки комутаторів центральної ланки повинна містити схема, щоб забезпечити прийнятну якість обслуговування.

Одна з привабливих властивостей одноланкової комутаційної схеми полягає у тому, що вона є тією, котра повністю не блокується. Якщо абонент, що викликається, вільний, то з'єднання з ним завжди може бути встановлене шляхом вибору певних точок комутації, призначених для з'єднання певної пари вхід – вихід. Проте, якщо допускається сумісне використання точок комутації, то виникає можливість блокування. У 1953 р. Ч. Клоз, працюючий у фірмі Bell Laboratories, опублікував результати аналізу триланкових комутаційних схем, у яких він показав, скільки комутаторів центральної ланки повинна містити схема, щоб вона була тією, що повністю не блокується [4]. Його результати показали, що якщо кожен окремий комутатор є схемою, котра не блокується, і при цьому кількість комутаторів центральної ланки k дорівнює $2n - 1$, то комутаційна схема буде тією, котра повністю не блокується.

Умову роботи схеми без блокувань можна одержати, виходячи перш за все з того, що з'єднання через триланкову комутаційну схему вимагає наявності комутатора центральної ланки, який мав би вільну лінію, яка пов'язує його з відповідним комутатором першої ланки, і вільну лінію, котра пов'язує його з відповідним комутатором третьої ланки. Оскільки окремі

комутатори самі по собі є тими, що не блокуються, то необхідний сполучний шлях може бути встановлений у всіх випадках, коли буде знайдений комутатор центральної ланки з відповідними вільними лініями.

Відправним моментом при доведенні цього положення є така обставина: оскільки кожен комутатор першої ланки має n входів, то лише $n - 1$ з них можуть бути зайняті, якщо є вільний вхід, по якому поступає вимога на встановлення з'єднання. Якщо k більше, ніж $n - 1$, то можуть бути зайняті максимум $n - 1$ ліній, що ведуть до комутаторів центральної ланки.

Аналогічно максимум $n - 1$ ліній з ліній, що ведуть до комутатора третьої ланки, може бути зайнята, якщо вихід, з яким вимагається встановити з'єднання, вільний.

Найважчий випадок, з погляду виникнення блокування (рис. 3.7), відповідає ситуації, при якій зайняті всі $n - 1$ лінії, що ведуть від комутатора першої ланки до деякої групи комутаторів центральної ланки, а також всі $n - 1$ лінії, що ведуть від деякої іншої групи комутаторів центральної ланки до необхідного комутатора третьої ланки.

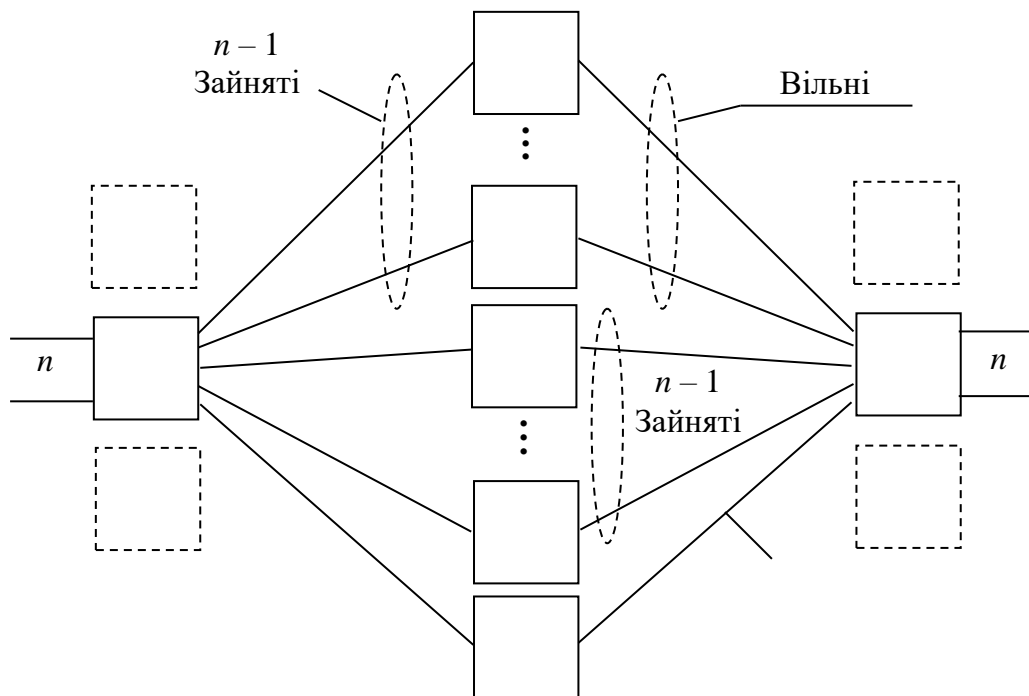


Рис. 3.7. Триланкова комутаційна схема без блокувань

Таким чином, обидві вказані групи комутаторів центральної ланки виявляються недоступними для встановлення необхідного з'єднання. Проте, якщо існував би ще хоча б один комутатор центральної ланки, то відповідні вхідна і вихідна лінії були б обов'язково вільними і, отже, цей комутатор центральної ланки міг би бути використаний для встановлення даного з'єднання. Таким чином, якщо $k = (n-1) + (n-1) + 1 = 2(n-1)$, то комутаційна схема є тією, що повністю не блокується. Підставляючи це значення k у вираз (3.1), одержуємо, що загальна кількість точок комутації в триланковій комутаційній схемі, що повністю не блокується,

$$N_x = 2N(n-1) + (2n-1)(N/n)^2. \quad (3.2)$$

Як показує вираз (3.2), кількість точок комутації в триланковій комутаційній схемі, що не блокується, залежить від того, як входи і виходи розбиваються на підгрупи, причому кількість елементів кожної підгрупи дорівнює n .

Диференціюючи вираз (3.2) за n і для визначення мінімуму прирівнюючи одержаний вираз до нуля, встановлюємо, що при великих значеннях N оптимальне значення n має дорівнювати $(N/n)^{1/2}$. Підставляючи це значення n у вираз (3.2), одержуємо вираз для мінімальної кількості точок комутації триланкової схеми, що не блокується:

$$N_x(\min) = 4N(\sqrt{2N} - 1), \quad (3.3)$$

де N – загальна кількість входів (виходів).

Триланкова комутаційна схема забезпечує значне зменшення кількості точок комутації, особливо при великій ємності комутаційної схеми. Проте навіть для триланкових комутаційних схем великої ємності кількість точок комутації неприпустимо велика. Щоб одержати ще більше зменшення кількості точок комутації, комутаційні схеми великої ємності звичайно будують багатоланковими. Але найбільш істотне

зменшення кількості точок комутації може бути досягнуте не стільки за рахунок введення додаткових ланок у комутаційну схему, скільки за рахунок роботи комутаційної схеми з прийнятно малим значенням імовірності блокування.

3.4. Цифрова комутація каналів з часовим розділенням

Конфігурація комутаційної схеми з просторовим розділенням каналів періодично відтворюється протягом кожного часового інтервалу шляхом безперервної зміни деяким циклічним чином з'єднань, існуючих протягом коротких інтервалів часу. Такий спосіб роботи схеми називають комутацією з часовим розділенням каналів.

Цифрові сигнали, сформовані шляхом об'єднання на основі часового розділення, звичайно вимагають як комутації часових інтервалів, так і комутації фізичних ліній. Цей останній вид комутації є, по суті, другим вимірюванням комутації і звичайно називається часовою комутацією. При описанні цифрової комутації з часовим розділенням припускають, що комутаційна система безпосередньо сполучається з цифровими лініями передачі з часовим розділенням, оскільки навіть при роботі в аналоговому оточенні в найбільш економічній комутаційній системі спочатку здійснюється формування цифрових сигналів та їх компоновка відповідно до формату слова часового розділення каналів, а вже потім здійснюються будь-які операції комутації.

Основну вимогу до системи комутації з часовим розділенням ілюструє приклад на рис. 3.6. На ньому зображено з'єднання каналу 3 першого тракту з часовим розділенням каналів з каналом 17 останнього тракту з часовим розділенням каналів. При цьому з'єднанні інформація, що поступає в часовому інтервалі 3 першого тракту, пересилається в часовому інтервалі 17 останнього тракту. Оскільки процес перетворення мовного сигналу на цифрову форму принципово означає чотиридротовий режим роботи, то потрібне і реалізується зворотним з'єднанням шляхом пересилання інформації з часового інтервалу 17 останнього вхідного тракту в часовий інтервал 3 першого вихідного тракту. Таким чином, кожне з'єднання вимагає виконання двох пересилань інформації; кожна включає перетворення і в часі, і в просторі.

Існує безліч структур комутаційних схем, що дозволяють виконувати операції, вказані на рис. 3.8. Всі структури, по суті, мають дві ланки: ланки просторової комутації і ланки часової комутації.



Рис. 3.8. Просторова і часова комутація

Комутаційні схеми великої ємності, звичайно, містять декілька ланок обох типів. Проте, перш ніж почати обговорення двомірної (двокоординатної) комутації, розглянемо характеристики і можливості однієї лише часової комутації.

Цифрова комутаційна схема на запам'ятовуючих пристроях. Оскільки схеми часової комутації будуються на базі недорогих цифрових запам'ятовуючих пристроїв (ЗП), реалізація функції цифрової комутації виявляється більш дешевою, ніж реалізація схем з просторовим розділенням. Робота схеми часової комутації зводиться, головним чином, до записування інформації і зчитування її із ЗП. У процесі комутації інформація, що поступає по одному часовому каналу, передається до іншого, як показано на рис. 3.9.

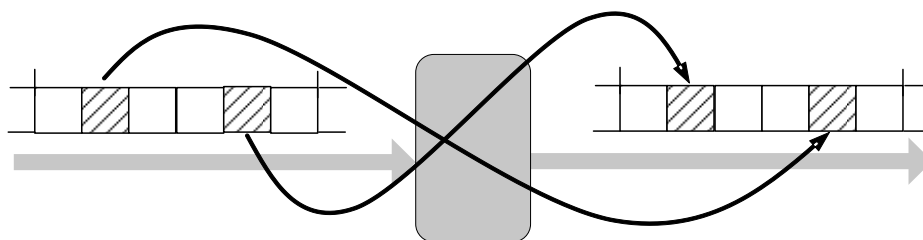


Рис. 3.9. Ефект перестановки часових каналів

Якщо цифрові сигнали групуються в єдині формати слів часового розділення каналів, то вдається одержати дуже економічні комутаційні схеми, що реалізують тільки часову комутацію. Проте реальні обмеження на часові характеристики ЗП визначають допустимі розміри блока часової комутації. Тому в комутаційних схемах великої ємності обов'язково вводиться просторова комутація. Як буде показано далі, найбільш економічно побудовані багатоланкові схеми, звичайно, містять якомога більшу кількість ланок часової комутації.

Принцип роботи схеми комутації на ЗП пояснює рис. 3.10. Як видно з рисунка, окремі ланцюги, по яких йде передача цифрових повідомлень, деяким фіксованим чином об'єднуються так, що утворюється один тракт з часовим розділенням каналів.

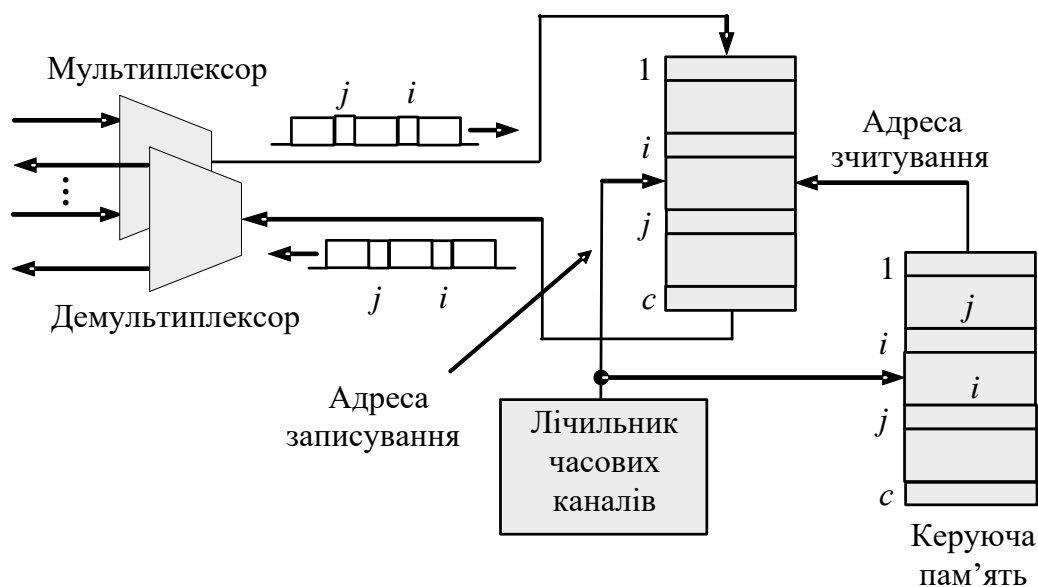


Рис. 3.10. Схема перестановки часових каналів

Функції об'єднання і розділення можна розглядати або як функції самої схеми комутації, або як функції, що реалізовані у видалених терміналах. Якщо функції об'єднання і розділення реалізуються локально, то мультиплексор і демультіплексор можуть паралельно підключатися безпосередньо до ЗП. Інакше використовується перетворювач послідовного коду на паралельний, який дозволяє заздалегідь накопичити інформацію певного часового каналу до того, як вона буде записана в ЗП. У будь-якому випадку для кожного вхідного часового каналу

необхідно забезпечити доступ до каналу записування в ЗП i , так само, до каналу зчитування для кожного вихідного часового каналу.

Обмін інформацією між двома різними часовими каналами здійснюється за допомогою ЗП часової комутації каналів. У схемі часової комутації каналів, що зображена на рис. 3.10, інформація, котра поступає по вхідних часових каналах, послідовно записується в чарунки ЗП. У той же час інформація, що поступає у вихідні канали, зчитується з ЗП часової комутації каналів за адресами, одержуваними з блока керуючої пам'яті.

З'єднання каналів i і j трактів з часовим розділенням каналів означає, що адреса i поступає в ЗП часової комутації каналів протягом j -го часового інтервалу, і навпаки, як зазначається у відповідній керуючій пам'яті. Таким чином, протягом кожного часового інтервалу до ЗП часової комутації каналів відбуваються два звернення. Перше, коли деякий керуючий пристрій (на рисунку не показано) вибирає номер часового каналу, що визначає адресу записування в ЗП. Друге, коли вміст керуючої пам'яті, що відповідає певному часовому каналу, вибирається як адреса зчитування.

Оскільки операції записування і зчитування повинні виконуватися в ЗП часової комутації каналів для кожного часового каналу (що входить або виходить), максимальна кількість каналів c , котрі можуть бути обслужені простою комутаційною схемою на ЗП, дорівнює

$$c = \frac{125}{2t},$$

де цифра 125 означає тривалість циклу в мікросекундах для частоти дискретизації мовного сигналу, що дорівнює 8 кГц, а t – тривалість звернення до ЗП в мікросекундах. Як конкретний приклад розглянемо застосування ЗП з тривалістю звернення 500 нс. Рівняння показує, що комутаційна схема на ЗП може обслужити 125 дуплексних каналів (62 з'єднання) за умови повної неблокованості схеми.

Складність комутаційної схеми (за припущення, що процес цифрового перетворення десь вже був здійснений) зовсім

невелика. Запам'ятовуючий пристрій часової комутації каналів зберігає один інформаційний цикл, організований як c слів по 8 бітів кожне. Керуюча пам'ять також має об'єм c слів, причому довжина кожного слова дорівнює $\log_2 c$ (тобто в нашому прикладі 7). Таким чином, обидві функції пам'яті можуть бути реалізовані на базі ЗП з довільною вибіркою ємністю 128×8 бітів.

Розглянута комутаційна схема контрастує зі схемою з просторовим розділенням каналів, котра зажадала б 7 680 точок комутації при реалізації її у вигляді триланкової комутаційної схеми, що не блокується. І хоча сучасна технологія виготовлення інтегральних мікросхем дозволила б замінити багато точок цифрової комутації декількома інтегральними схемами, обмеження, пов'язане з допустимою кількістю виводів з кристала, подолати не вдалося б.

Ланки часової комутації. Для того щоб забезпечити часову комутацію каналів, ланки часової комутації принципово вимагають наявності деякого виду елементів затримки. Затримки найлегше реалізувати за допомогою ЗП з довільною вибіркою, записування в які здійснюється по мірі надходження даних, а зчитування – за необхідності їх передавання. Якщо для кожного часового інтервалу в циклі часового розділення каналів відведений один елемент пам'яті, то інформація кожного каналу з часовим розділенням може зберігатися без спотворення повторним записом протягом часу аж до тривалості одного повного циклу.

Можна виділити два способи керування роботою ЗП ланки часової комутації: *послідовне записування і довільне зчитування* та *довільне записування і послідовне зчитування*. На рис. 3.11 показаний принцип роботи ланки часової комутації для обох способів керування з ілюстрацією способу доступу до пам'яті при передачі інформації з часового каналу 3 в часовий канал 17. Обидва способи роботи ланки часової комутації використовують циклічну керуючу пам'ять, доступ до якої здійснюється синхронно з роботою лічильника часових інтервалів.

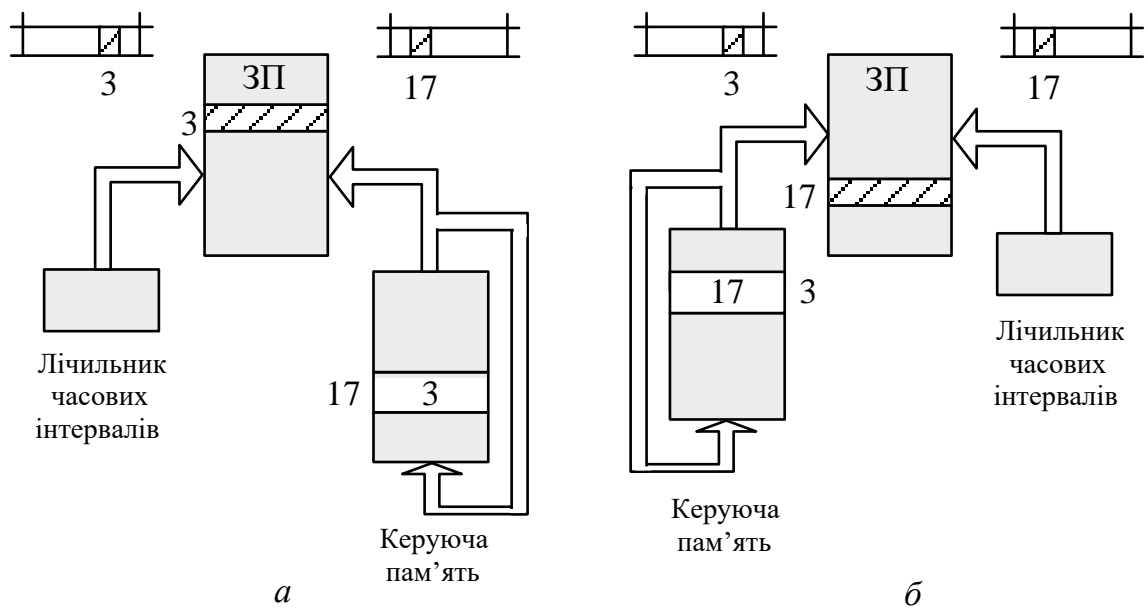


Рис. 3.11. Ланки часової комутації:
 а) послідовне записування – довільна вибірка;
 б) довільне записування – послідовна вибірка

Згідно з першим способом роботи ланки часової комутації, показаним на рис. 3.9, а, певні елементи пам'яті закріплюються за відповідними каналами вхідного тракту з часовим розділенням каналів. Інформація кожного вхідного часового інтервалу запам'ятовується в послідовних елементах пам'яті, що забезпечується збільшенням на 1 вмісту лічильника за модулем c на кожному часовому інтервалі. Як вже зазначалося, інформація, прийнята протягом часового інтервалу 3, автоматично запам'ятовується в третій чарунці ЗП. При видачі інформації із ЗП керуюча інформація, що поступає з керуючої пам'яті, визначає адресу зчитування інформації для заданого часового інтервалу. Як вже було зазначено, сімнадцяте слово керуючої пам'яті містить число 3, тобто вміст ЗП ланки часової комутації за адресою 3 повинен бути зчитаний і переданий по вихідному тракту протягом часового інтервалу 17.

Другий спосіб роботи ланки часової комутації, показаний на рис. 3.9, б, є протилежністю першого. Інформація, що надходить на вхід, записується в чарунки ЗП відповідно до адреси, котра зберігається в керуючій пам'яті. А зчитування інформації здійснюється послідовно – чарунка за чарункою під керуванням

лічильника часових інтервалів (вихідних). Як показано в даному прикладі, інформація, прийнята протягом часового інтервалу 3, записується безпосередньо в ЗП за адресою 17, звідки автоматично зчитується у вихідний канал з номером 17 тракту з часовим розділенням каналів. Зазначимо, що обидва способи роботи ланки часової комутації, зображені на рис. 3.9, визначають відповідно керування на виході і на вході.

3.5. Двокоординатна комутація

Цифрові комутаційні схеми великої ємності потребують реалізації процесу комутації як в просторі, так і в часі. Існує значна безліч конфігурацій схем, які можна використовувати, щоб задовольнити ці вимоги. Тому спочатку розглянемо просту структуру комутаційної схеми, зображену на рис. 3.12. Вона містить тільки дві ланки: ланку часової комутації і наступну за нею ланку просторової комутації. Тому цю структуру часто називають комутаційною схемою типу час – простір (ЧП).

Основна функція ланки часової комутації – забезпечити затримку інформації, що поступає протягом часових інтервалів, відповідних вхідним каналам, до моменту настання часового інтервалу, відповідного бажаному вихідному каналу. У цей момент затримана інформація проходить через ланку просторової комутації на відповідний тракт. У даному прикладі показано, що інформація, котра поступає протягом часового інтервалу 3 по тракту 1, затримується до тих пір, поки не наступить часовий інтервал 17. На зворотному шляху інформація, яка поступає протягом часового інтервалу 17 по тракту N , затримується до тих пір, поки не наступає часовий інтервал 3 наступного циклу. Зазначимо, що ланка часової комутації може забезпечувати затримку інформації, котра лежить у діапазоні від одного часового інтервалу до повного циклу.

Ланкою просторової комутації керує відповідна керуюча пам'ять, що містить інформацію, необхідну для визначення тієї конфігурації ланки часової комутації, яка повинна бути створена протягом кожного часового інтервалу циклу. Необхідна керуюча інформація зчитується циклічно. Наприклад, протягом кожного вхідного часового інтервалу 3 зчитується керуюча інформація,

котра визначає, що проміжна сполучна лінія 1 повинна бути сполучена з вихідною сполучною лінією N . Протягом інших часових інтервалів ланка просторової комутації повністю змінює свою конфігурацію, пристосовуючись до обслуговування інших з'єднань.

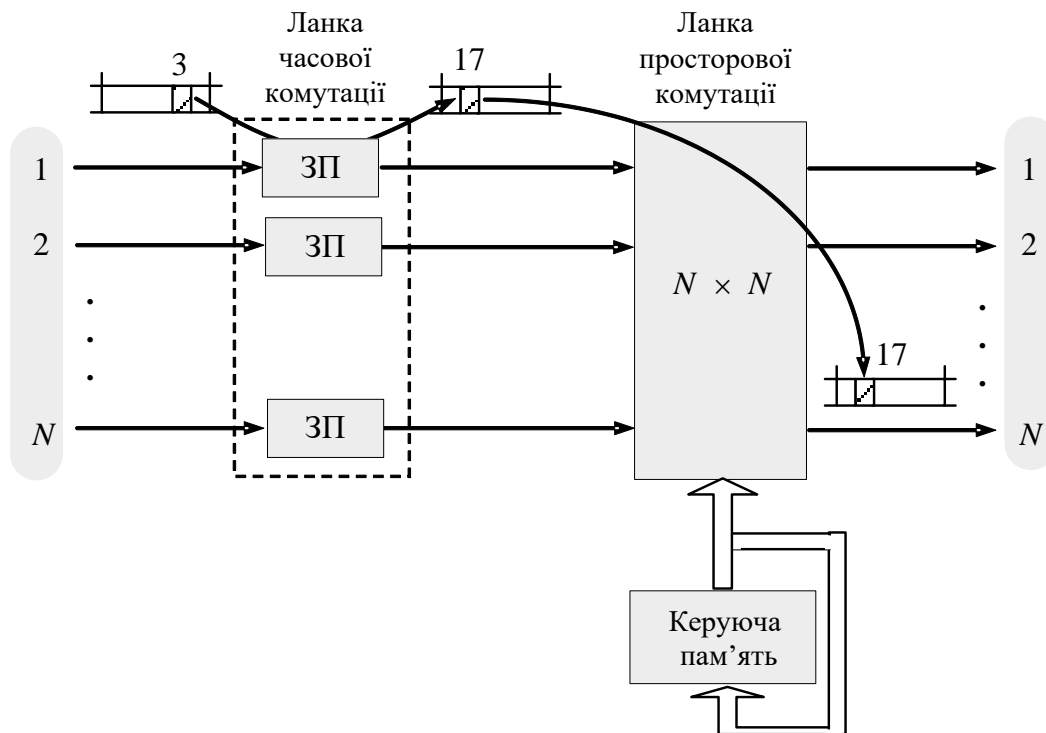


Рис. 3.12. Схема комутації типу час – простір

Як вже зазначалося, зручно уявити керуючу пам'ять у вигляді паралельного кільцевого регістра зсуву. Ширина регістра зсуву дорівнює кількості бітів, необхідних для визначення всієї конфігурації схеми просторової комутації протягом одного часового інтервалу. Довжина регістра зсуву визначається кількістю часових інтервалів у циклі. Звичайно, необхідно мати певні засоби для зміни інформації в керуючій пам'яті, щоб можна було встановлювати нові з'єднання. На практиці керуюча пам'ять може бути побудована на ЗП з довільною вибіркою з керуванням від лічильників, котрі циклічно генерують адресу зчитування.

3.6. Складність реалізації комутаційних схем з часовим розділенням

Різні варіанти комутаційних схем з просторовим розділенням можна порівняти між собою за загальною кількістю точок комутації. Можна вказати й інші чинники, що слід враховувати при проведенні повнішого аналізу, а саме: модульність, вимоги, пов'язані з пошуком шляхів, вплив пошкоджень, умови обслуговування, вимоги до монтажу, електричне навантаження та інші. Не дивлячись на необхідність обліку всіх цих міркувань, оцінка за кількістю точок комутації корисна і є єдиною мірою вартості комутаційної схеми з просторовим розділенням, особливо при використуванні в якості точки комутації електромеханічних приладів.

У разі напівпровідникових електронних комутаційних приладів, взагалі, і комутаційних приладів з часовим розділенням, зокрема, кількість точок комутації сама по собі є менш значущою величиною при оцінці вартості реалізації. Комутаційні структури, в яких використовуються інтегральні мікросхеми з відносно великою кількістю внутрішніх точок комутації, звичайно, більш економічні за вартістю, ніж інші структури, що можуть мати меншу кількість точок комутації, але більшу кількість корпусів. Отже, більш прийнятним параметром при оцінці варіанта комутаційної схеми має бути загальна кількість корпусів інтегральних схем. Якщо різні варіанти реалізуються на основі однакового набору інтегральних схем, то кількість корпусів може достатньо точно відображати кількість точок комутації.

Іншим корисним параметром при оцінці вартості реалізації є загальна кількість виводів інтегральних схем, що вимагається при певному варіанті побудови схеми. Хоча цей параметр, очевидно, тісно пов'язаний із загальною кількістю корпусів, все ж таки він більш корисний, оскільки точніше характеризує вартість корпусу і вимоги до розміщення.

Оцінка за кількістю виводів може також безпосередньо служити показником надійності реалізації, оскільки взаємні з'єднання виводів за межами інтегральної схеми завжди менш надійні, ніж внутрішні. Еквівалент однієї точки комутації

(елемент I) при реалізації комутаційної схеми на інтегральних схемах середнього ступеня інтеграції звичайно складає 1,5 зовнішнього виводу для доступу до точки комутації.

Таким чином, якщо застосовуються інтегральні схеми середнього ступеня інтеграції, то загальна кількість точок комутації може служити якісним показником загальної кількості виводів. Тому продовжуватимемо використовувати кількість точок комутації як міру вартості реалізації, приймаючи при цьому, що елементи середнього ступеня інтеграції будуть використані у всіх варіантах, що зіставляються. У цьому випадку необхідно мати упевненість у тому, що всі порівнювані системи працюють приблизно з однією і тією ж швидкістю, оскільки вищі швидкості вимагають нижчого рівня інтеграції.

Окрім кількості точок комутації на ланках просторової комутації при оцінці загальної вартості необхідно враховувати значний об'єм ЗП, що використовуються на ланках часової комутації. При оцінці об'єму пам'яті необхідно враховувати як пам'ять схеми часової комутації, так і керуючу пам'ять ланок часової і просторової комутації. При проведенні подальшого аналізу будемо припускати, що 100 бітам пам'яті відповідають 1,5 виводи інтегральної схеми (ЗП з випадковою вибіркою на 1 024 біти звичайно вимагає 14 виводів). При цьому припущенні можна зв'язати вартість ЗП з вартістю точки комутації співвідношенням з розрахунку 100 бітів пам'яті на 1 точку часової комутації. Таким чином, подальший аналіз складності реалізації цифрових комутаційних схем з часовим розділенням включатиме оцінку загальної кількості точок комутації і загальної кількості бітів пам'яті, поділеної на 100.

Таким чином, складність реалізації визначається виразом

$$\tilde{N}_{\text{вс}} = N_{\text{пр}} + \frac{N_{\text{ч}}}{100},$$

де $N_{\text{пр}}$ – кількість точок комутації на ланці просторової комутації;

$N_{\text{ч}}$ – кількість бітів пам'яті.

В оцінці складності явно переважає кількість точок комутації на ланці просторової комутації. Зменшити кількість точок комутації на ланці просторової комутації можливо за рахунок використання часового мультиплексування цифрових потоків з груп вхідних ліній у груповий цифровий потік з більшою швидкістю. Вартість часового мультиплексора порівняно мала, якщо індивідуальні цифрові потоки вже були синхронізовані для виконання комутації. У такий спосіб може бути помітно зменшена складність ланки просторової комутації, тоді як загальна складність ланки часової комутації збільшується лише трохи.

Вартість реалізації знижується пропорційно складності, але лише до того моменту, поки вимоги вищої швидкості роботи системи комутації не призведуть до необхідності використання досконалішої технології.

3.7. Комутаційні схеми типу простір – час – простір та час – простір – час

Як було зазначено вище, ефектним засобом зменшення вартості комутаційної схеми з часовим розділенням є мультиплексування можливо більшої кількості каналів і виконання по можливості більшого об'єму операцій комутації на ланках часової комутації. Вартість операцій комутації на ланках часової комутації значно менша їх вартості на ланках просторової комутації, головним чином тому, що цифрова пам'ять набагато дешевша, ніж цифрові точки комутації (логічні схеми І). Ще раз зазначимо, що самі по собі точки комутації не такі дорогі. Основні витрати припадають на реалізацію схем доступу і вибору точки комутації з боку зовнішніх виводів, що і робить використання точок комутації порівняно дорогим.

Звичайно, існують практичні обмеження відносно того, скільки каналів може бути об'єднано в загальний тракт з часовим розділенням каналів для комутації на ланці часової комутації. Якщо існуюча зараз межа мультиплексування досягнута, то подальше зменшення складності реалізації можна одержати шляхом збільшення кількості ланок комутації. Звичайно, найбільш ефективний підхід полягає в розділенні ланок

просторової комутації ланкою часової комутації або в розділенні двох ланок часової комутації ланкою просторової комутації. Нижче будуть описані дві базові структури. Перша структура містить ланку часової комутації між двома ланками просторової комутації, що носить назву комутаційної схеми простір – час – простір (ПЧП). Друга структура, звичайно, називається комутаційною схемою час – простір – час (ЧПЧ).

Комутаційна схема типу ПЧП. Структура комутаційної схеми ПЧП зображена на рис. 3.13. Передбачається, що кожна схема просторової комутації є одноланковою і такою, що не блокується.

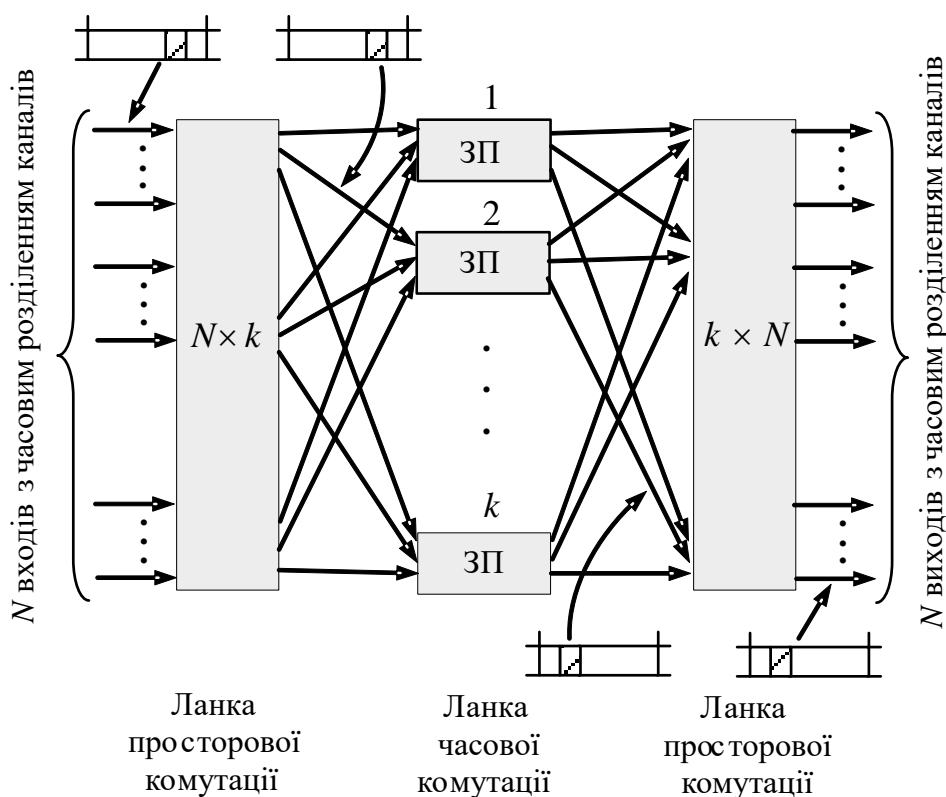


Рис. 3.13. Структура комутаційної схеми ПЧП

Встановлення сполучного шляху через комутаційну схему ПЧП вимагає знаходження блока просторової комутації, в якому є доступ до каналу записування в період часового інтервалу (що входить), коли може поступати інформація, а також доступ до каналу зчитування в період необхідного часового інтервалу (що виходить), коли зчитується інформація з пам'яті. Якщо кожна окрема ланка схеми (П, Ч, П) буде такою, що не блокується, то

вона буде функціонально еквівалентна триланковій просторовій схемі. Отже, граф імовірності на рис. 3.14, що описує комутаційну схему ПЧП, ідентичний графу імовірності для триланкової просторової комутаційної схеми.

Відповідно імовірність блокування схеми ПЧП дорівнює

$$B = (1 - q_1^2)^k,$$

де q_1 – імовірність того, що міжланкова лінія вільна,

$$q_1 = 1 - p_1 = 1 - p/\beta;$$

p_1 – імовірність того, що міжланкова лінія зайнята;

p – імовірність того, що зайнятий вхід;

β – коефіцієнт просторового розширення, $\beta = k/N$;

k – кількість блоків часової комутації центральної ланки схеми;

N – кількість трактів з часовим розділенням каналів.

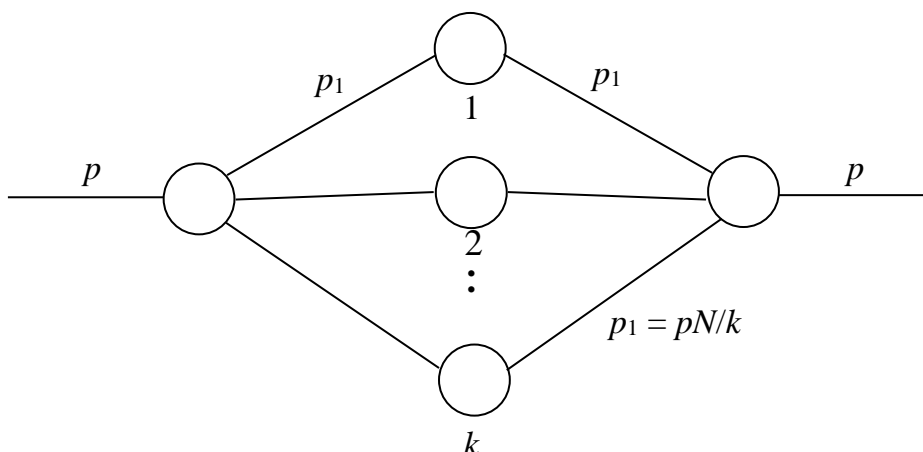


Рис. 3.14. Граф імовірності комутаційної схеми ПЧП на ланках без блокування

Припускаючи, що схема просторової комутації реалізується у вигляді одноланкових комутаційних блоків і що кожен тракт з часовим розділенням каналів містить s інформаційних каналів, можемо визначити складність реалізації комутаційної схеми ПЧП в такий спосіб:

$$\tilde{N} \approx 2kN + \frac{2kc \log_2 N + 8kc + kc \log_2 c}{100},$$

де $2kN$ – кількість точок комутації на ланці просторової комутації;

$2kc \log_2 N$ – кількість блоків керування на ланці просторової комутації;

$8kc$ – кількість бітів пам'яті на ланці часової комутації;

$kc \log_2 c$ – кількість бітів керування на ланці часової комутації.

Цей вираз є правильним за умови, що на першій ланці використовується керування на виході, а на третій ланці – керування на вході. При організації керування на виході для кожного виходу схеми можна використовувати звичайний мультиплексор даних. Кількість бітів інформації, що потребується для керування кожним мультиплексором, дорівнює $\log_2 N$, де N – число входів. Таким чином, загальна кількість бітів, що потрібні для повного визначення з'єднання, дорівнює $M \log_2 N$, де M – кількість виходів. Керування на вході організується за допомогою звичайних лінійних демультимплексорів. Сумарна кількість бітів, потрібних для повного визначення з'єднання, у даному випадку дорівнює $M \log_2 M$ [4].

Якщо порівняти складність схеми просторової комутації зі складністю еквівалентної триланкової комутаційної схеми, то складність схеми ПЧП буде майже у 100 разів менше. Такий значний ефект відбувається як результат того, що мовні сигнали вже були перетворені на цифрову форму і мультиплексовані (для цілей передавання). Якщо комутаційна схема ПЧП використовується в аналоговому оточенні, то переважаюча частина витрат падатиме на обладнання лінійного сполучення.

Комутаційна схема типу ЧПЧ. Другою формою реалізації багатоланкової комутаційної схеми з ланками просторової і часової комутації є структура, зображена на рис. 3.15. Цю комутаційну схему, звичайно, називають схемою час – простір – час. Інформація, що поступає по каналу вхідного тракту з часовим розділенням каналів, затримується на вхідній ланці

часової комутації до тих пір, поки не буде знайдений відповідний вільний шлях через ланку просторової комутації.

У цей момент інформація буде передана через ланку просторової комутації на відповідну вихідну ланку часової комутації, де вона зберігатиметься до тих пір, поки не наступить часовий інтервал, в якому вимагається здійснити передачу даної інформації.

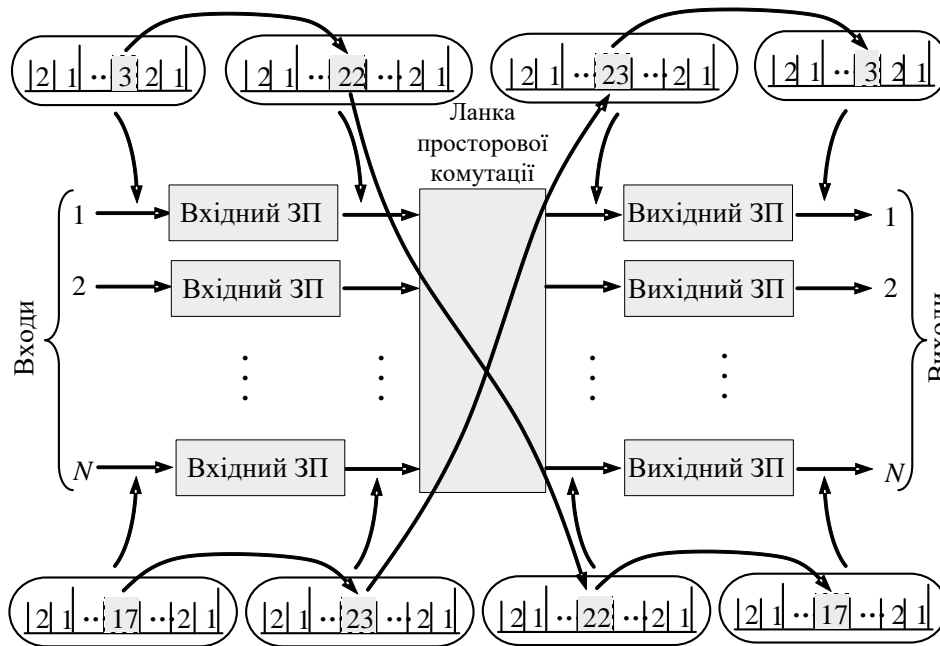


Рис. 3.15. Структура комутаційної схеми ЧПЧ

Припускаючи, що на ланках часової комутації забезпечується повнодоступність (тобто всі вхідні канали можуть бути сполучені зі всіма вихідними), при встановленні з'єднання на ланці просторової комутації можна використовувати будь-який часовий інтервал. Це ілюструє граф імовірності схеми ЧПЧ, наведений на рис. 3.16.

Важливою особливістю комутаційної схеми ЧПЧ, на яку слід звернути увагу, є те, що ланка просторової комутації працює з розділенням часу незалежно від зовнішніх трактів з часовим розділенням каналів. По суті, кількість часових інтервалів роботи ланки просторової комутації l не повинна співпадати з кількістю часових інтервалів із зовнішніх трактів з часовим розділенням каналів.

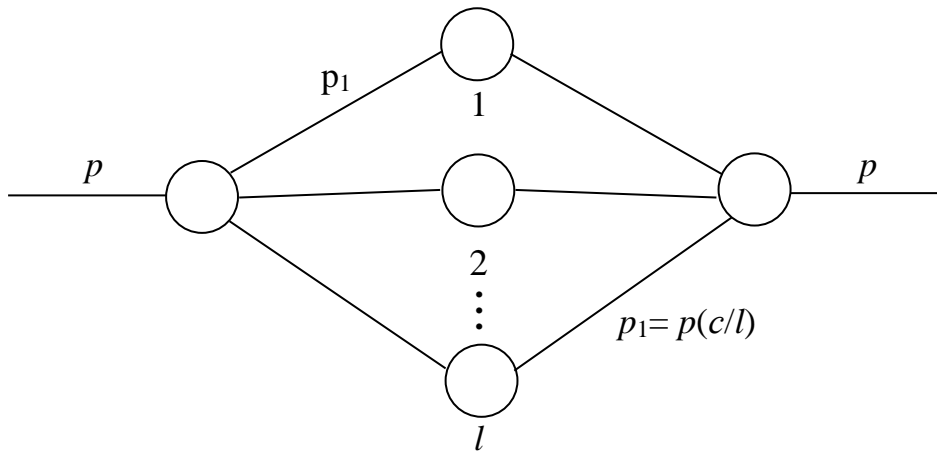


Рис. 3.16. Граф імовірності комутаційної схеми ЧПЧ на схемах без блокування

Якщо ланка просторової комутації є комутаційною схемою, що не блокується, то блокування у схемі ЧПЧ може виникати в тих випадках, коли немає вільних внутрішніх часових інтервалів ланки просторової комутації, протягом яких проміжна сполучна лінія, що веде від входної ланки часової комутації, і проміжна сполучна лінія, що веде до вихідної ланки часової комутації, одночасно вільні.

Очевидно, що імовірність блокування буде мінімальною, якщо кількість часових інтервалів ланки просторової комутації l буде вибрана достатньо великою. Дійсно, проводячи пряму аналогію з триланковими просторовими комутаційними схемами, схему ЧПЧ можна вважати такою, що не блокується, якщо $l = 2c - 1$.

Загальний вираз для імовірності блокування для комутаційної схеми ЧПЧ, окремі ланки якої (Ч, П, Ч) є тими, що не блокуються, має вигляд

$$B = (1 - q_l^2)^l,$$

де q_l – коефіцієнт часового розширення, $q_l = 1 - p_l = 1 - p / \alpha$;

$$\alpha = l / c;$$

l – кількість часових інтервалів роботи ланки просторової комутації;

c – максимальна кількість каналів, що можуть бути обслуговані простою комутаційною схемою.

Складність реалізації комутаційної схеми ЧПЧ можна розрахувати за формулою

$$\tilde{N} \approx N^2 + \frac{Nl \log_2 N + 2 \cdot 8Nc + 2Nl \log_2 c}{100}.$$

При виведенні цього виразу враховувалось, що на вхідній ланці часової комутації використовується керування на виході, а на вихідній ланці – керування на вході.

Структура ЧПЧ складніша, ніж структура ПЧП. Зазначимо, що в комутаційній схемі ЧПЧ використовується часова концентрація, а в схемі ПЧП – просторова. У міру того, як збільшуватиметься використання вхідних сполучних ліній, зменшуватиметься ступінь можливої концентрації. Якщо виявиться, що навантаження вхідних каналів достатньо високе, то для підтримки заданого значення імовірності блокування в комутаційних схемах ЧПЧ і ПЧП необхідно вводити розширення: відповідно в схемі ЧПЧ – часове, а в схемі ПЧП – просторове. Оскільки реалізація часового розширення значно дешевша, ніж просторового, то при високому використанні каналів комутаційна схема ЧПЧ виявиться більш економічною, ніж схема ПЧП. На рис. 3.17 наведені залежності складності реалізації схем ПЧП і ЧПЧ від використання вхідних каналів.

Як видно з рис. 3.17, комутаційні схеми ЧПЧ мають чітко виражену перевагу перед схемами ПЧП в області великих значень використання каналів. Для комутаційних схем малої ємності переважною є структура ПЧП. Можливо, що вибір конкретної архітектури значно більшою мірою залежатиме від інших чинників, таких як модульність, простота організації тестування, легкість нарощування ємності. Одним з моментів, який, звичайно, виділяють, віддаючи перевагу структурі ПЧП, є відносно простіші вимоги до організації керування схемами ПЧП, ніж схемами ЧПЧ. Для станцій великої ємності з великим навантаженням необхідність переважного використання структури ЧПЧ стає абсолютно очевидною.

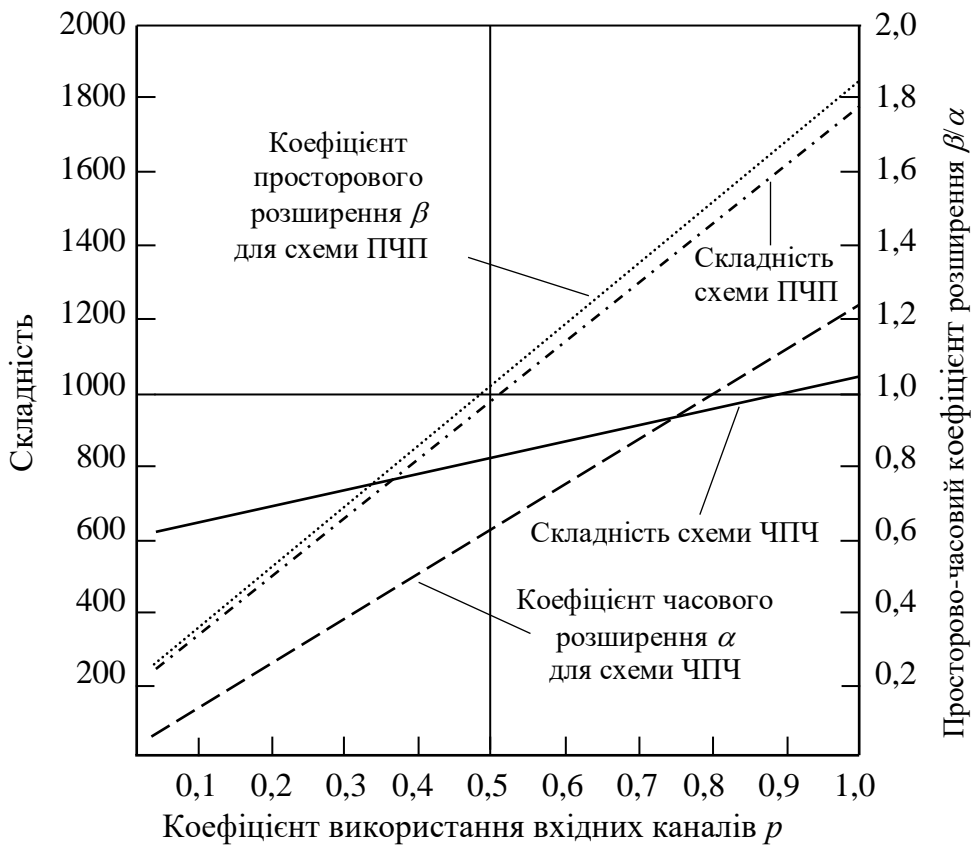


Рис. 3.17. Порівняння складності реалізації комутаційних схем ПЧП та ЧПЧ при імовірності блокування 0,002

Комутаційні схеми типу ЧПППЧ. Якщо ланка просторової комутації схеми ЧПЧ виявляється достатньо великою за ємністю, що призводить до додаткового збільшення складності пристрою керування, то для зменшення загальної кількості точок комутації ланка просторової комутації замінюється багатоланковою схемою. На рис. 3.18 зображена структура типу ЧПЧ, коли ланка просторової комутації замінена триланковою схемою. Оскільки три сусідні ланки є ланками просторової комутації, то цю структуру іноді називають комутаційною схемою ЧПППЧ.

Складність реалізації схеми ЧПППЧ можна визначити в такий спосіб:

$$N_{\text{реалізації}} = N_x + \frac{N_{\text{просторова}} + N_{\text{часова}} + N_{\text{просторова-часова}}}{100},$$

де N_x – кількість точок комутації, $N_x = 2Nk + k(N/n)^2$;
 $N_{\text{кер}}^{\text{пр}} – кількість бітів керуючої пам'яті ланки просторової комутації,$
 $N_{\text{кер}}^{\text{пр}} = 2k(N/n)l \log_2 n + k(N/n)l \log_2(N/n)$;
 $N_{\text{інф}}^{\text{ч}} – кількість бітів інформаційної пам'яті ланки часової комутації, $N_{\text{інф}}^{\text{ч}} = 2 \cdot 8Nc$;
 $N_{\text{кер}}^{\text{ч}} – кількість бітів керуючої пам'яті ланки часової комутації, $N_{\text{кер}}^{\text{ч}} = 2Nl \log_2 c$.$$

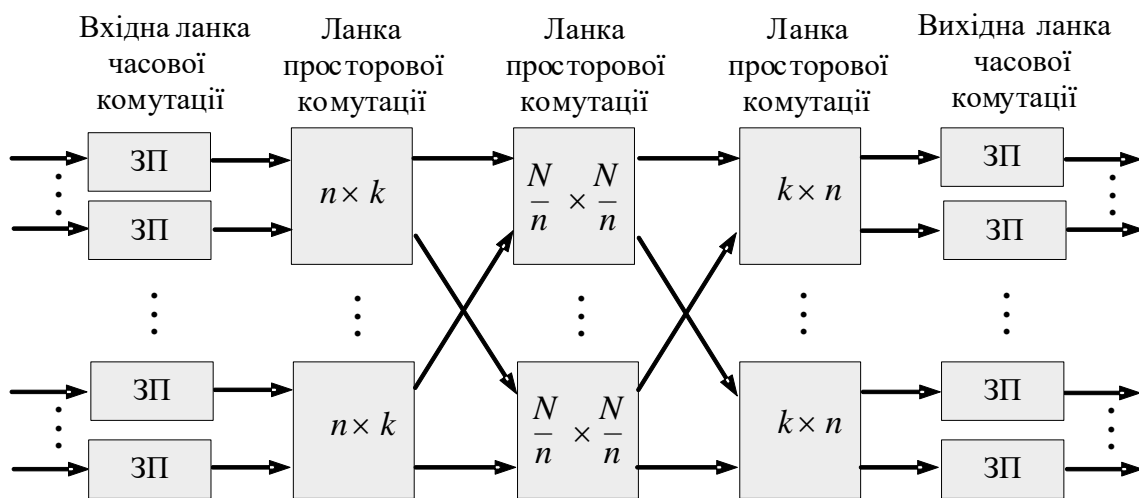


Рис. 3.18. Структура комутаційної схеми ЧПППЧ

При виведенні виразу враховувалося, що розподіл керування за ланками такий: на виході, на виході, на виході, на вході, на вході.

Граф імовірності комутаційної схеми ЧПППЧ наведений на рис. 3.19. Використовуючи граф імовірності, можна визначити імовірність блокування комутаційної схеми ЧПППЧ:

$$B = \left\{ 1 - q_1^2 \left[1 - (1 - q_2^2)^k \right] \right\}^l,$$

де $q_1 = 1 - p_1 = 1 - p/\alpha$; $q_2 = 1 - p_2 = 1 - p/(\alpha\beta)$; $\alpha = l/c$,
 $\beta = k/n$.

Результати показують, що комутаційні схеми надвеликої ємності можуть бути реалізовані з використанням методів цифрового часового розділення на цілком прийнятному для практики рівні складності.

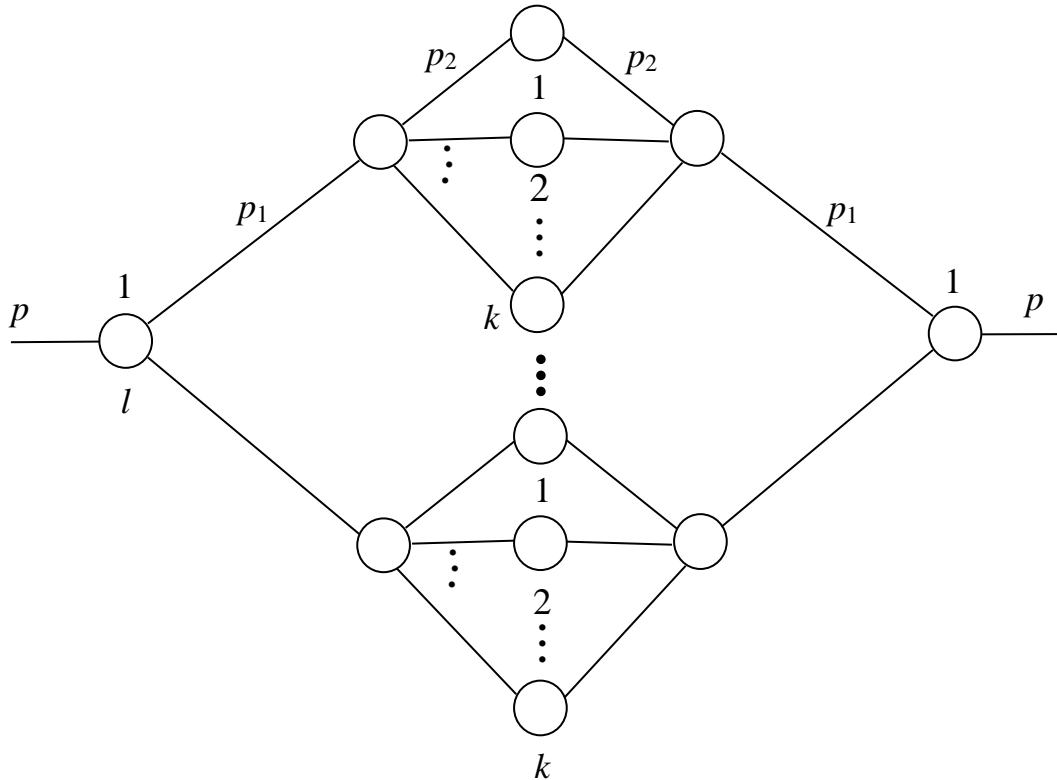


Рис. 3.19. Граф імовірності комутаційної схеми ЧППЧ

Контрольні запитання

1. Дайте визначення цифрової комутації.
2. Для чого використовуються багатоланкові комутаційні схеми?
3. У чому полягає сутність просторової комутації?
4. Назвіть способи керування роботою запам'ятовуючих пристроїв ланки часової комутації.
5. Якими чинниками визначається складність реалізації схем комутації каналів з часовим розділенням?

4. СИСТЕМИ ПЕРВИННОГО ГРУПОУТВОРЕННЯ

4.1. Загальні принципи побудови систем первинного групоутворення

Системи первинного групоутворення будуються на принципі часового розділення каналів з сигналами імпульсно-кової модуляції (ІКМ). При цьому здійснюється аналого-цифрове перетворення вхідних сигналів у передавальній частині апаратури й зворотне цифро-аналогове перетворення в її приймальній частині.

Первинне групоутворення полягає в побайтному об'єднанні цифрових потоків (сигналів ІКМ) у стандартний первинний цифровий потік, як показано на рис. 4.1. Обладнання, що виконує перераховані операції при передаванні й зворотні їм операції при прийманні, називають мультиплексором ІКМ (або первинним мультиплексором ІКМ).

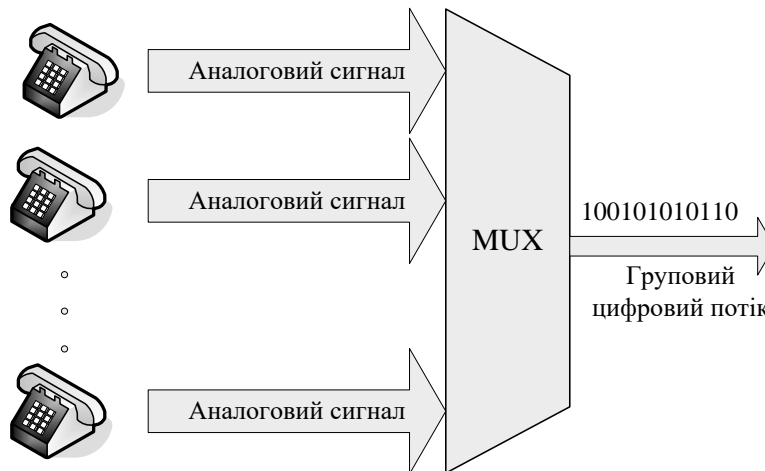


Рис. 4.1. Первинний мультиплексор ІКМ

Первинний груповий цифровий потік (груповий сигнал ІКМ) має тривалість циклу, що дорівнює періоду дискретизації телефонного сигналу $T_a = 125 \text{ мкс}$ (частота повторення циклів дорівнює частоті дискретизації 8 кГц). Цикли розбиті на часові (канальні) інтервали, що переносять по 8 символів (що кодують один відлік аналогового сигналу) і закріплені за різними каналами, так що кожний цикл переносить по одному відліку

кожного каналу. При цьому швидкість передачі одного відліку становить: $8 \times 8 = 64$ біт/с. Цифровий канал з такою швидкістю називається основним цифровим каналом (ОЦК) і покладений в основу всіх цифрових ієрархій.

Мультиплексори ІКМ були розроблені для об'єднання й передачі аналогових телефонних сигналів, і дотепер виконання цих функцій залишається основним застосуванням даного обладнання. Однак з розвитком цифрових технологій доступу одержали поширення цифрові канали передачі даних зі швидкістю 64 кбіт/с, надані абонентам телефонної мережі. Тому зараз під первинним мультиплексором, як правило, розуміють мультиплексор цифрових потоків 64 кбіт/с, який може використовуватися для телефонії або передачі даних різних типів. При цьому існують стандартизовані процедури мультиплексування декількох низькошвидкісних цифрових каналів (наприклад, у діапазоні від 400 біт/с до 28,8 кбіт/с, 33,6 кбіт/с і вище) в один базовий канал 64 кбіт/с (ОЦК).

В основі сучасних цифрових транспортних мереж лежать первинні цифрові потоки Е1 і Т1, що являють собою перші рівні плезіохронної цифрової ієрархії:

– первинний цифровий потік європейської ієрархії – Е1 зі швидкістю 2 048 кбіт/с, що переносить 30 телефонних каналів у 32 часових інтервалах, включаючи циклову синхронізацію й сигнальну інформацію (використовується нерівномірне квантування аналогових цифрових сигналів відповідно до А-закону);

– первинний цифровий потік північноамериканської ієрархії – Т1 зі швидкістю 1 544 кбіт/с, що переносить 24 телефонних канали (використовується нерівномірне квантування аналогових цифрових сигналів відповідно до μ -закону).

Ці сигнали формуються на основі однакових загальних принципів. Далі розглянемо тільки систему первинного групоутворення, що формує цифровий потік Е1. На рис. 4.2 у спрощеному вигляді наведена схема системи первинного групоутворення.

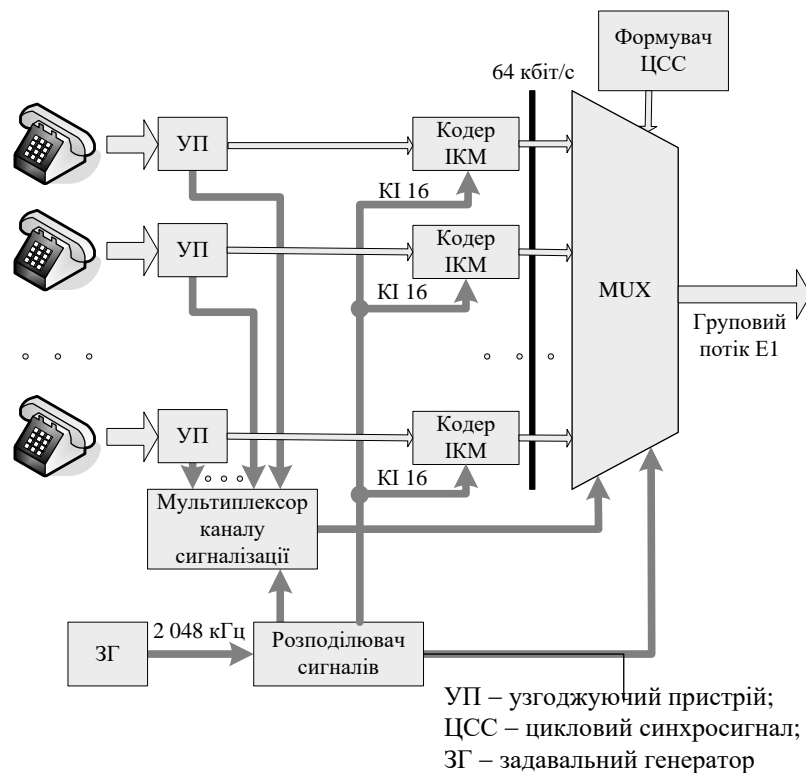


Рис. 4.2. Спрощена схема системи первинного групоутворення

Вхідні аналогові сигнали (від 1 до 30) перетворюються на цифрову форму кодерами ІКМ. Цифрові сигнали ІКМ разом із цикловим синхросигналом (ЦСС) і додатковою службовою інформацією формують груповий цифровий потік Е1. Сигнальна інформація групового потоку формується на основі сигнальної інформації, одержуваної від кожного вхідного аналогового каналу спеціальними узгоджувальними пристроями (УП). Слід зазначити важливу роль розподільника синхросигналу, що працює від задавального тактового генератора (ЗГ). Він синхронізує кожний блок, щоб сигнали передавалися в належні часові інтервали.

На приймальному боці виконуються аналогічні операції у зворотному порядку.

4.2. Структура циклу апаратури первинного групоутворення

У наш час експлуатується велика кількість цифрових систем передачі (ЦСП) вітчизняного й закордонного виробництва. Вітчизняні системи мають назву ЦСП із ІКМ (цифрові системи

передачі з імпульсно-ковою модуляцією). Замість рівня ієрархії в позначенні системи вказується кількість інформаційних ОЦК даної системи. Так, ЦСП першого рівня ієрархії (система первинного групоутворення) позначається ІКМ-30, другого – ІКМ-120 тощо. Далі розглянемо тільки систему первинного групоутворення ІКМ-30, а ЦСП вищих рівнів ієрархій будуть розглянуті в наступному розділі.

У системі передачі ІКМ-30 використовується принцип часового розділення каналів, тому правильне відновлення вихідних сигналів на приймальному боці можливе тільки при синхронній і синфазній роботі генераторного обладнання (ГО) на передавальній і приймальній станціях, для чого повинні бути забезпечені такі види синхронізації: тактова синхронізація, циклова синхронізація й надциклова синхронізація. Розглянемо призначення кожної з них.

Тактова синхронізація забезпечує рівність швидкостей обробки цифрових сигналів у лінійних і станційних регенераторах, кодерах та інших пристроях ЦСП, що здійснюють обробку сигналу з тактовою частотою.

Циклова синхронізація забезпечує правильне розділення і декодування кодових груп цифрового сигналу й розподіл декодованих відліків по відповідних каналах у приймальній частині апаратури.

Надциклова синхронізація забезпечує на приймальному боці правильний розподіл сигналів керування й взаємодії (СКВ) по відповідних каналах. Сигнали керування й взаємодії призначені, наприклад, для керування роботою АТС (набір номера, відповідь, відбій, роз'єднання й т.д.).

Порушення хоча б одного з видів синхронізації призводить до втрати зв'язку по всіх каналах ЦСП. Особливості побудови системи синхронізації будуть розглянуті окремо, а поки зосередимо увагу на елементах структури кадру, призначених для забезпечення циклової і надциклової синхронізації.

Циклова синхронізація здійснюється в такий спосіб. На передавальній станції до складу групового цифрового потоку на початку циклу вводиться цикловий синхросигнал. На приймальній станції встановлюється приймач синхросигналу, що виділяє цикловий синхросигнал із групового цифрового потоку й

тим самим визначає початок циклу передачі. Цикловий синхросигнал повинен мати певні відмітні ознаки, у якості яких використовується заздалегідь визначена й незмінна структура синхросигналу (наприклад, 0011011 у ЦСП ІКМ-30). Груповий цифровий потік у силу випадкового характеру інформаційних сигналів таких властивостей не має. Робота системи надциклової синхронізації, як і робота системи циклової синхронізації, заснована на передачі надциклового синхросигналу (НЦС) в одному із циклів надциклу.

Характеристики циклів первинних ЦСП визначені рекомендаціями ITU-T G.732, G.734. Відповідно до рекомендації G.732 структура циклу первинного цифрового потоку Е1 має такі характеристики:

- кількість каналних інтервалів у циклі – 32 (нумерація з 0 по 31);
- кількість символів у каналному інтервалі – 8 (нумерація з 1 по 8);
- кількість символів у циклі – 256;
- частота повторення циклів – 8 кГц;
- частота проходження сигналу циклової синхронізації – 4 кГц;
- частота проходження надциклів – 500 Гц (період надциклу – 2 мс);
- період циклу контролю CRC-4 – 2 мс.

Таким чином, цикл цифрового потоку Е1 містить 32 каналних інтервали з нумерацією від 0 до 31 зі швидкістю по 64 кбіт/с кожний ($32 \times 64 \text{ кбіт/с} = 2\,048 \text{ кбіт/с}$). Кожний цикл включає 256 бітів ($32 \times 8 \text{ біт}$).

Розглянемо структуру циклу передачі ЦСП ІКМ-30, зображену на рис. 4.3. Груповий цифровий потік, сформований у тракці передачі апаратури “ІКМ-30”, складається з послідовно переданих надциклів, кожний з яких містить 16 циклів передачі Ц0 ... Ц15.

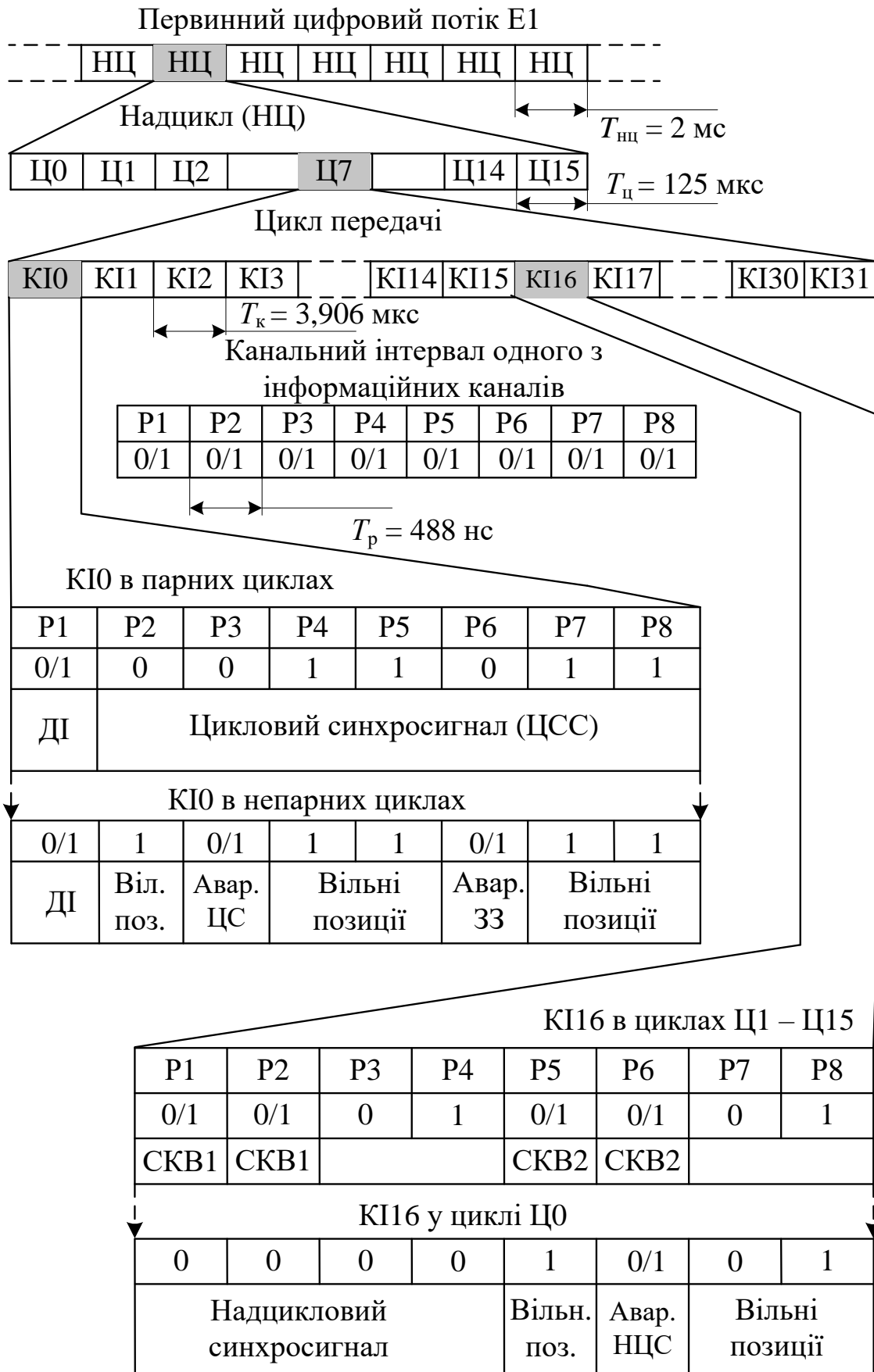


Рис. 4.3. Структура циклу ЦСП ІКМ-30

Період проходження циклів $T_{\ddot{o}}$ визначається частотою дискретизації $f_{\ddot{a}}$:

$$T_{\ddot{o}} = T_{\ddot{a}} = \frac{1}{f_{\ddot{a}}} = \frac{1}{8 \cdot 10^3} = 125 \text{ мкс}.$$

Таким чином, тривалість надциклу складає

$$T_{i\ddot{o}} = 16T_{\ddot{o}} = 16T_{\ddot{a}} = 125 \cdot 16 = 2 \text{ мкс}.$$

Відповідно частота проходження надциклів складає $f_{\text{нц}} = 500$ Гц.

Кожен цикл передачі складається з $N = 32$ каналних інтервалів (КІ0 ... КІ31), розподілених в такий спосіб:

- 30 каналних інтервалів (КІ1 ... КІ15, КІ17 ... КІ31) призначені для передачі інформації, при цьому КІ8 – для передачі дискретної інформації, тобто для організації 8 цифрових каналів передачі дискретної інформації з пропускною спроможністю 8 кбіт/с замість одного стандартного телефонного каналу 64 кбіт/с;

- один каналний інтервал (КІ0) – для передачі сигналу циклової синхронізації (СЦС);

- один каналний інтервал (КІ16) – для передачі сигналів керування та взаємодії (СКВ) і сигналу надциклової синхронізації (СНЦС).

Кожен каналний інтервал складається з восьми розрядів, що позначаються Р1 – Р8. При цьому тривалість кожного каналного інтервалу $T_{\ddot{e}}$ складає

$$T_{\ddot{e}} = \frac{T_{\ddot{o}}}{32} = \frac{125}{32} = 3,90625 \text{ мкс},$$

а частота проходження каналних інтервалів $f_{\ddot{e}}$ складає

$$f_{\ddot{e}} = \frac{1}{T_{\ddot{e}}} = \frac{1}{3,9 \cdot 10^{-3}} = 256 \text{ кГц}.$$

Тривалість кожного розряду T_{δ} в кожному каналному інтервалі складає

$$T_{\delta} = \frac{T_{\hat{\epsilon}}}{8} \approx 0,49 \text{ мкс}.$$

Частота проходження символів у циклі передачі $f_{\text{нєі â}}$ (тактова частота цифрового потоку Е1) складає

$$f_{\text{нєі â}} = \frac{1}{T_{\delta}} = \frac{1}{0,49 \cdot 10^{-3}} = 2048 \text{ Бит/с},$$

що відповідає швидкості передачі інформації 2048 біт/с (при двійковому коді).

Сигнал циклової синхронізації передається в каналному інтервалі КІ0 кожного циклу передачі ($m = 0, 2, 4, \dots$) на позиціях Р2 – Р8 і має структуру 0011011.

Позиція Р1 у каналному інтервалі КІ0 як у парних, так і в непарних циклах передачі ($m = 1, 3, 5, \dots$) використовується для передачі дискретної інформації (ДІ) з пропускнуою спроможністю 8 кбіт/с шляхом уведення її безпосередньо в груповий цифровий потік з метою організації одного цифрового каналу.

На позиції Р2 у кожному каналному інтервалі КІ0 кожного непарного циклу завжди передається сигнал “1”.

На позиціях Р3 і Р6 каналного інтервалу КІ0 у непарних циклах передачі передаються відповідно сигнали аварій приймальної частини апаратури “ІКМ-30”: аварія циклової синхронізації (“Авар. ЦС”) і зміни залишкового загасання лінійного тракту (“Авар. ЗЗ”). Ці сигнали передаються в передавальну частину апаратури, відображаються пристроями сигналізації для попередження експлуатаційно-технічного персоналу й прийняття ним відповідних заходів для ліквідації цих аварій.

Позиції Р4, Р5, Р7 і Р8 у кожному каналному інтервалі КІ0 кожного непарного циклу передачі є резервними, їх займають одиничними символами для покращення роботи системи тактової синхронізації.

У КІ16 організується канал із пропускною спроможністю 64 кбіт/с для передачі сигналів керування й взаємодії. Якщо передача сигналів керування й взаємодії не потрібна, то КІ16 можна використовувати для передачі інформації, за винятком організації телефонного каналу апаратури ІКМ. На практиці канал 64 кбіт/с у КІ16 використовується або для організації загального каналу сигналізації ССС (Common Channel Signalling), або для поканальної сигналізації САС (Channel Associated Signalling).

У випадку поканальної сигналізації в каналному інтервалі КІ16 на позиціях Р1, Р2 і Р5, Р6 передаються по два однорозрядні сигнали керування і взаємодії СКВ1 і СКВ2 для кожного телефонного каналу, якщо апаратура “ІКМ-30” працює з метою створення пучка сполучних ліній між АТС. Передача цих сигналів здійснюється по черзі в циклах передачі Ц1 ... Ц15: у Ц1 – для каналів 1-го і 16-го, у Ц2 – для каналів 2-го і 17-го, а в Ц15 – для каналів 15-го і 30-го.

Для розподілу цих сигналів усередині каналного інтервалу КІ16 на позиціях Р3, Р7 і Р4, Р8 завжди передаються відповідно сигнали “0” і “1”.

Для правильного розподілу сигналів СКВ по окремих каналах на приймальному боці використовується сигнал надциклової синхронізації (СНЦС), що має структуру 0000 і передається відповідно на позиціях Р1 ... Р4 у каналному інтервалі КІ16 кожного нульового циклу передачі Ц0.

При збої надциклової синхронізації в приймальній частині апаратури формується сигнал аварії (“Авар. НЦС”), що передається на передавальний бік на позиції Р6 каналного інтервалу КІ16 кожного нульового циклу передачі Ц0.

Для швидкого пошуку сигналу надциклової синхронізації в каналному інтервалі КІ16 кожного циклу передачі Ц0 завжди передається сигнал “1” на позиціях Р5, Р8 і сигнал “0” на позиції Р7.

Необхідно зазначити, якщо в процесі передачі інформації немає аварійних ситуацій, то сигнали “Авар. ЦС”, “Авар. ЗЗ”, “Авар. НЦС” передаються з приймальної в передавальну частину апаратури “ІКМ-30” на вищеописаних позиціях відповідних

каналних інтервалів і циклів передачі сигналом “0”, якщо є аварії, то вони передаються сигналом “1”.

У структурі циклу первинного цифрового потоку E1 передбачена процедура циклічної перевірки за методом CRC-4 (Cyclical Redundancy Check) відповідно до рекомендації ITU-T G.704. Ця перевірка здійснюється для кожного блока цифрового потоку E1 довжиною 2 048 бітів (8 циклів).

На передавальному боці визначаються перевірочні біти й передаються на приймальний бік разом з інформаційними бітами. На приймальному боці на підставі прийнятих інформаційних бітів таким же точно способом, як і на передавальному боці, здійснюється визначення перевірочних бітів. Після чого прийняті перевірочні біти порівнюються з розрахованими на приймальному боці. Якщо результати однакові, то вважається, що інформаційний блок не містить помилок. За допомогою такої перевірки забезпечується додатковий захист алгоритму циклової синхронізації від ефекту імітації слів циклової синхронізації, а також поліпшується здатність апаратури до виявлення помилок.

Перевірочні біти CRC-4 передаються в першому біті кожного циклу, при цьому використовується спеціальний надцикловий формат. Кожний перевірочний надцикл CRC-4 поєднує 16 циклів потоку E1 (Ц0 ... Ц15). Надцикл поділяється на два піднадцикли SMF (Sub Multi Frame) – SMF I і SMF II, що містять по 8 циклів кожний.

У табл. 4.1 показано використання перших восьми бітів кожного циклу при генерації перевірочного надциклу. Сигнал циклової синхронізації 0011011 вводиться на позиції P2 – P8 КІО у кожному черговому циклі. У табл. 4.1 введені такі позначення: Si, Sn – резервні позиції (якщо не використовуються, то біт набуває значення “1”).

У циклах, що містять слово циклової синхронізації, на позиції P1 знаходяться перевірочні біти C1, C2, C3 і C4. У циклах, де немає слова циклової синхронізації, на позиції P1 знаходяться біти синхросигналу перевірочного надциклу (001011), а два вільних біти (Si) використовуються для контролю. За їх допомогою може передаватися інформація про помилки в блоці.

Таблиця 4.1

Перевірочний надцикл

Піднадцикл (SMF)	Номер циклу	Розряди КІО							
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
I	0	31	0	0	1	1	0	1	1
	1	0	1	Авар. ЦС	Sn	Sn	Авар. 33	Sn	Sn
	2	C2	0	0	1	1	0	1	1
	3	0	1	Авар. ЦС	Sn	Sn	Авар. 33	Sn	Sn
	4	C3	0	0	1	1	0	1	1
	5	1	1	Авар. ЦС	Sn	Sn	Авар. 33	Sn	Sn
	6	C4	0	0	1	1	0	1	1
	7	0	1	Авар. ЦС	Sn	Sn	Авар. 33	Sn	Sn
II	8	31	0	0	1	1	0	1	1
	9	1	1	Авар. ЦС	Sn	Sn	Авар. 33	Sn	Sn
	10	C2	0	0	1	1	0	1	1
	11	1	1	Авар. ЦС	Sn	Sn	Авар. 33	Sn	Sn
	12	C3	0	0	1	1	0	1	1
	13	Si	1	Авар. ЦС	Sn	Sn	Авар. 33	Sn	Sn
	14	C4	0	0	1	1	0	1	1
	15	Si	1	Авар. ЦС	Sn	Sn	Авар. 33	Sn	Sn

4.3. Апаратурна реалізація систем первинного групоутворення

Обладнання вітчизняного виробництва для утворення первинного цифрового потоку E1 з описаною вище структурою, як уже було сказано раніше, поширене за назвою ІКМ-30. Тому далі коротко розглянемо особливості побудови апаратури ІКМ-30.

Призначення та склад апаратури “ІКМ-30”. Апаратура з часовим розподілом каналів “ІКМ-30” призначена для використання як каналоутворювальна апаратура в цифрових системах передачі більш високих порядків (“ІКМ-120”, “ІКМ-480”, “ІКМ-1920” та ін.). Апаратура може також використовуватися для організації пучків сполучних ліній між різними видами автоматичних телефонних станцій (АТС).

Апаратура забезпечує організацію 30 стандартних телефонних каналів; організацію одного каналу звукового мовлення зі смугою переданих частот 50 – 10 000 Гц замість чотирьох стандартних телефонних каналів; організацію 8 цифрових каналів для передачі дискретної інформації з пропускнуою спроможністю 8 кбіт/с замість одного стандартного телефонного каналу; організацію одного цифрового каналу для передачі дискретної інформації з пропускнуою спроможністю 8 кбіт/с шляхом уведення її безпосередньо в груповий цифровий потік.

До складу апаратури “ІКМ-30” входять: аналого-цифрове обладнання (АЦО); кінцеве обладнання лінійного тракту (КЛТ); регенераційний пункт, що не обслуговується (РПН); регенераційний пункт, що обслуговується (РПО). Структурна схема апаратури “ІКМ-30” наведена на рис. 4.4.

Аналого-цифрове обладнання призначене для аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворення 30 телефонних сигналів відповідно в передавальній і приймальній частинах обладнання; для формування та розподілу групового цифрового потоку зі швидкістю 2 048 кбіт/с; для введення і виведення сигналів дискретної інформації; для організації 2 чи 4-провідних закінчень каналу; для сполучення за допомогою узгоджувальних пристроїв апаратури “ІКМ-30” з апаратурою АТС.

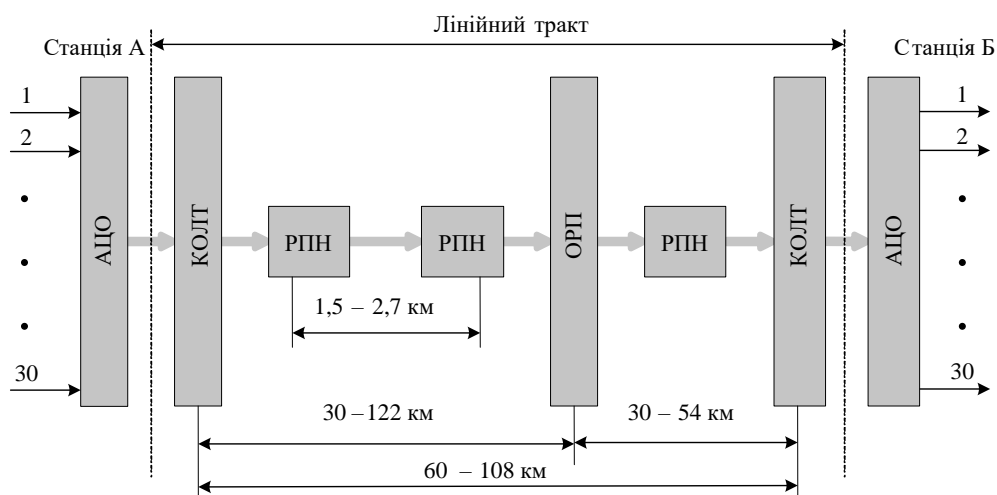


Рис. 4.4. Структурна схема апаратури “ІКМ-30”

Кінцеве обладнання лінійного тракту (КОЛТ) призначене для формування й приймання лінійного цифрового сигналу; для організації дистанційного живлення регенераційних пунктів, що не обслуговуються (РПН); для організації телеконтролю за станом регенераційних пунктів, що не обслуговуються; для організації службового зв'язку між обладнанням лінійного тракту (ОЛТ) і регенераційними пунктами, що не обслуговуються.

Регенераційні пункти, що не обслуговуються, призначені для усунення спотворень цифрових лінійних сигналів, котрі виникають через вплив різного роду завад і втрат у лінії зв'язку (кабелі).

Аналого-цифрове обладнання. Аналого-цифрове обладнання складається з індивідуального й групового обладнання.

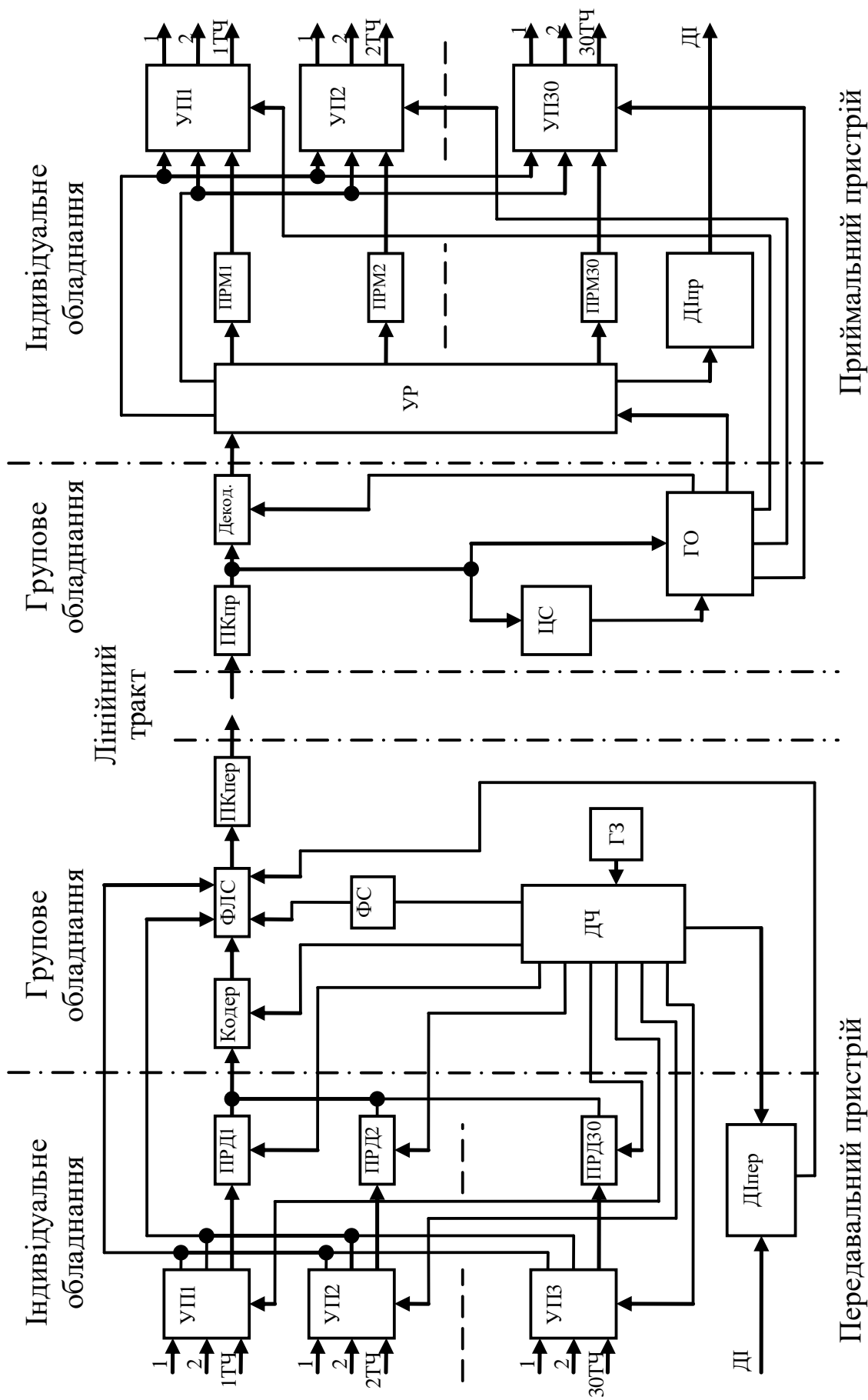
Індивідуальне обладнання містить пристрої, кожний з яких обробляє сигнали, що відповідають тільки одному каналу, а пристрої групового обладнання обробляють сигнали всіх 30 каналів.

В індивідуальному обладнанні виконуються такі операції: узгодження входу й виходу кожного каналу апаратури "ІКМ-30" з кінцевою апаратурою телефонного зв'язку, у тому числі й з обладнанням АТС; дискретизація аналогових сигналів у передавальній частині АЦО й відновлення вихідного сигналу з послідовності прийнятих відліків у приймальній частині АЦО.

У груповому обладнанні здійснюється аналого-цифрове й цифро-аналогове перетворення сигналів тональної частоти (відповідно в передавальній і приймальній частинах АЦО).

Схема АЦО для одного напрямку передачі зображена на рис. 4.5. Робота аналого-цифрового обладнання відбувається в такий спосіб.

На вхід кожного узгоджувального пристрою УП1 – УП30 від кінцевої апаратури телефонного зв'язку надходять аналогові сигнали тональної частоти (ТЧ), що потім передаються у відповідні передавачі ПРД1 – ПРД30.



Приймальний пристрій

Передавальний пристрій

Рис. 4.5. Схема аналого-цифрового обладнання апаратури ІКМ-30

Якщо апаратура “ІКМ-30” використовується для створення пучків сполучних ліній між різними АТС, то для забезпечення їхньої спільної роботи, крім розмовних сигналів, необхідно передавати також службові сигнали (заняття каналу, набір номера, відповідь абонента, відбій устанавленого з’єднання та ін.). Такі сигнали в АТС називаються сигналами керування та взаємодії. З цією метою на перші два входи кожного узгоджувального пристрою надходять два сигнали керування та взаємодії СКВ1 і СКВ2, що перетворюються на імпульсні послідовності керування та взаємодії з тактовою частотою 500 Гц кожна, при цьому ці послідовності строго синхронізуються з лінійним сигналом. Процесом такого перетворення керують імпульсні послідовності, сформовані в генераторному обладнанні, що складається з блока генератора, який задає імпульсну послідовність з номінальною частотою 2 048 кГц (ГЗ), і блока дільника частоти (ДЧ).

Перетворені в такий спосіб сигнали керування та взаємодії СКВ1 і СКВ2 надходять далі на входи формувача лінійного сигналу (ФЛС) передавальної частини АЦО.

Аналогові сигнали тональної частоти, що надійшли з узгоджувальних пристроїв УП1 – УП30, у відповідних передавачах ПРД1 – ПРД30 обмежуються по частоті фільтрами нижніх частот (ФНЧ) зі смугою пропускання 300 – 3 400 Гц, а потім за допомогою амплітудно-імпульсних модуляторів (АІМ) перетворюються на послідовності відліків.

Для здійснення амплітудно-імпульсної модуляції на другі входи кожного передавача ПРД1 – ПРД30 з генераторного обладнання надходять імпульсні послідовності, котрі модулюються з тактовою частотою 8 кГц та є зсунутими за часом одна відносно одної на величину, що дорівнює тривалості одного каналного інтервалу.

Виходи всіх передавачів поєднуються в одній точці, у якій і утворюється груповий АІМ сигнал, що відповідає 30 каналам (у кожному каналному інтервалі існує строго визначений номером каналу імпульсний відлік переданого телефонного сигналу). Груповий амплітудно-модульований сигнал надходить на вхід кодера, у якому відбувається квантування кожного імпульсу цього сигналу за рівнем відповідно до закону компандування, а

потім кодування восьмирозрядним двійковим кодом. Синхронність всіх операцій, виконуваних у кодері, забезпечується подачею на його другий вхід керуючих сигналів, сформованих у генераторному обладнанні.

Таким чином, на виході кодера формується груповий ІКМ сигнал. Цей сигнал поєднується з імпульсними послідовностями керування та взаємодії у формувачі лінійного сигналу (ФЛС).

З метою організації одного цифрового каналу для передачі дискретної інформації з пропускнуою спроможністю 8 кбіт/с шляхом уведення її безпосередньо в груповий цифровий потік остання подається на вхід блока передачі дискретної інформації ($ДІ_{пер}$), де під впливом керуючих сигналів, що надходять з генераторного обладнання, перетворюється на сигнал, синхронний з груповим ІКМ сигналом. З виходу блока $ДІ_{пер}$ перетворена дискретна інформація також надходить у блок ФЛС.

Для забезпечення циклової та надциклової синхронізації в роботі передавальної та приймальної частини апаратури “ІКМ-30” у блоці формувача синхросигналу (ФС) формуються сигнали циклової та надциклової синхронізації, що також вводяться в блок ФЛС. Ці сигнали, надійшовши в блок ФЛС, дозволяють не тільки здійснити просте об’єднання аналогових сигналів, сигналів керування та взаємодії і дискретної інформації, що надійшли відповідно з блоків кодера, УП1 – УП30, $ДІ_{пер}$, але також і строго визначити їхнє часове положення в циклі передачі апаратури в цілому. Синхронність роботи блока ФС забезпечується також шляхом подачі на його вхід керуючих сигналів від генераторного обладнання. З виходу блока ФЛС об’єднаний груповий ІКМ сигнал надходить у перетворювач коду передачі ($ПК_{пер}$), що формує лінійний сигнал апаратури “ІКМ-30”.

У приймальній частині АЦО здійснюються зворотні перетворення. У пристрої поділу (ПП), що виконує роль розподільника приймання, груповий сигнал розділяється між відповідними приймачами, у яких відновлюється вихідна форма переданих сигналів: телефонних – у приймачах ПРМ1 – ПРМ30; сигналів керування і взаємодії – в узгоджувальних пристроях УП1 – УП30; сигналів дискретної інформації – у блоці $ДІ_{пр}$.

Процесом декодування й розподілу групового сигналу керує генераторне обладнання приймальної частини апаратури, початкова фаза роботи якого встановлюється пристроєм циклової синхронізації (ЦС).

Генераторне обладнання апаратури “ІКМ-30”. Генераторне обладнання (ГО) формує й розподіляє в часі керуючі імпульсні послідовності, визначаючи тим самим порядок і послідовність роботи каналних і групових пристроїв апаратури “ІКМ-30”.

Функціонально генераторне обладнання поділяється на передавальне й приймальне. Кожне з них містить такі вузли: пристрій тактової синхронізації (ПТС), що виробляє імпульси тактової частоти. Функції цього пристрою при передачі виконує задаючий генератор (ГЗ), а на прийманні – виділювач тактової частоти (ВТЧ); дільник розрядний ДР, який формує вісім імпульсних послідовностей з частотою проходження кодових груп, що використовуються для керування груповими пристроями; дільник каналний (ДК), котрий формує 32 імпульсні послідовності, що відповідають каналним інтервалам циклу передачі й використовуються для керування каналними пристроями; дільник цикловий (ДЦ), який формує імпульсні послідовності, що відповідають циклам Ц0 – Ц15.

Відмінними рисами генераторного обладнання передачі й приймання є такі: організація режиму керування генераторного обладнання для забезпечення синхронізації приймального обладнання апаратури по циклах і надциклах, що досягається примусовим установленням (фазуванням) ДР, ДК і ДЦ; організація режиму як внутрішньої, так і зовнішньої тактової синхронізації з метою забезпечення роботи апаратури в інтегральній цифровій мережі зв'язку.

Обладнання лінійного тракту апаратури “ІКМ-30”. Лінійний тракт апаратури “ІКМ-30” містить у собі кінцеві й проміжні станції, що обслуговуються, з'єднані кабельними лініями з ввімкненими регенераційними пунктами, що не обслуговуються (РПН). Регенерація цифрового сигналу після проходження кожної ділянки кабельної лінії здійснюється лінійними регенераторами, розташованими в РПН, чи станційними регенераторами, розташованими на станціях, що

обслуговуються. Сукупність ділянки кабельної лінії та регенератора, підключеного до її виходу, являє собою регенераційну ділянку, що є основним елементом лінійного тракту. Лінійний тракт – чотирипровідний і може бути організований за однокабельною і двокабельною системами. При однокабельній системі регенератори протилежних напрямків передачі підключаються до пар одного кабелю, при двокабельній – до пар різних кабелів.

Процес регенерації цифрового сигналу полягає в розпізнаванні кодових символів, відновленні відповідно до розпізнаних символів форми, амплітуди, часового положення імпульсів і пробілів у сигналі, що регенерується, і передачі їх на вхід наступної регенераційної ділянки.

Розпізнавання кодових символів здійснюється методом однократного відліку, що полягає в порівнянні рівня сигналу, котрий регенерується, з еталонним граничним рівнем (порогом розпізнавання) у момент часу (момент розпізнавання), апріорно відповідний найбільшій імовірності правильного розпізнавання. Якщо рівень сигналу в момент розпізнавання перевищує поріг розпізнавання, то приймається рішення, що на вхід регенераційної ділянки був переданий імпульс, якщо не перевищує – пробіл (відсутність імпульсу). У процесі розпізнавання кодового символу, якому відповідає імпульс позитивної полярності, сигнал, що регенерується, порівнюється з позитивним граничним рівнем негативної полярності (з негативним граничним рівнем).

Контрольні запитання

1. Для чого призначений первинний мультиплексор ІКМ?
2. Яка швидкість основного цифрового каналу?
3. Як здійснюється процедура виявлення помилок у потоці Е1?
4. У чому полягає регенерація цифрових сигналів апаратури ІКМ-30?

5. ПЛЕЗІОХРОННА ЦИФРОВА ІЄРАРХІЯ PDH

5.1. Технологія плезіохронної цифрової ієрархії PDH

Структура транспортної мережі визначає об'єднання й розділення потоків інформації, що передаються, тому використовувані на ній цифрові системи передачі будуються за ієрархічним принципом.

Цифрова система передачі, що відповідає першому рівню ієрархії, називається первинною. Первинні ЦСП уже були розглянуті в попередньому розділі. Такі системи формують первинний цифровий потік E1 або T1.

Кілька каналів E1 або T1 можуть бути об'єднані в один канал з більш високою швидкістю передачі, у так званий вторинний цифровий канал. Кілька вторинних каналів, аналогічним образом, можуть бути об'єднані в ще більш високошвидкісний третинний канал і т.д. Так можна сформувати різні ієрархічні набори швидкостей передачі залежно від кількості цифрових потоків, що подаються на вхід мультиплектора на кожному етапі мультиплексування.

Наприклад, канал E1 утворює так названу первинну групу. Вторинну групу E2 утворять 4 канали E1 із загальною швидкістю 8,448 Мбіт/с, третинну систему E3 – чотири канали E2 (або шістнадцять каналів E1) із загальною швидкістю 34,368 Мбіт/с, а четвіркову групу – чотири канали E3 із загальною швидкістю 139,264 Мбіт/с. Ці системи утворюють європейську плезіохронну цифрову ієрархію, що одержала найбільше поширення. Однак існують ще північноамериканська і японська цифрові ієрархії.

Принцип послідовного мультиплексування каналів наведений на рис. 5.1. Чотири канали E1 мультиплексуються в один канал E2, причому на цьому й наступному рівнях ієрархії мультиплексування здійснюється побітно, а не побайтно, як це мало місце у випадку формування потоку E1. Загальна швидкість чотирьох каналів E1 становить 8,192 Мбіт/с, у той час як повна швидкість E2 дорівнює в дійсності 8,448 Мбіт/с, що говорить про наявність у потоці E2 надлишкових бітів, котрі використовуються для передачі службових команд і синхронізації. Потім чотири канали E2 мультиплексуються в один канал E3 і т.д.

Швидкості цифрових потоків одного й того ж рівня ієрархії, утворені цифровими системами передачі, розташованими на різних вузлах мережі й такими, що мають незалежні джерела синхронізації, можуть трохи відрізнитися в межах припустимої нестабільності частот тактових генераторів. Оскільки ця нестабільність невелика, то поєднувані потоки називають плезіохронними (“майже синхронними”), а ієрархію цифрових систем на основі об’єднання плезіохронних потоків називають плезіохронною цифровою ієрархією PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy).

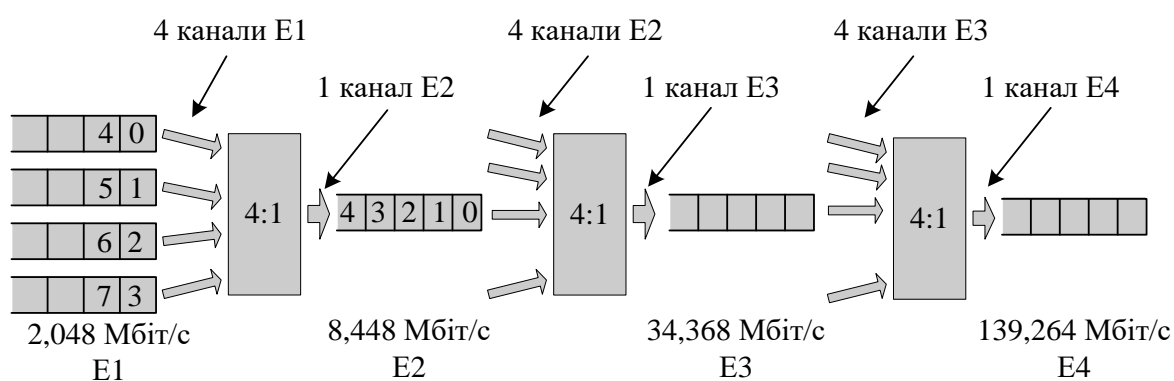


Рис. 5.1. Принцип послідовного мультиплексування каналів

Наявність нестабільності частот задавальних генераторів вимагає застосування процедури узгодження швидкостей цифрових потоків перед їхнім об’єднанням у потік більш високого рівня ієрархії, що було докладно розглянуто в розділі 2. Зазначимо, що процедура узгодження швидкостей помітно ускладнює експлуатацію транспортної мережі в цілому й знижує її якісні показники.

Для правильного демультіплексування такого цифрового потоку, крім синхронізуючої послідовності бітів, він містить додаткові службові біти, у яких передається інформація про узгодження швидкостей. Так, у каналі E2 кількість службової інформації (разом із синхронізуючою послідовністю) становить 32 біти на кадр, частота проходження кадрів, як і в потоці E1, – 8 кГц, що дає підсумкову швидкість потоку $2\,048 \times 4 + 32 \times 8 = 8\,448$ кбіт/с, E3 містить 36 бітів службової інформації, але частота проходження кадрів у нього 16 кГц, що у

два рази вище, ніж у потоці E1 або E2, тому його швидкість дорівнює $8\,448 \times 4 + 36 \times 16 = 34\,368$ кбіт/с, у потоці E4 частота проходження кадрів становить 64 кГц, службових бітів 28, що дає $34\,368 \times 4 + 28 \times 64 = 13\,9264$ кбіт/с.

Схема об'єднання й розділення цифрових потоків європейської плезіохронної цифрової ієрархії показана на рис. 5.2.

Очевидно, що кінцеві станції повинні мати тільки половину показаного обладнання. При виділенні низькошвидкісного потоку (наприклад, зі швидкістю 2,048 Мбіт/с) на проміжній станції остання повинна мати усе обладнання, що зображено на рис. 5.2. У табл. 5.1 наведені швидкісні ряди для плезіохронних цифрових ієрархій.

Фізичний рівень технології PDH підтримує різні види кабелів: виту пару, коаксіальний кабель і волоконно-оптичний кабель. Основним варіантом абонентського доступу до каналів T1/E1 є кабель із двох витих пар. Дві пари потрібні для організації дуплексного режиму передачі даних зі швидкістю 1,544/2,048 Мбіт/с. Коаксіальний кабель завдяки своїй широкій смузі пропускання підтримує канал T2/E2 або 4 канали T1/E1. Для роботи каналів T3/E3, звичайно, використовується або коаксіальний, або волоконно-оптичний кабель.

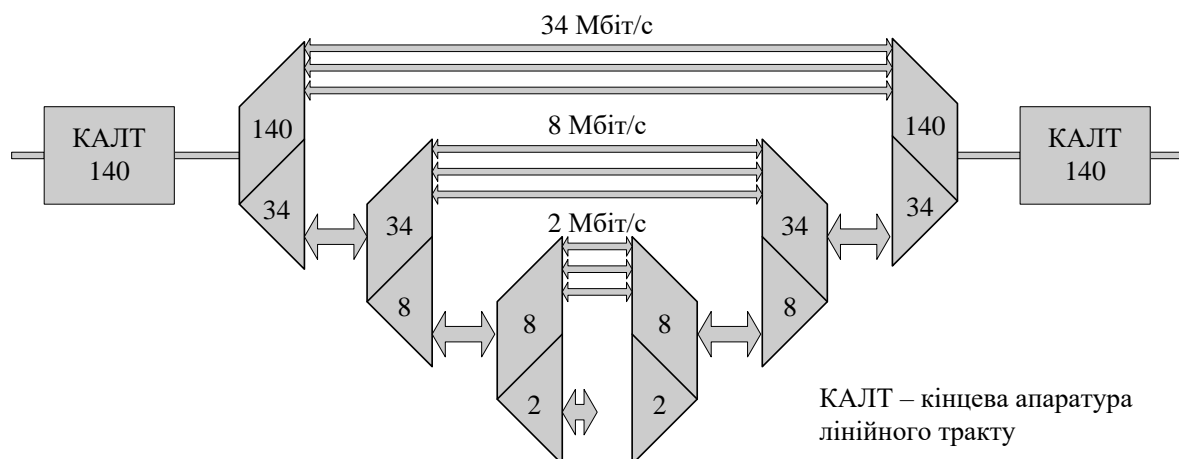


Рис. 5.2. Схема об'єднання цифрових потоків європейської плезіохронної цифрової ієрархії

Таблиця 5.1

Швидкісні ряди плезіохронних цифрових ієрархій

Рівень ієрархії	Назва сигналу	Швидкість, кбіт/с	Схема мультиплексування	Кількість каналів
Північноамериканська ієрархія				
1	T1	1 544	24ОЦК → T1	24
2	T2	6 312	4T1 → T2	96
3	T3	44 736	7T2 → T3	672
4	T3	274 176	6T3 → T3	4 032
Європейська ієрархія				
1	E1	2 048	32ОЦК → E1	30
2	E2	8 448	4E1 → E2	120
3	E3	34 368	16E1 → E3 4E2 → E3	480
4	E4	139 264	4E3 → E4	1 920
5	E5	564 992	4E4 → E5	7 800
Японська ієрархія				
1	DS1	1 544	24ОЦК → T1	24
2	DS2	6 312	4DS1 → DS2	96
3	DS3	32 064	5DS2 → DS3	480
4	DS4	97 728	3DS3 → DS4	1 440
5	DS5	400 352	4DS4 → DS5	5 760

Основні параметри вітчизняних ЦСП плезіохронної цифрової ієрархії наведені в табл. 5.2.

**Основні параметри вітчизняних ЦСП плезіохронної
цифрової ієрархії**

Параметр	1 рівень ієрархії	2 рівень ієрархії	3 рівень ієрархії	4 рівень ієрархії
	ІКМ-30	ІКМ-120	ІКМ-480	ІКМ-1 920
Кількість каналів	30	120	480	1 920
Швидкість вхідних потоків, кбіт/с	–	2 048	8 448	34 368
Швидкість вихідних потоків, кбіт/с	2 048	8 448	34 368	139 264
Максимальна дальність зв'язку, км	85	600	2 500	2 500

**5.2. Структура кадру вторинної системи
мультиплексування ІКМ-120**

Структура кадру вторинної ЦСП ІКМ-120, наведена на рис. 5.3, є типовою для всіх вищих рівнів цієї ієрархії. Цикл передачі має тривалість 125 мкс і складається з 1 056 позицій. Цикл розділений на 4 субцикли, однакових за тривалістю.

Перші вісім бітів першого субциклу зайняті комбінацією 11100110, що являє собою цикловий синхросигнал об'єднаного потоку.

Перші чотири біти другого субциклу зайняті першими символами команд узгодження швидкостей (КУШ), а наступні чотири – сигнали службового зв'язку. Другі й треті символи команд узгодження швидкостей займають перші чотири біти третього й четвертого субциклів.

Біти 5 – 8 третього субциклу використовуються для передачі сигналів даних (два біти), аварійних сигналів (“Авар.”) і сигналів виклику (“Вик.”) по каналу службового зв'язку (по одному біту).

1-й субцикл

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	263	264
Цикловий синхросигнал 11100110								Побітно об'єднані 4 потоки E1				

2-й субцикл

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	263	264
1-і символи КУШ				Службовий зв'язок				Побітно об'єднані 4 потоки E1				

3-й субцикл

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	263	264
2-і символи КУШ				Дані	Авар.	Вик.	Побітно об'єднані 4 потоки E1					

4-й субцикл

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	263	264
3-і символи КУШ				Біти об'єднаних потоків при негативному узгодженні швидкостей				Побітно об'єднані 4 потоки E1				

Рис. 5.3. Структура кадру ЦСП ІКМ-120

На позиціях 5 – 8 четвертого субциклу передаються біти об'єднаних потоків при негативному узгодженні швидкостей. При позитивному узгодженні швидкостей на приймальному боці виключаються біти 9 – 12 четвертого субциклу.

5.3. Основні недоліки плезіохронних систем мультиплексування

Всі варіанти технології PDH мають декілька недоліків.

Одним з основних недоліків є складність операцій мультиплексування й демупльтиплексування. Сам термін плезіохронний, використовуваний для цієї технології, говорить про причину такого явища – відсутність повної синхронності низькошвидкісних цифрових потоків при їхньому об'єднанні в більш високошвидкісні потоки. Асинхронне об'єднання цифрових потоків породжує вставлення одного або декількох бітів для вирівнювання швидкостей вхідних потоків. Тому біти потоку E1 не можуть бути виділені безпосередньо з потоку E3. Спочатку потік E3 повинен бути демупльтиплексований на 4 потоки E2 і тільки після цього можливе виділення з потоку E2 потоків E1.

Другим істотним недоліком технології PDH є відсутність розвинених вбудованих процедур контролю й керування мережею. Службові біти дають мало інформації про стан каналу, не дозволяють її конфігурувати й т.ін. Немає в технології PDH і процедур підтримки відмовостійкості, що дуже корисні для транспортних мереж, на основі яких будуються відповідні міжміські й міжнародні мережі.

Третім недоліком є занадто низькі, за сучасними поняттями, швидкості передачі.

Всі зазначені недоліки усунуті в іншій технології транспортних цифрових мереж, що одержала назву синхронної цифрової ієрархії SDH (Synchronous Digital Hierarchy).

Контрольні запитання

1. У чому полягає принцип послідовного мультиплексування каналів у плезіохронній цифровій ієрархії?
2. Для чого потрібні команди узгодження швидкостей?
3. Що необхідно зробити для виділення потоку E1 з потоку E4?
4. Назвіть основні недоліки систем передачі плезіохронної цифрової ієрархії.

6. СИНХРОННА ЦИФРОВА ІЄРАРХІЯ SDH

6.1. Технологія синхронної цифрової ієрархії SDH

Розглянуті в попередньому розділі недоліки плезіохронної цифрової ієрархії, а також ряд інших факторів, призвели до розроблення в США ще однієї ієрархії – ієрархії синхронної оптичної мережі SONET (Synchronous Optical Network), а в Європі – синхронної цифрової ієрархії SDH (Synchronous Digital Hierarchy), запропонованих переважно для використання на волоконно-оптичних лініях зв'язку з довжиною хвилі 1 310 і 1 550 нм.

Зазначимо, що синхронні цифрові ієрархії SONET і SDH були засновані на однакових принципах. Тому надалі будемо розглядати синхронну цифрову ієрархію SDH.

Передача інформації в системі SDH здійснюється за допомогою так званих синхронних транспортних модулів STM (Synchronous Transport Module) різних рівнів. Модуль STM-1 являє собою перший рівень швидкості передачі SDH. Більш високі рівні SDH кратні швидкості передачі першого рівня (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Швидкості передачі ієрархії SDH

Рівень SDH	Швидкість передачі, Мбіт/с
STM-1	155,520
STM-4	622,080
STM-16	2 488,320
STM-64	9 953,280
STM-256	39 813,120

Основною відзнакою систем передачі SDH від систем PDH є перехід на новий принцип мультиплексування.

У системі SDH здійснюється синхронне мультиплексування/демультиплексування, що дозволяє організувати безпосередній доступ до каналів PDH, що передаються в мережі SDH. Це досить важливе нововведення

призвело до того, що, в цілому, технологія мультиплексування систем SDH стала набагато складнішою, ніж технологія систем PDH, підсилювалися вимоги до системи синхронізації й параметрів якості середовища передавання, а також збільшилася кількість параметрів, істотних для роботи мережі. Як наслідок, методи експлуатації й технологія вимірювань для систем SDH набагато складніші, ніж для систем PDH.

У наш час очевидною тенденцією є перехід від систем PDH до систем SDH. Оператори, що створюють великі мережі, орієнтовані на використання технології SDH, тому що ця технологія дає можливість прямого доступу до первинного каналу E1 зі швидкістю 2 048 кбіт/с, який використовується в мережах цифрової телефонії, ISDN та інших вторинних мережах, за рахунок процедури введення/виведення потоку E1 із трактів всіх рівнів ієрархії SDH.

Порівнюючи технологію SDH з технологією PDH, можна зробити висновки, що технологія SDH:

- передбачає синхронну передачу й мультиплексування. Елементи транспортної мережі SDH використовують для синхронізації один задавальний генератор, що підвищує вимоги до системи синхронізації;
- дозволяє на будь-якому рівні ієрархії SDH виділяти потоки PDH без покрокового демультимплексування;
- використовує стандартні оптичні й електричні інтерфейси, що забезпечує кращу сумісність обладнання різних фірм – виробників;
- забезпечує повну сумісність з існуючими системами PDH і, у той же час, дає можливість майбутнього розвитку систем передачі, оскільки забезпечує канали високої пропускної спроможності для передачі ATM, HDTV і т.д.;
- має значно більше можливостей для управління й діагностики транспортною мережею. Велика кількість сигналів про несправності, що можуть бути переданими по мережі SDH, дає можливість побудови систем управління на основі TMN (Telecommunication Management Network). Технологія SDH дозволяє керувати як завгодно розгалуженою транспортною мережею з одного центру.

Всі перераховані переваги забезпечили широке застосування технології SDH для побудови транспортних мереж.

Як було зазначено вище (табл. 6.1), ієрархія SDH містить у собі кілька рівнів STM. Як приклад використання рівнів у мережі SDH на рис. 6.1 наведена транспортна мережа SDH, що включає кільця магістральної мережі з потоком STM-16, регіональних мереж з потоком STM-4 і міських мереж з потоком STM-1.

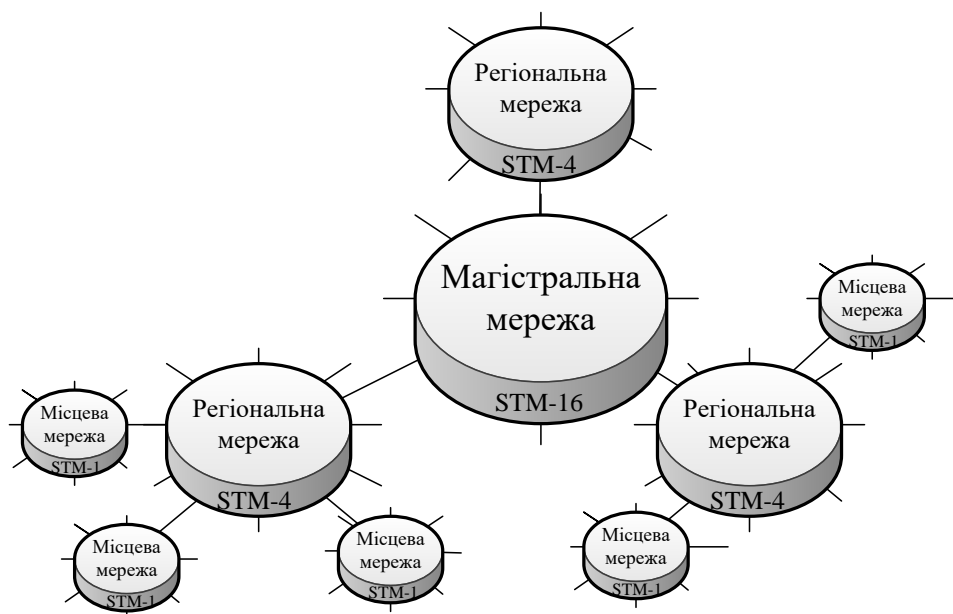


Рис. 6.1. Приклад транспортної мережі, побудованої на основі технології SDH

У процесі впровадження технології SDH на початковому етапі ймовірна поява комбінованих мереж SDH/PDH (рис. 6.2).

Ієрархії PDH і SDH взаємодіють через процедури мультиплексування й демультиплексування потоків PDH у системі SDH. Технологія SDH впроваджується, звичайно, у вигляді “островів”, об’єднаних каналами існуючої транспортної мережі. Надалі “острови” поєднуються в транспортну мережу на основі SDH. У результаті на сучасному етапі необхідно не тільки розглядати технологію SDH, але й орієнтуватися на вивчення комбінованих мереж і процесів взаємодії SDH і PDH.

Важливою особливістю мережі SDH є її поділ на функціональні шари й підшари. Кожний шар нижнього рівня обслуговує шар вищого рівня й має відповідні точки доступу.

Засоби контролю й управління кожного шару спрощують операції зі знаходження й усунення відмов. Незалежність кожного шару дає можливість його модернізації або заміни без необхідності заміни інших шарів.

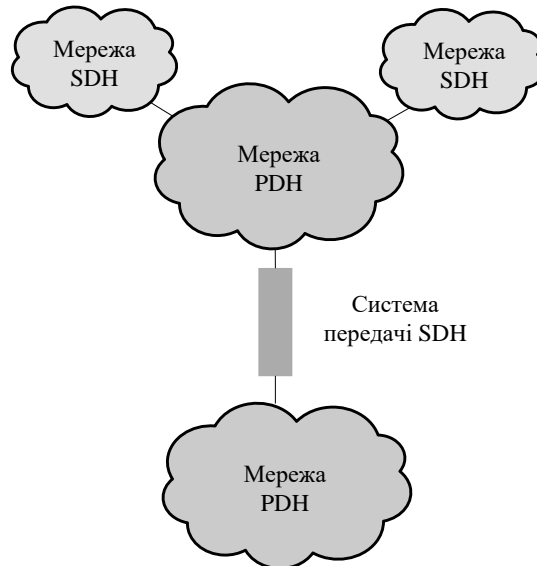


Рис. 6.2. Приклад комбінованої транспортної мережі PDH/SDH

Шар вищого рівня складається з каналів кінцевих користувачів. Групи каналів поєднуються в групові тракти різних порядків (шар середнього рівня), котрі організуються в лінійні тракти, що належать шару нижнього рівня. Нижній шар розділяється на підшар секцій (регенераторних і мультиплексорних) і підшар фізичного середовища передавання. Взаємозв'язок і розміщення шарів зображені на рис. 6.3.

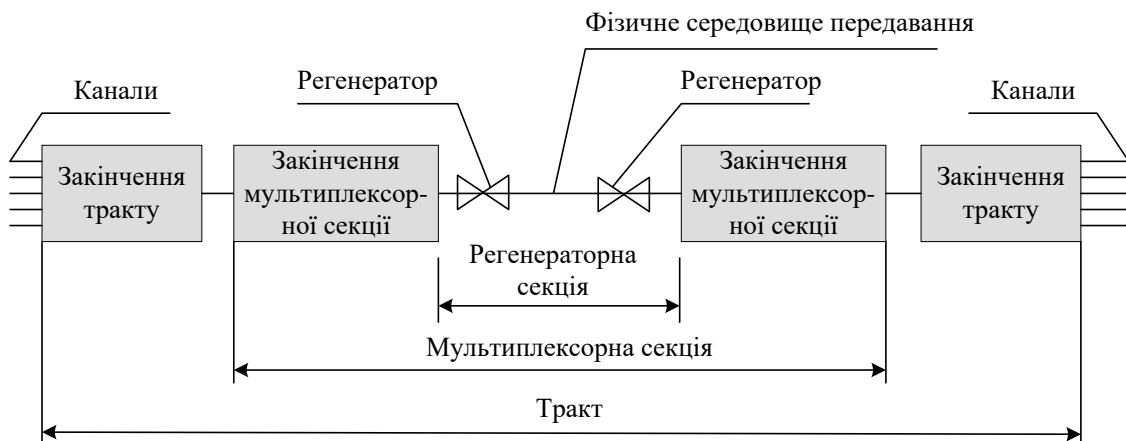


Рис. 6.3. Шари синхронної цифрової ієрархії

З рисунка випливають такі визначення.

Регенераторна секція – це ділянка між пунктами мережі, де відбувається регенерація сигналів SDH. Регенераторна секція важлива для визначення місця ушкодження.

Мультиплексорна секція – це ділянка між пунктами мережі, у яких відбувається мультиплексування, комутація, перемикання на резерв і синхронізація. Мультиплексорна секція важлива для управління мережею.

Тракт – це ділянка між пунктами мережі, де цифрові потоки каналів кінцевих користувачів уперше розміщуються в сигналі SDH до пункту, де цифрові потоки кінцевих користувачів остаточно витягаються з сигналу SDH.

Таким чином, технологія SDH являє собою сучасну концепцію побудови транспортної мережі. У наш час ця концепція домінує на ринку.

6.2. Структура синхронних транспортних модулів STM

Структура STM-1. Перший рівень швидкості цифрового потоку систем SDH визначається модулем STM-1, що має швидкість передачі 155,52 Мбіт/с. Модуль STM-1 складається з 2 430 байтів і, звичайно, зображується у вигляді таблиці з 9 рядків по 270 байтів, як зображено на рис. 6.4. Байти STM-1 передаються, починаючи з лівого верхнього кута зліва направо, зверху вниз. Період повторення STM-1 становить 125 мкс, що відповідає частоті повторення 8 000 Гц. Кожний байт відповідає каналу зі швидкістю передачі 64 кбіт/с.

Модуль STM-1 містить три основні блоки (рис. 6.4): секційний заголовок SOH (Section Overhead), блок навантаження (Payload), покажчик PTR (Pointer).

Блок SOH складається з восьми рядків по 9 байтів. Він містить службову інформацію, у тому числі синхросигнал, байти для обслуговування, контролю й управління. Блок SOH поділяється на заголовок регенераторної секції RSOH (Regenerator SOH) і заголовок мультиплексорної секції MSOH (Multiplex SOH).

Заголовок RSOH використовується для контролю й управління регенераторною секцією. Байти RSOH створюються в

кожному регенераторі й, за необхідності, транслуються в наступну секцію. Байти MSON діють від мультиплексора до мультиплексора й не змінюються регенераторами.

Перші три рядки секційного заголовка SOH містять заголовок регенераторної секції, п'ять останніх – заголовок мультиплексорної секції (рис. 6.4).

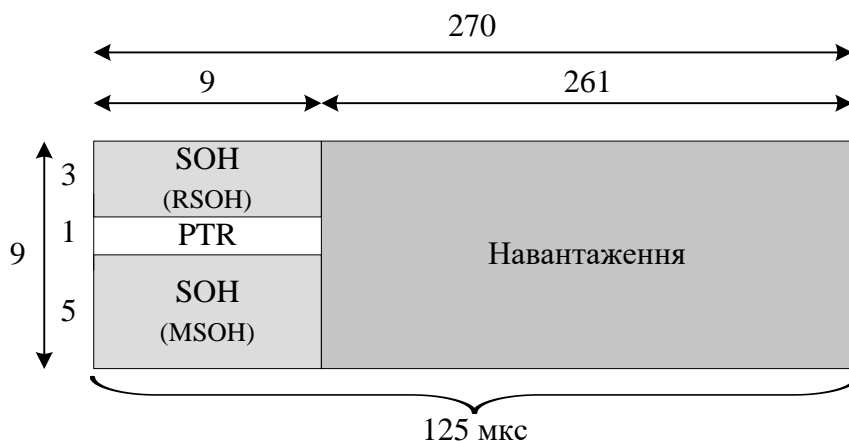


Рис. 6.4. Структура модуля STM-1

Сигнали навантаження (зі швидкістю від 2 до 140 Мбіт/с відповідно до рекомендацій G.702) транспортуються в блоці навантаження розміром 9×261 байт. Сигнали навантаження упаковані в спеціальні віртуальні контейнери відповідно до визначених правил, які будуть розглянуті нижче.

Положення віртуального контейнера в блоці навантаження модуля STM-1 фіксується покажчиком PTR. Це дозволяє одержати можливість доступу до окремих каналів без необхідності повного демультимплексування модуля STM-1. Використовуються три покажчики кожний довжиною 3 байти.

Структура STM-N. Високошвидкісні потоки SDH організуються побайтним мультиплексуванням декількох STM-1 і називаються синхронними транспортними модулями рівня N – STM- N . Швидкість STM- N становить $N \times 155,52$ Мбіт/с. Наприклад, STM-4 – $4 \times 155,52$ Мбіт/с = 622,08 Мбіт/с, STM-16 – $16 \times 155,52$ Мбіт/с = 2,48832 Гбіт/с і т.д.

Структура модуля STM- N відповідає структурі STM-1 з тією відмінністю, що передаються $N \times 9 \times 270$ байтів за 125 мкс. Байти заголовків, покажчиків і навантаження поєднуються в аналогічні

три блоки, як показано на рис. 6.5. У результаті з'являється можливість для аналізу й зміни байтів заголовків без демультимплексування всього модуля.

При мультимплексуванні байти навантаження модулів STM-1 об'єднуються побайтно в навантаження STM-N. Позиція модуля STM-1 у складі STM-N може відрізнитися від вихідної через можливе фазове розходження між STM-1 і STM-N. Тому кожний індивідуальний показчик повинен бути змінений відповідно до цього фазового розходження. Дана операція називається узгодженням показчиків.

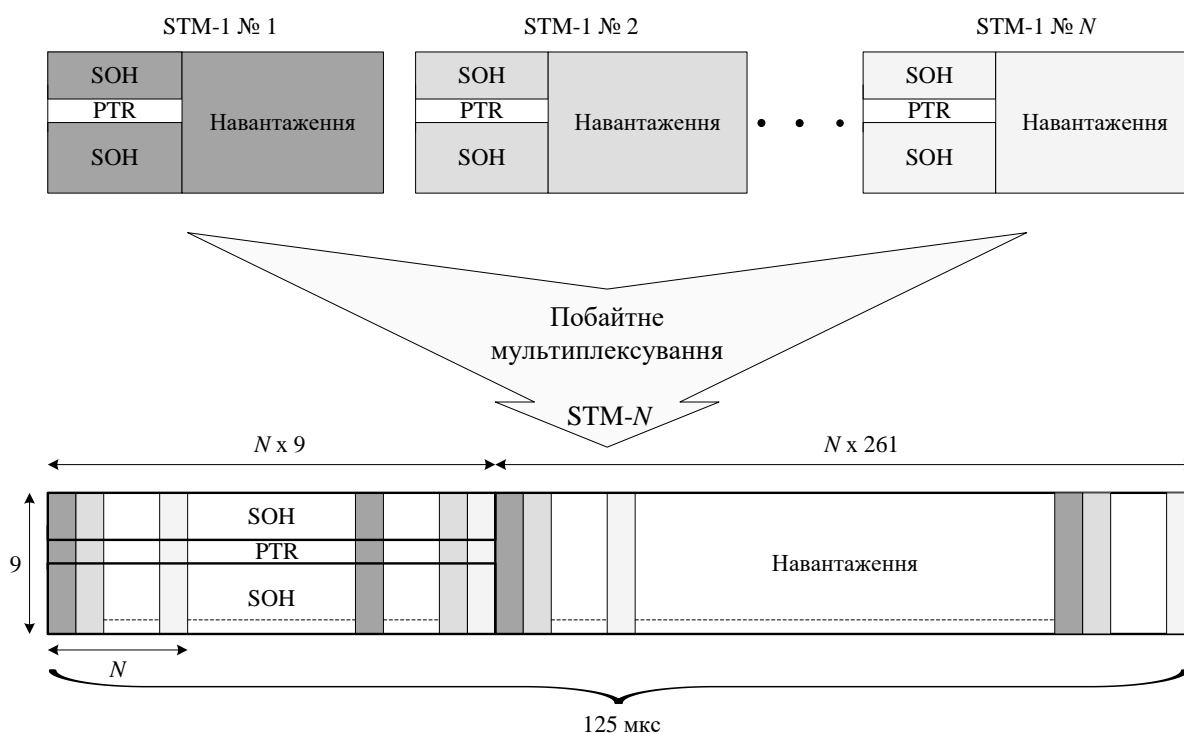


Рис. 6.5. Структура модуля STM-N

Як N модулів STM-1 можуть бути об'єднані в один модуль STM-N, так і M модулів STM-N можуть бути об'єднані в один модуль STM- $M \times N$. При цьому діє таке правило: якщо об'єднуються M модулів STM-N у модуль STM- $M \times N$, то з кожного поєднуваного потоку STM-N береться по N байтів, тобто застосовується N -байтне мультимплексування.

Таким чином, по одному байту від кожного модуля STM-1 об'єднуються в STM-N. Аналогічно об'єднуються по 4 байти від кожного модуля STM-4 при утворенні модуля STM-16.

Перевагою такої процедури є те, що високошвидкісні потоки можуть бути отримані послідовним мультиплексуванням. Наприклад, можна одержати потік STM-16, побайтно об'єднуючи 16 модулів STM-1 (рис. 6.6). Однак STM-16 може бути отриманий і з чотирьох модулів STM-4 (рис. 6.7).

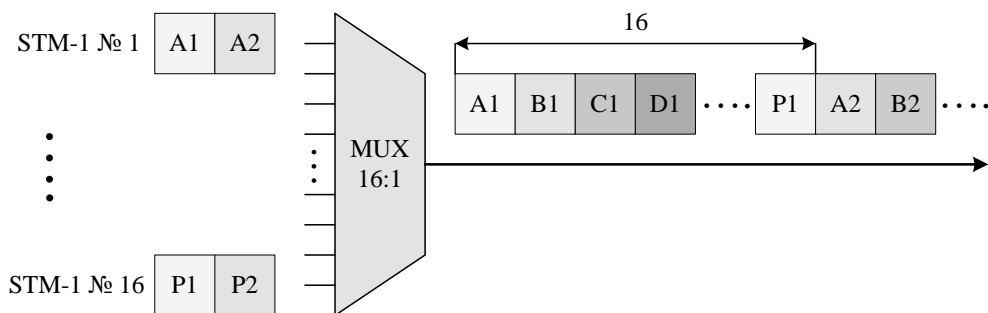


Рис. 6.6. Приклад мультиплексування 16 модулів STM-1 в STM-16

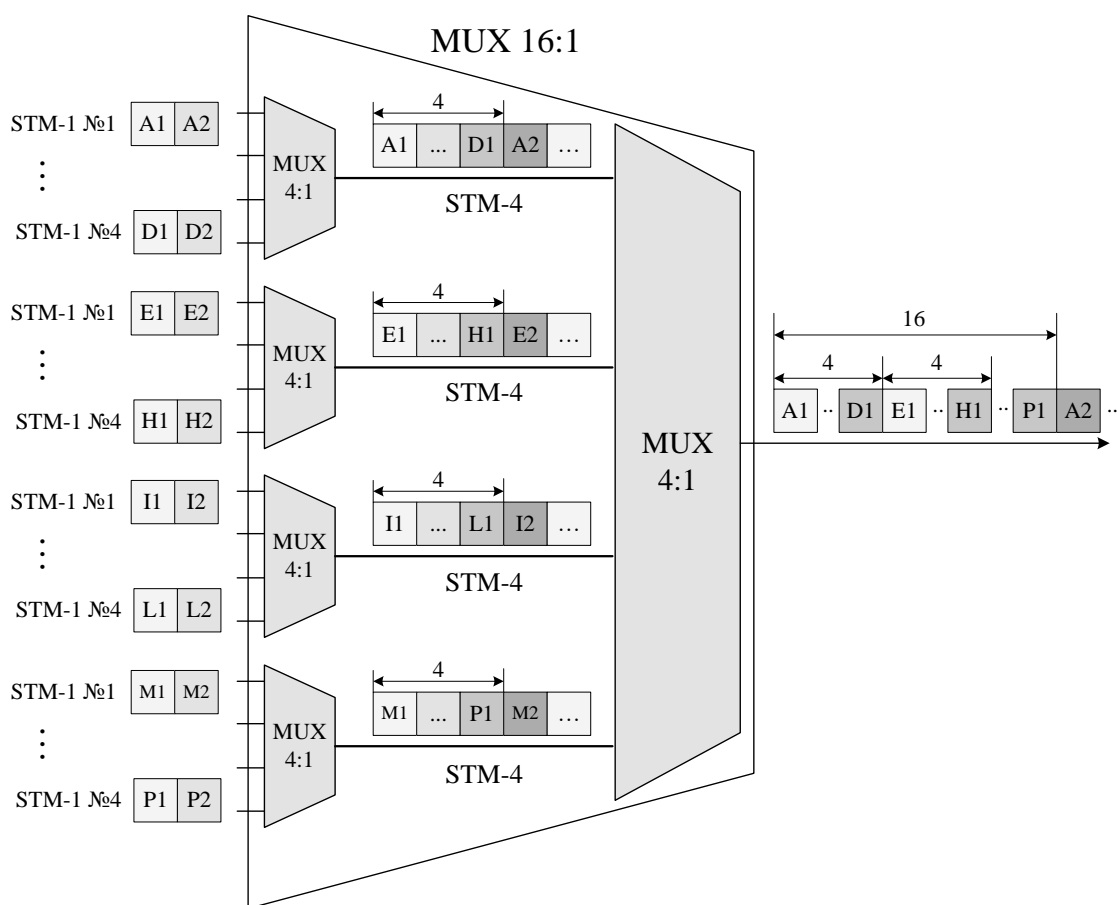


Рис. 6.7. Приклад мультиплексування 4 модулів STM-4 в STM-16

Як видно з рисунка, усередині ієрархії SDH мультиплексування виконується синхронно й побайтно (на відміну від побітного мультиплексування в ієрархії PDH) без процедури вирівнювання швидкостей. У результаті забезпечується основна перевага технології SDH як технології побудови транспортної мережі – можливість завантаження й вивантаження потоків будь-якого рівня ієрархії PDH з будь-якого потоку ієрархії SDH незалежно від швидкості передачі.

6.3. Основні елементи STM-1

Контейнер С. Для того щоб бути переданим у складі модуля STM-1, будь-який цифровий потік повинен бути поміщений у відповідний контейнер.

Термін “контейнер” описує інформаційну структуру синхронної мережі визначеної ємності, необхідну для передачі цифрового потоку. Розмір контейнера вказується в байтах. Прийняті розміри контейнерів відповідають цифровим потокам PDH, що показано в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Розміри контейнерів STM-1

Позначення контейнера	Переданий потік, кбіт/с
C-11	1 544
C-12	2 048
C-2	6 312
C-3	44 736 або 34 368
C-4	139 264

Розміщення плезіохронного цифрового потоку в контейнері здійснюється за допомогою вставлення або видалення окремих бітів або байтів плезіохронного цифрового потоку (узгодження швидкостей або вирівнювання).

Контейнер складається з таких складових.

1. Власне передане навантаження (наприклад, цифровий потік PDH).

2. Фіксованих байт і біт вирівнювання (фіксована вставка). Ці байти (або біти) ніколи не переносять навантаження й використовуються тільки для наближеного збільшення швидкості передачі цифрового потоку до швидкості передачі відповідного контейнера.

3. Біт точного вирівнювання. У цих бітах за необхідності можуть розміщатися біти навантаження або біти вставки.

4. Біти управління вирівнюванням, котрі показують приймачу, що саме в цей момент розташовується в бітах точного вирівнювання: біти навантаження чи біти вставки.

Віртуальний контейнер VC. До кожного контейнера C додається трактовий заголовок РОН (Path Overhead), що виконує функції контролю параметрів якості передачі контейнера. Ця сукупність називається віртуальним контейнером VC (Virtual Container) і передається в мережі як незмінна одиниця (рис. 6.8).

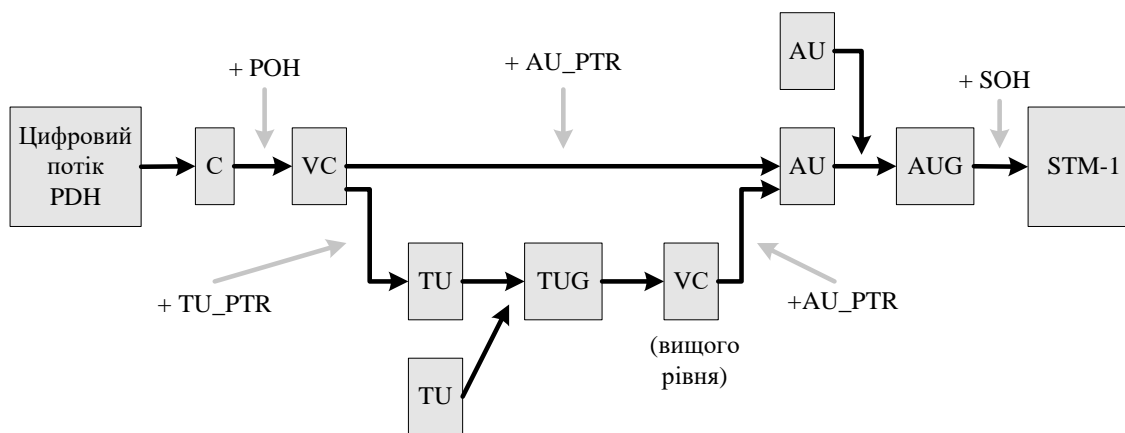


Рис. 6.8. Утворення інформаційних структур SDH

В РОН міститься службова інформація, що дозволяє відслідковувати надійність транспортування контейнера через мережу від джерела до одержувача. Крім того, в РОН міститься службова інформація для цілей контролю й управління мережею. Трактовий заголовок РОН додається при формуванні віртуального контейнера VC і усувається при його розформуванні.

Залежно від розміру VC може транспортуватися в модулі STM-1 поодиноці або може бути об'єднаний з іншими VC у віртуальний контейнер більшого розміру, що потім безпосередньо транспортується в STM-1.

Розрізняють віртуальні контейнери вищого рівня НО (High Order) і нижчого рівня LO (Low Order).

Всі контейнери, передані в складі одного “великого” контейнера, належать до контейнерів нижнього рівня LO. Такими контейнерами (LO) є VC-11, VC-12 і VC-2. Контейнер VC-3 відносять до контейнера нижнього рівня, якщо цей контейнер передається в складі VC-4.

Контейнери, що безпосередньо переносяться в модулі STM-1, належать до контейнерів високого рівня НО. Контейнер VC-4 – контейнер високого рівня (рис. 6.9). Те ж стосується й VC-3, якщо він передається безпосередньо, а не в складі контейнера VC-4.

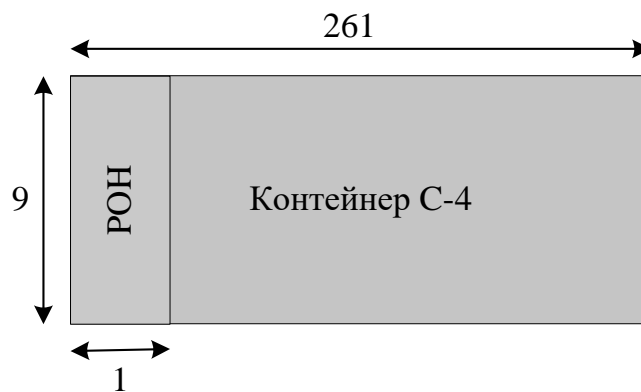


Рис. 6.9. Структура віртуального контейнера VC-4

Адміністративний блок AU. Віртуальні контейнери вищого рівня VC-4 і VC-3 транспортуються безпосередньо в STM-1. У цьому випадку покажчики (блок AU_PTR) у складі STM-1 відображають фазові співвідношення між модулем STM-1 і відповідним віртуальним контейнером. Та частина модуля STM-1, у межах якої може “плавати” віртуальний контейнер, називається адміністративним блоком AU (Administrative Unit). Відповідний покажчик, названий покажчиком адміністративного блока (AU_PTR), розглядається як частина адміністративного блока (рис. 6.8). Три трибайтні покажчики AU містяться в перших 9 байтах четвертого рядка модуля STM-1.

Розрізняють AU-4 і AU-3. У модулі STM-1 можна передавати один адміністративний блок AU-4 або три AU-3.

Передача VC-3 можлива безпосередньо (через AU-3) в STM-1 або через AU-4. У другому випадку три VC-3 повинні бути об'єднані в один VC-4.

Група адміністративних блоків AUG. Кілька адміністративних блоків AU можуть бути побайтно об'єднані в групу адміністративних блоків AUG (AU Group) (див. рис. 6.8). Група адміністративних блоків AUG являє собою інформаційну структуру, що відповідає STM-1 без секційного заголовка SOH. Додаванням SOH до AUG утворюється модуль STM-1. Група адміністративних блоків AUG може складатися з одного AU-4 або трьох AU-3.

Навантажувальний блок TU. За винятком VC-4, всі віртуальні контейнери можуть бути об'єднані у віртуальні контейнери більшого розміру й транспортуватися в модулі STM-1. Віртуальні контейнери меншого розміру можуть плавати усередині віртуального контейнера більшого розміру (вищого рівня). Для урахування фазових співвідношень між віртуальними контейнерами різних рівнів використовуються покажчики, що поміщають у фіксованому місці віртуального контейнера вищого рівня. Навантажувальним блоком TU (Tributary Unit) називається інформаційна структура, використовувана для опису контейнера вищого рівня HO, усередині якого може плавати віртуальний контейнер нижчого рівня LO і відповідні покажчики (TU_PTR) (рис. 6.8). Стандартизовано навантажувальні блоки TU-11, TU-12, TU-2, TU-3.

Група навантажувальних блоків TUG. Перед об'єднанням у контейнер вищого рівня кілька навантажувальних блоків TU побайтно об'єднуються в одну групу. Така група називається групою навантажувальних блоків TUG (Tributary Unit Group) (рис. 6.8). Визначені TUG-2 і TUG-3.

Загальна характеристика елементів STM-1. У табл. 6.3 наведені основні характеристики елементів STM-1, розглянутих вище. На рис. 6.10 показана загальна (SONET/SDH), а на рис. 6.11 – європейська схема перетворень при формуванні STM-N (в якості навантаження виступають цифрові потоки PDH).

Таблиця 6.3

Основні характеристики елементів STM-1

Контейнер розмір, байт швидкість, кбіт/с	C-11 25 1600	C-12 34 2176	C-2 106 6784	C-3 756 48384	C-4 2340 149760
Віртуальний контейнер розмір, байт швидкість, кбіт/с	VC-11 26 1664	VC-12 35 2240	VC-2 107 6848	VC-3 765 48960	VC-4 2349 150336
Навантажувальний блок розмір, байт швидкість, кбіт/с	TU-11 27 1728	TU-12 36 2304	TU-2 108 6912	TU-3 768 49152	
Група навантажувальних блоків розмір, байт швидкість, кбіт/с			TUG-2 108 6912	TUG-3 774 49536	
Адміністративний блок розмір, байт швидкість, кбіт/с				AU-3 786 50304	AU-4 2358 150912
Група адміністративних блоків розмір, байт швидкість, кбіт/с					AUG 2358 150912

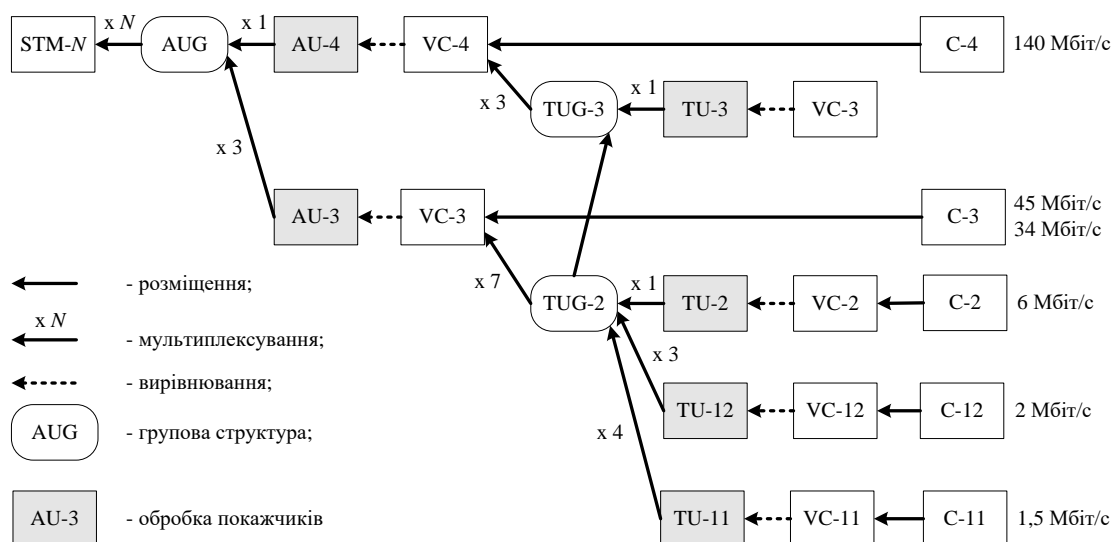


Рис. 6.10. Загальна схема перетворень (SONET/SDH)

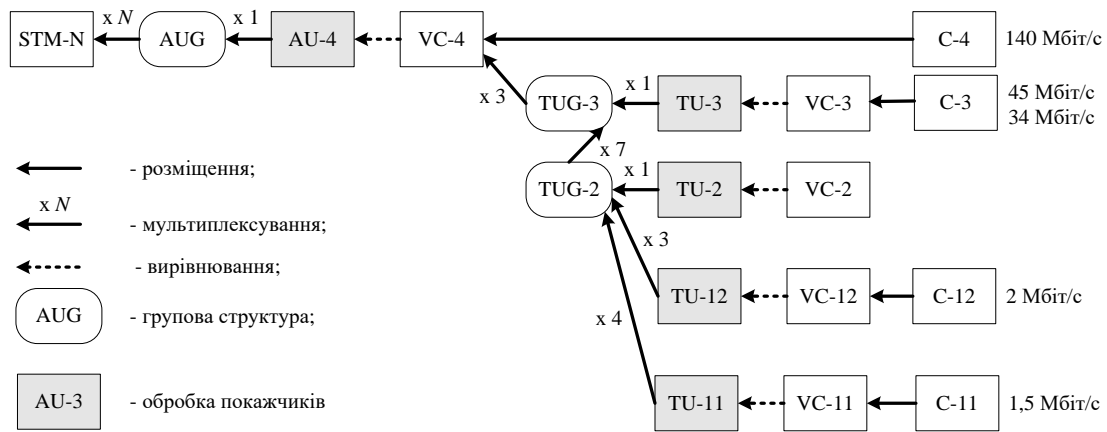


Рис. 6.11. Європейська схема перетворень (SDH)

Зазначимо, що Європейський стандарт не передбачає контейнер C-2, а відповідний йому віртуальний контейнер VC-2 призначений для транспортування цифрових потоків з неієрархічними швидкостями, наприклад, чарунок АТМ.

6.4. Принципи розміщення контейнерів і блоків STM-1

Адміністративний блок AU-4. Один контейнер VC-4 транспортується в AU-4. Блок AU-4 – це синхронна структура, що складається з $9 \times 261 + 9$ байтів (байти навантаження й покажчика адміністративного блока). Вона відповідна модулю STM-1 без секційного заголовка SOH.

Віртуальний контейнер VC-4 розроблений для передачі потоку PDH зі швидкістю 140 Мбіт/с. Віртуальний контейнер VC-4 (9×261 байтів) містить один контейнер C-4 (9×260 байтів) і один стовпець трактового заголовка POH VC-4 (9 байтів). Віртуальний контейнер VC-4 може плавати усередині адміністративного блока AU-4. Покажчик адміністративного блока AU-4 містить позицію (адресу) першого байта трактового заголовка (J1) POH. Покажчик AU-4 може адресувати кожен третій байт модуля STM-1, тому VC-4 повинен починатися тільки з кожного третього стовпця STM-1. На рис. 6.12 зображена позиція VC-4 у модулі STM-1.

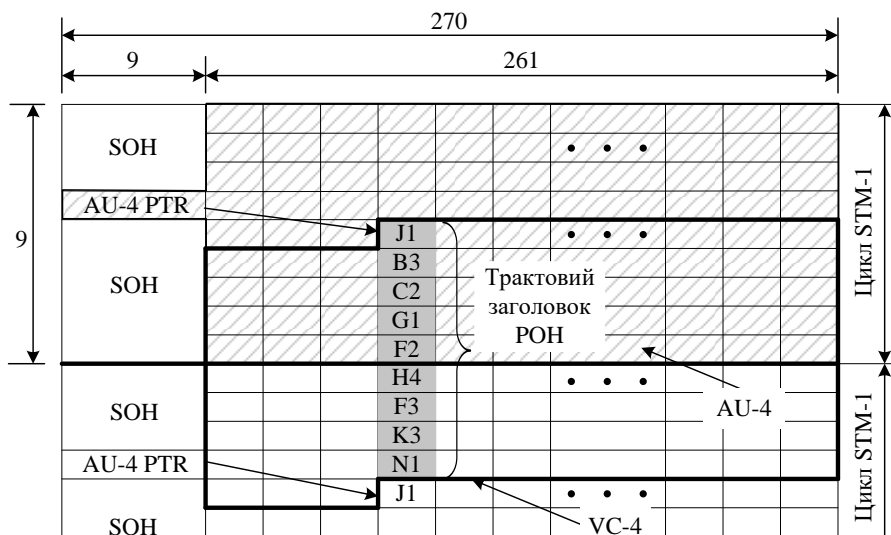


Рис. 6.12. Адміністративний блок AU-4 в STM-1

Адміністративний блок AU-3. У модулі STM-1 можуть безпосередньо передаватися три VC-3 у трьох AU-3. Віртуальний контейнер VC-3 розроблений для передачі одного з потоків PDH зі швидкостями 34 Мбіт/с або 45 Мбіт/с. Віртуальний контейнер VC-3 містить один контейнер C-3 (9×84 байти) і один стовпець трактового заголовка POH VC-3 (9 байтів). Таким чином, VC-3 має розмір 9×85 байтів, як показано на рис. 6.13.

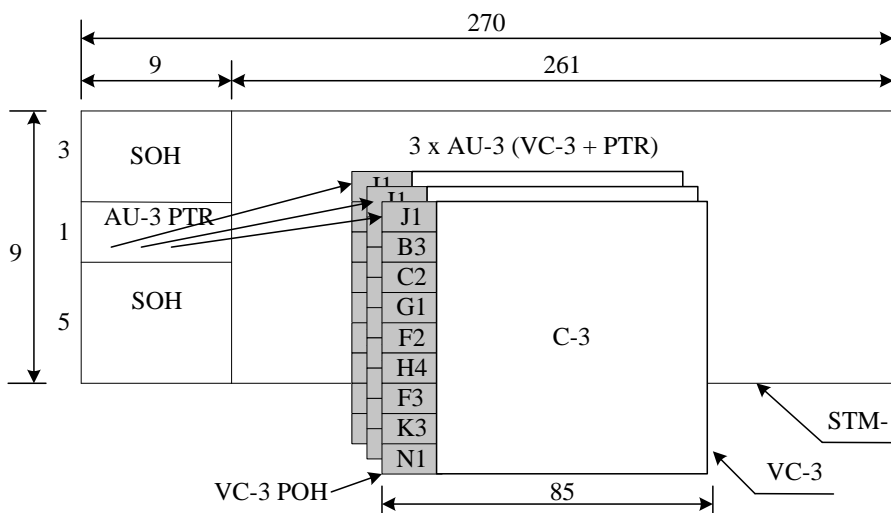
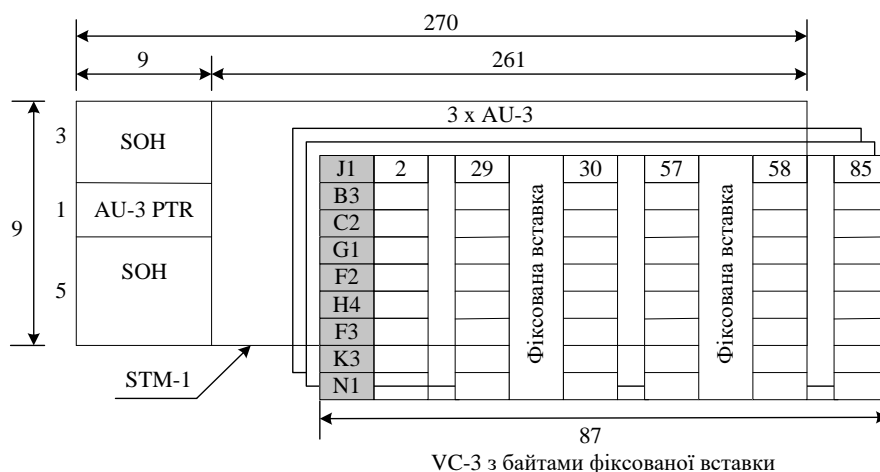


Рис. 6.13. Передача в модулі STM-1 трьох VC-3 у трьох AU-3

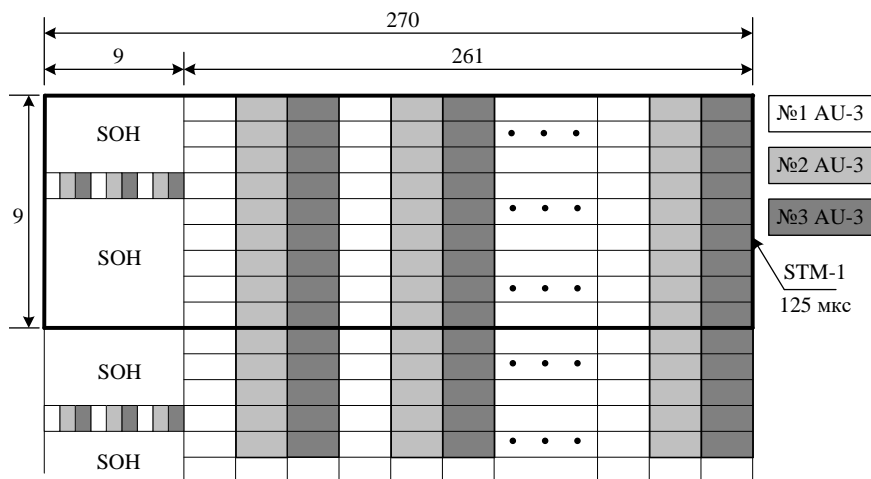
Адміністративний блок AU-3 – це синхронна структура, що складається з $9 \times 87 + 9$ байтів, усередині якої може плавати віртуальний контейнер VC-3. Ємність AU-3 (87 стовпців по 9 байтів) більше, ніж потрібно для передачі VC-3 (85 стовпців по 9 байтів), тому додаються ще два стовпці фіксованої вставки (рис. 6.14, а).

Три адміністративних блоки AU-3 побайтно мультиплексується в модулі STM-1, включаючи трибайтні покажчики AU-3 (рис. 6.14, б).



VC-3 з байтами фіксованої вставки

а



б

Рис. 6.14. Розміщення трьох адміністративних блоків AU-3 у модулі STM-1: а) VC-3 з байтами фіксованої вставки; б) побайтне мультиплексування трьох AU-3

Кожний з цих трьох покажчиків адресує відповідний віртуальний контейнер VC-3, показуючи на перший байт трактового заголовка POH відповідного VC-3.

Група адміністративних блоків AUG в STM-1 – це синхронна структура, що складається з $9 \times 261 + 9$ байтів. Модуль STM-1 утворюється додаванням до AUG секційного заголовка SOH. Група AUG може складатися з одного адміністративного блока AU-4 (рис. 6.15) або з трьох побайтно об'єднаних адміністративних блоків AU-3 (рис. 6.16).



Рис. 6.15. Утворення AUG з одного адміністративного блока AU-4

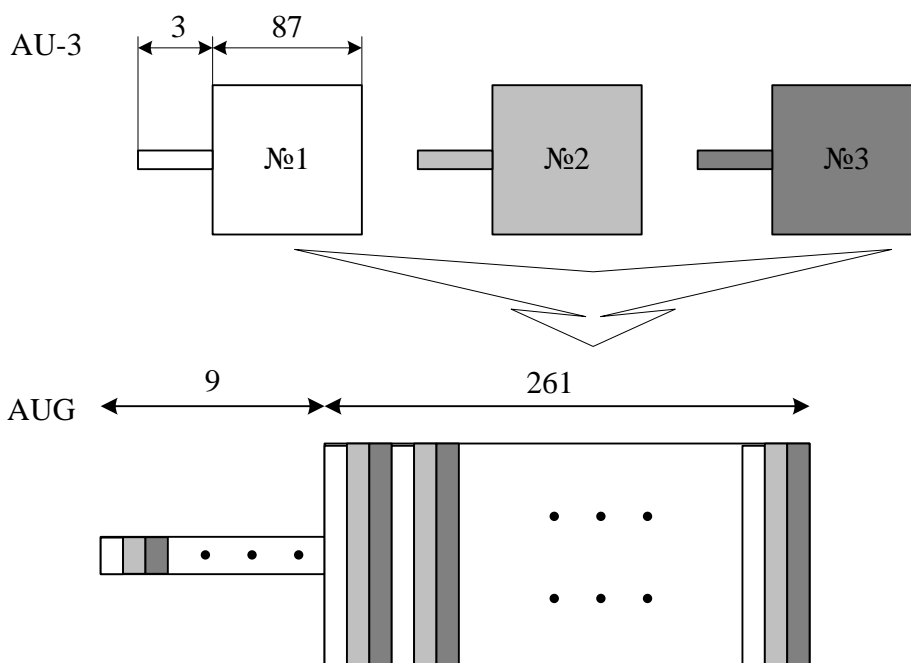


Рис. 6.16. Утворення AUG з трьох адміністративних блоків AU-3

Навантажувальний блок TU-3. Навантажувальний блок TU-3 складається з віртуального контейнера VC-3 і відповідного покажчика (3 байти) і має розмір $9 \times 85 + 3$ байти, як показано на рис. 6.17.

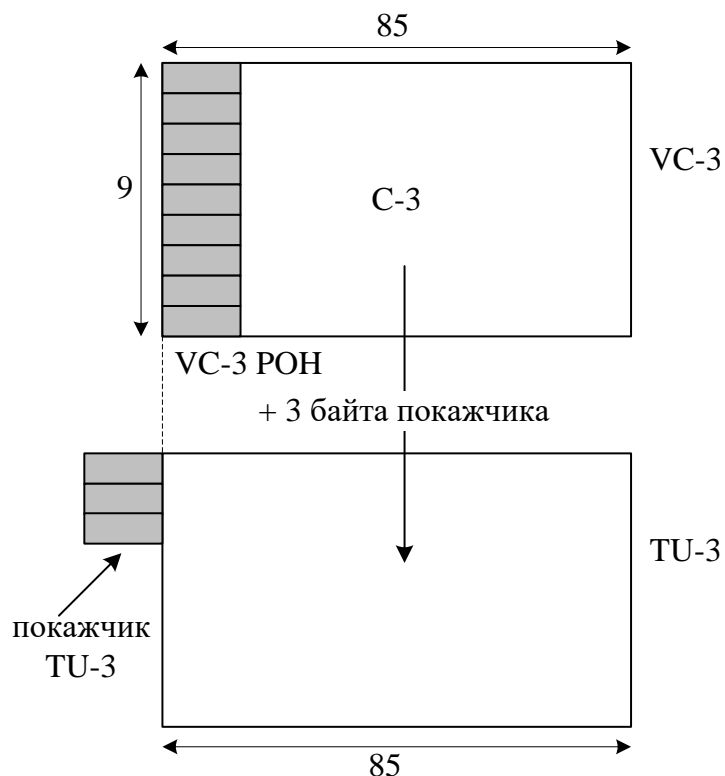


Рис. 6.17. Формування навантажувального блока TU-3

Навантажувальні блоки TU-1 і TU-2. Як зазначалося вище, визначені такі три базових віртуальних контейнери:

- VC-11 – для транспортування цифрового потоку PDH зі швидкістю передачі 1,5 Мбіт/с. Складається з контейнера C-11 (25 байтів) і трактового заголовка РОН VC-11 (1 байт);

- VC-12 – для транспортування цифрового потоку PDH зі швидкістю передачі 2 Мбіт/с. Складається з контейнера C-12 (34 байти) і трактового заголовка РОН VC-12 (1 байт);

- VC-2 – для транспортування цифрового потоку PDH зі швидкістю передачі 6 Мбіт/с. Складається з контейнера C-2 (106 байтів) і трактового заголовка РОН VC-2 (1 байт).

Віртуальні контейнери VC-1x і VC-2 можуть бути передані в VC-4 або VC-3 побайтним мультиплексуванням. При передачі цих контейнерів через VC-3 передбачений шлях тільки через AU-3 (див. схему перетворень SDH).

Показчик VC-1x і VC-2 займає фіксовану позицію у вищій структурі. Навантажувальні блоки TU-1x і TU-2 утворюються додаванням до віртуальних контейнерів VC-1x і VC-2 відповідних показчиків.

На відміну від передачі віртуальних контейнерів вищого рівня (VC-3/4) віртуальні контейнери VC-1x і VC-2 передаються за допомогою надциклу тривалістю 500 мкс.

Група навантажувальних блоків TUG-2. Декілька навантажувальних блоків TU-1x повинні бути об'єднані в одну групу для їхнього транспортування в контейнерах вищого рівня (VC-4 або VC-3). Така група називається групою навантажувальних блоків TUG-2 і організується побайтним мультиплексуванням відповідних TU-1x. У той же час у групі TUG-2 може міститися тільки один навантажувальний блок TU-2.

Таким чином, група навантажувальних блоків TUG-2 може складатися з одного TU-2 або чотирьох TU-11, або трьох TU-12.

Група навантажувальних блоків TUG-3 може складатися або з одного навантажувального блока TU-3, або семи груп навантажувальних блоків TUG-2 при побайтному мультиплексуванні.

Розмір TUG-3 становить 9×86 байтів. Якщо TUG-3 містить один TU-3, то перший стовпець містить трибайтний показчик TU-3 і 6 байтів фіксованої вставки для вирівнювання.

Однак якщо TUG-3 (9×86 байтів) складається із семи TUG-2 (9×12 байтів), то показчик TUG-3 виявляється непотрібним, оскільки індивідуальні показчики в складі TUG-2 адресують конкретні VC-1x або VC-2. У цьому випадку використовується спеціальний трибайтний показчик, що називається індикатором нульового показчика NPI (Null Pointer Indication). Після показчика NPI ідуть 15 байтів фіксованої вставки, які разом з показчиком займають 2 перших стовпці по 9 байтів.

Три TUG-3 можуть бути побайтно об'єднані в один віртуальний контейнер VC-4, що потім буде передаватися в адміністративному блоці AU-4.

6.5. Розміщення цифрових потоків PDH у контейнерах SDH

Як приклад розглянемо процес формування синхронного транспортного модуля STM-1 з потоку E1, наведений на рис. 6.18. Як видно з рисунка, у процесі формування STM-1 до навантаження спочатку додаються біти вирівнювання. До сформованого контейнера C-12 додається трактовий заголовок POH, у результаті чого формується віртуальний контейнер VC-12. До VC-12 додається показник PTR, у результаті чого формується блокувальний блок TU-12. Потім відбувається процедура мультиплексування блокувальних блоків у групи навантажувальних блоків TUG різного рівня аж до формування віртуального контейнера верхнього рівня VC-4. У результаті приєднання до VC-4 показника AU-4_PTR утворюється адміністративний блок AU-4, до якого приєднується секційний заголовок SOH.

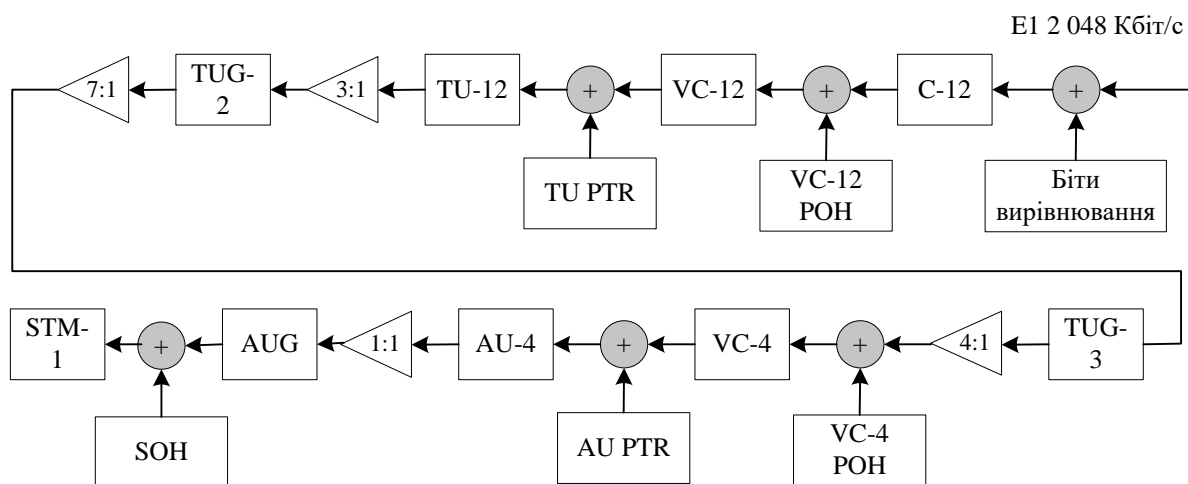


Рис. 6.18. Формування модуля STM-1 з потоку E1

Додавання до віртуального контейнера 1 байта покажчика PTR перетворює VC-12 на навантажувальний блок TU-12. Потім відбувається процедура мультиплексування навантажувальних блоків у групи навантажувальних блоків TUG різного рівня аж до формування віртуального контейнера верхнього рівня VC-4. У результаті приєднання до VC-4 показника AU-4_PTR утворюється адміністративний блок AU-4, до якого приєднується секційний заголовок SOH.

Таким чином, процес завантаження цифрового потоку пов'язаний з використанням процесів узгодження швидкостей (вирівнювання), активністю покажчиків, а також з використанням заголовків POH і SOH. Далі розглянемо процеси вирівнювання швидкості цифрового потоку, що завантажуються.

Розмір контейнера в системі SDH трохи більший за розмір, необхідний для завантаження потоку PDH відповідного рівня

ієрархії з урахуванням максимально припустимої варіації швидкості потоку, що завантажується. Швидкості цифрових потоків ієрархії PDH у відповідних контейнерах наведені в табл. 6.4.

При завантаженні цифрового потоку здійснюється процедура вирівнювання його швидкості зі швидкістю відповідного контейнера методом вставлення або видалення бітів (бітовий стафінг), для чого використовується частина контейнера.

Таблиця 6.4

Швидкості цифрових потоків у контейнерах різних типів

Швидкість цифрового потоку, Мбіт/с	Швидкість цифрового потоку в контейнері, Мбіт/с	Тип контейнера
1,5444	1,600	C-11
2,048	2,176	C-12
6,312	6,784	C-2
34,368	48,384	C-3
44,736	48,384	C-3
139,260	149,760	C-4

Розрізняють два види вирівнювання:

– *плаваюче вирівнювання*, що передбачає не тільки компенсацію різниці у швидкостях цифрових потоків, котрі завантажуються, але і її варіацію. У цьому випадку кількість бітів корисного навантаження в контейнері може гнучко збільшуватися або зменшуватися, даючи можливість завантаження в контейнер потоку з варіацією швидкості. Для забезпечення плаваючого вирівнювання в декількох частинах контейнера передбачаються поля змінного стафінга. Періодично повторювані індикатори стафінга визначають, чи є біт у полі змінного стафінга інформаційним бітом або бітом вирівнювання й підлягає знищенню в процесі вивантаження контейнера;

– *фіксоване вирівнювання*, що передбачає додавання до складу контейнера додаткових бітів для того, щоб його розмір відповідав стандартному. На відміну від процесу плаваючого вирівнювання, де біти стафінга ідентифікуються індикаторами, у процесі фіксованого вирівнювання індикатори не

використовуються. Місце розташування поля стафінга визначено структурою контейнера.

У процесі завантаження й вивантаження цифрового потоку в синхронний транспортний модуль, як правило, використовуються обидва види вирівнювання. Як приклад розглянемо завантаження потоку зі швидкістю 140 Мбіт/с у віртуальний контейнер VC-4 (рис. 6.19).

Як видно з рисунка, у процесі завантаження використовуються процедури фіксованого вирівнювання (біти R) і плаваючого вирівнювання (біти S, індикатори C). Процедура фіксованого вирівнювання використовується частіше й пов'язана з полями X, Y і Z. Процедура плаваючого вирівнювання пов'язана з використанням полів X і Z, причому безпосередньо біти стафінга плаваючого вирівнювання передаються в полі Z. Поле X містить індикатор стафінга, що передається періодично (до появи поля Z індикатор передається 5 разів).

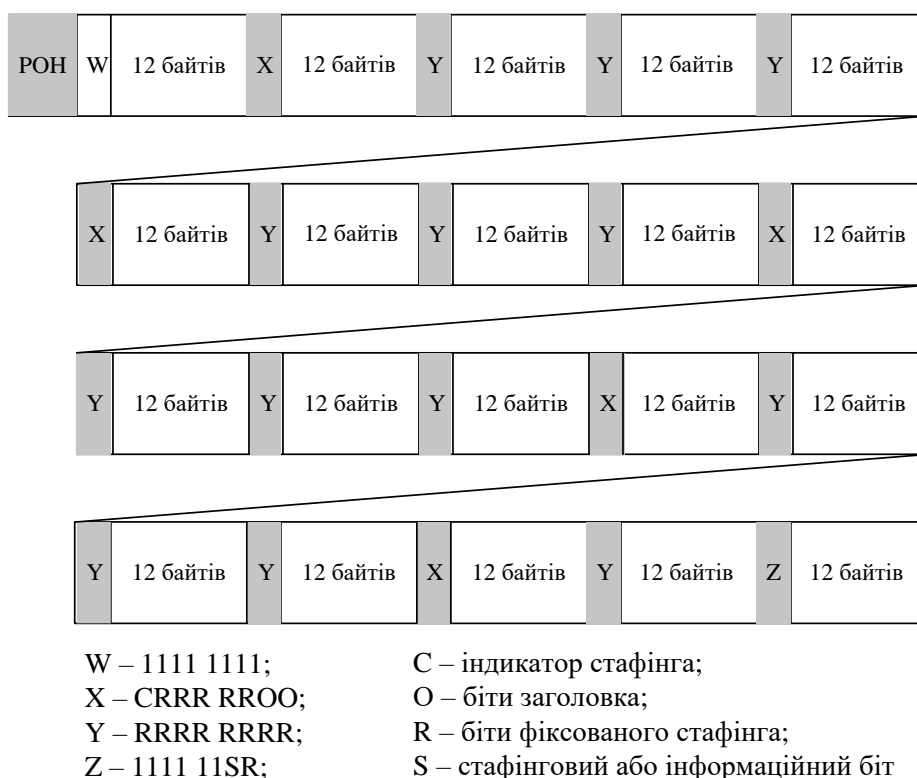


Рис. 6.19. Розміщення бітів цифрового потоку PDH зі швидкістю 140 Мбіт/с в одному рядку віртуального контейнера VC-4

Як другий приклад розглянемо завантаження потоку зі швидкістю 34 Мбіт/с (Е3) у віртуальний контейнер VC-3 (рис. 6.20).

Як видно з рисунка, завантаження потоку Е3 у віртуальний контейнер VC-3 багато в чому аналогічне завантаженню потоку Е4, як показано на рис. 6.19. І в тому, і в іншому випадку використовуються віртуальні контейнери високого рівня – VC-3 і VC-4 відповідно. В обох випадках використовується процедура вирівнювання, причому як фіксованого (біти R), так і плаваючого або змінного (біти S). Для ідентифікації бітів плаваючого вирівнювання використовуються індикатори стафінга (біти C).

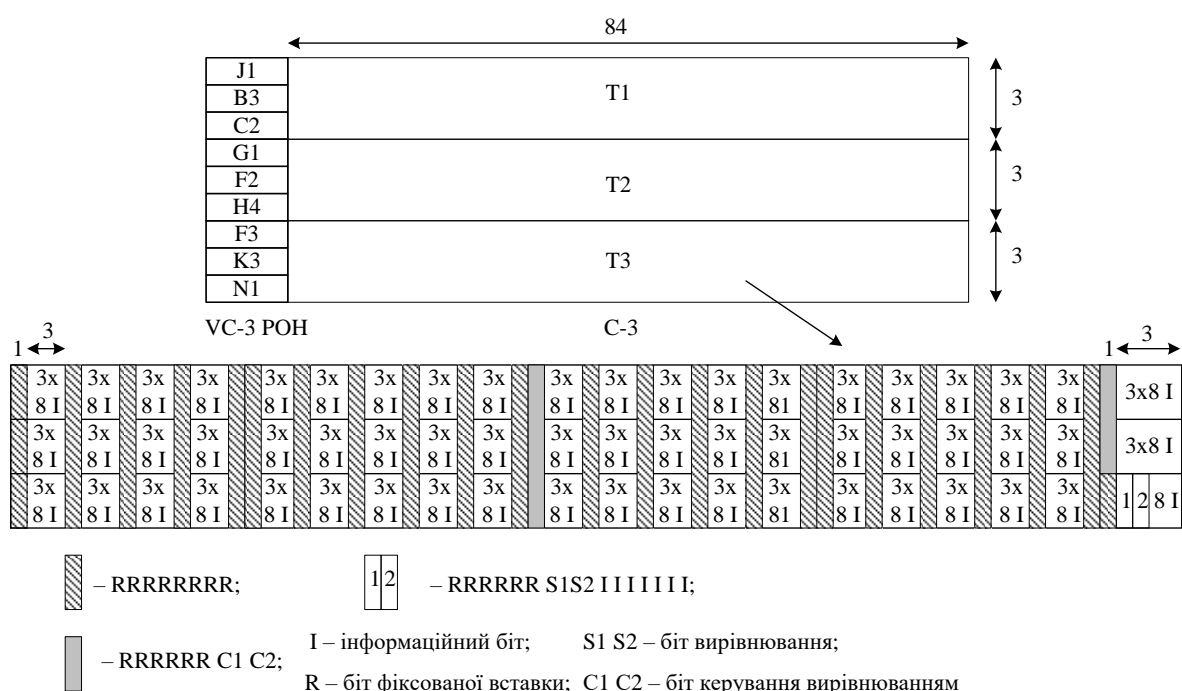


Рис. 6.20. Розміщення бітів цифрового потоку PDH зі швидкістю 34 Мбіт/с у віртуальному контейнері VC-3

Як приклад завантаження віртуального контейнера низького рівня розглянемо завантаження потоку Е1 зі швидкістю 2 Мбіт/с. У цьому випадку можуть використовуватися різні схеми розміщення, залежно від того, чи є первісний потік синхронним або асинхронним (плезіохронним) щодо мережі. Визначені асинхронна й байт-синхронна схеми розміщення.

Для обох схем розміщення віртуальний контейнер VC-12 може плавати в межах TU-12. Показчик TU-12 – TU-12_PTR

містить адресу заголовка РОН контейнера VC-12. Навантажувальний блок TU-12 передається за надцикл тривалістю 500 мкс (4 x 125 мкс).

Розглянемо випадок асинхронного завантаження потоку E1 у контейнер VC-12. На рис. 6.21, *a* наведена побайтна структура завантаженого у віртуальний контейнер VC-12 заголовка РОН (V5, J2, Z6, Z7). Як видно з рисунка, при завантаженні використовуються процедури фіксованого й плаваючого вирівнювання.

При передачі байт-синхронного потоку кожний з каналів зі швидкістю 64 кбіт/с займає один байт модуля STM-1. У цьому випадку при відповідній обробці показчиків можливе безпосереднє введення/виведення каналів зі швидкістю 64 кбіт/с безпосередньо з STM-1. Однак у плаваючому режимі необхідна обробка двох показчиків (AU_PTR і TU_PTR). Розміщення бітів для байт-синхронного потоку зображено на рис. 6.21, *б*.

6.6. Трактовий і секційний заголовки. Показчики

Трактовий заголовок РОН виконує функції контролю параметрів якості передачі контейнера. Він супроводжує контейнер по маршруту проходження (тракту) від точки формування до точки розформування. Структура й розмір заголовка РОН визначаються типом відповідного контейнера. Отже, розрізняють два основних типи заголовків:

- трактовий заголовок високого рівня HO-РОН (High-Order РОН), що використовується для контейнерів VC-4/VC-3;
- трактовий заголовок низького рівня LO-РОН (Low-Order РОН), що використовується для контейнерів VC-3/VC-2/VC-1.

Розглянемо докладно структуру трактового заголовка високого рівня HO-РОН, наведену в табл. 6.5.

Поле ідентифікатора маршруту (J1) передається в 16-ти послідовних циклах і складається з 15-байтової послідовності й 1 байта перевіркою суми CRC-7 для виявлення помилок. Ідентифікатор маршруту являє собою послідовність ASCII символів у форматі, що відповідає ІТУ-Т E.164, і використовується для того, щоб термінал, що приймає,

одержував підтвердження про зв'язок з визначеним передавачем (ідентифікація точки доступу до маршруту).

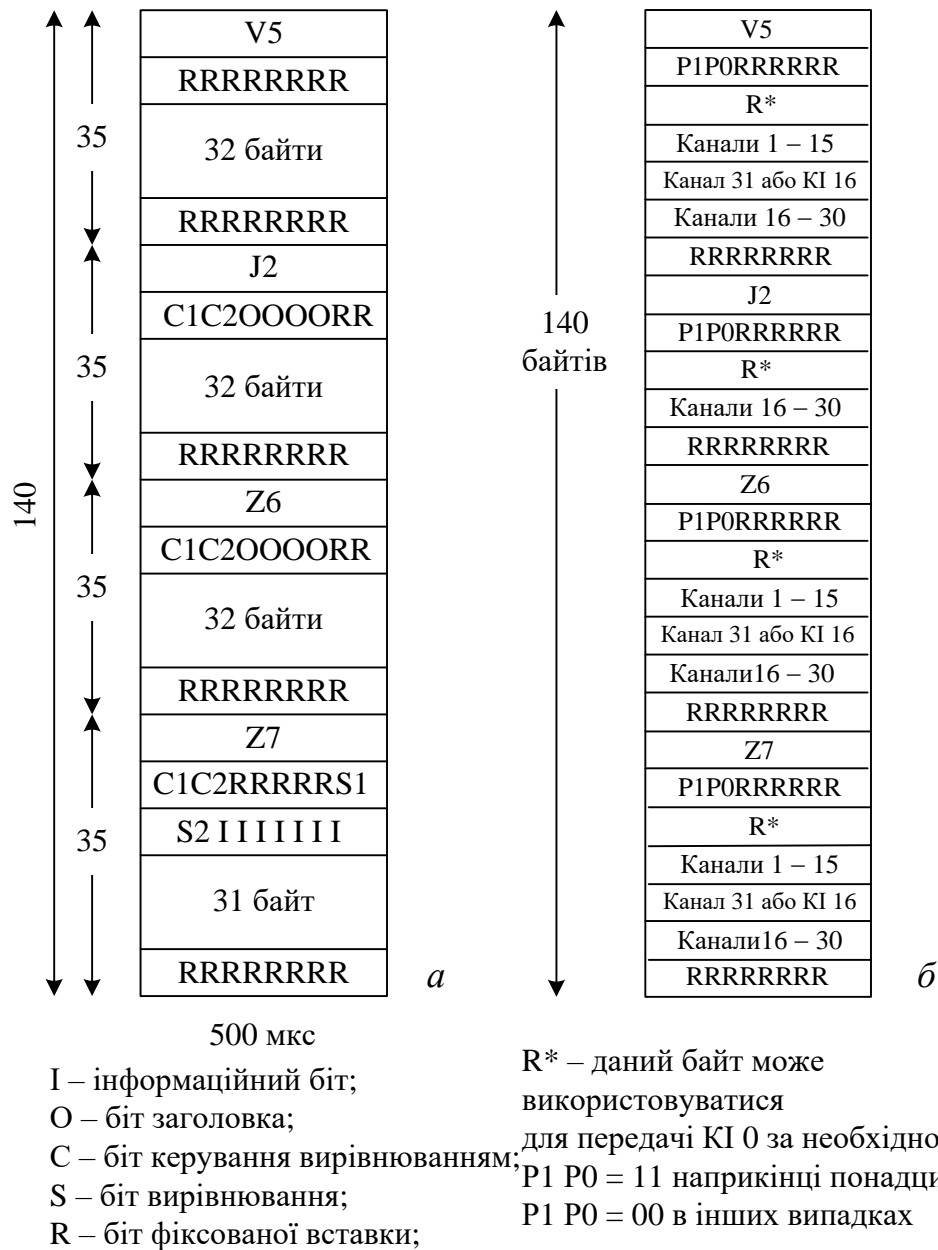


Рис. 6.21. Завантаження потоку E1 зі швидкістю 2 Мбіт/с у віртуальний контейнер VC-12: а) асинхронне; б) синхронне

Байт V3 використовується для контролю парності з метою виявлення помилок на рівні віртуального контейнера VC (процедура ВІР-8). Більш докладно про це буде сказано нижче.

Байт C2 визначає тип корисного навантаження, що передається в контейнері. Основні типи корисного навантаження

визначені в ІТУ-Т G.707. Значення байта С2 і відповідні типи навантаження наведені в табл. 6.6.

Байт G1 містить інформацію про стан приймального обладнання й помилки, виявлені на приймальному боці. Установлюється в РОН, що передається у зворотному напрямку (від приймального до передавального обладнання).

Таблиця 6.5

Структура трактового заголовка високого рівня НО - РОН

J1	Ідентифікатор маршруту
V3	Моніторинг якості передачі
C2	Показчик типу корисного навантаження
G1	Стан тракту
F2	Сигнали обслуговування
H4	Індикатор надциклу
F3	Автоматичне перемикання
K3	Підтвердження помилок передавання
N1	Моніторинг взаємного з'єднання – ТСМ (Tandem Connection Monitoring)

Біти 1 – 4 байта G1 призначені для передачі інформації про помилки, виявлені за допомогою байта V3 – FEBE (Far End Block Error). Припустимі значення від 0 до 8. Біт 5 використовується для сигналізації про аварії на дальньому кінці тракту – FERF (Far End Receive Failure). Повертається у зворотному напрямку й установлюється в активний стан 1 у випадку зникнення сигналу, синхронізації або неправильного з'єднання трактів. Біти 6 – 8 не використовуються.

Байти F2 і F3 використовуються оператором для вирішення внутрішніх завдань обслуговування системи передачі й утворюють виділений службовий канал.

Байт H4 є показчиком і використовується при організації надциклів.

Байт K3 є індикатором автоматичного перемикання – APS (Automatic Protection Switching). Він використовується для оперативного резервування в системі SDH і забезпечує передачу

команди переходу на резерв. Більш докладно механізми резервного перемикання будуть розглянуті нижче.

Байт N1 – байт моніторингу взаємного з'єднання TCM (Tandem Connection Monitoring). Необхідність введення процедури моніторингу взаємного з'єднання була пов'язана з тим, що байт V3 забезпечує моніторинг якості передачі тільки для всього наскрізного тракту. Однак якщо тракт передачі складається з декількох секцій, що належать різним операторам, то потрібен не тільки наскрізний, але й посекційний моніторинг параметрів якості. Тому була введена додаткова процедура TCM. Відповідно до цієї процедури мережний вузол забезпечує контроль парності по HO-POH і LO-POH (контроль VIP-N), а потім передає інформацію про помилки попередньому вузлу в байті моніторингу взаємного з'єднання.

Таблиця 6.6

Значення покажчика типу корисного навантаження

Бінарний вид	HEX	Значення
00000000	00	тракти VC ще не встановлені (цей стан використовується для запобігання помилкової сигналізації про аварії)
00000001	01	тракти VC установлені, але конкретний тип навантаження ще не визначений
00000010	02	структура TUG
00000011	03	синхронний TU- <i>n</i>
00000100	04	асинхронне завантаження 34 або 45 Мбіт/с
00010010	12	асинхронне завантаження 140 Мбіт/с
00010011	13	чарунки ATM
00010100	14	завантаження MAN (DQDB)
00010101	15	завантаження FDDI
11111110	FE	тестовий сигнал
11111111	FF	сигнал індикації тривоги тракту VC-AIS (Alarm Indication Signal) у випадку підтримки моніторингу взаємного з'єднання (використання байта N1 трактового заголовка)

Секційний заголовок SOH. Розглянемо більш детально склад секційного заголовка SOH (рис. 6.22).



Рис. 6.22. Структура секційного заголовка SOH

Байти A1, A2 призначені для циклової синхронізації (A1 = 11110110, A2 = 00101000). Синхросигнал із всіх модулів STM-1 включається до складу модуля STM-N. Відповідно в STM-4 для синхросигналу передбачено $4 \times 6 = 24$ байти, а в STM-16 – $16 \times 6 = 96$ байтів.

Байти D1 – D12 утворюють канал передачі даних, що може використовуватися вбудованими системами самодіагностики й системою TMN. Наприклад, використання службового каналу передачі даних, утвореного байтами D, дозволяє виконувати реконфігурування мережі з єдиного центру.

Байт J0 – ідентифікатор маршруту регенераторної секції. Він виконує ті ж функції, що й байт J1 у трактовому заголовку POH. Структура J0 аналогічна структурі J1 у POH.

Байт F1 зарезервований для використання оператором мережі. Може використовуватися для створення каналу передачі даних управління.

Байти K1 і K2 забезпечують управління резервним перемиканням і оперативною реконфігурацією мережі.

Байт S1 визначає параметр якості джерела синхронізації синхронного транспортного модуля, що надходить. Інформація про параметр якості джерела синхронізації передається комбінацією бітів 5 – 8 у складі байта S1. Можливі значення параметрів якості джерела синхронізації наведені в табл. 6.7.

Передача інформації про якість джерела синхронізації дозволяє уникнути проблем, пов'язаних з порушенням синхронізації. Оскільки система передачі SDH є синхронною, то параметри синхронізації надзвичайно важливі. Зі збільшенням розгалуженості мережі й використанням резервування підвищується ймовірність виникнення проблем, пов'язаних із системою синхронізації. Так, наприклад, у процесі реконфігурування мережі або гнучкого перемикавання на резерв система синхронізації повинна також реконфігуруватися. Передача інформації про якість джерела синхронізації конкретного вузла дає можливість автоматичного регулювання процесів у системі синхронізації. Наприклад, сигнал від джерела синхронізації поганої якості не використовується для синхронізації від нього інших вузлів.

Таблиця 6.7

Можливі значення параметра джерела синхронізації

Біти 5 – 8 байта S1	Значення параметра
0010	первинне джерело синхронізації (G.811) – PRC (Primary Reference Clock)
0100	вторинне джерело синхронізації транзитного вузла (G.812) – SSU-A (Synchronization Supply Unit – A)
1000	вторинне джерело синхронізації кінцевого вузла (G.812) – SSU-B (Synchronization Supply Unit – B)
1011	джерело синхронізації обладнання SDH (G.813) – SEC (Synchronization Equipment Clock)
1111	не використовувати для цілей синхронізації (наприклад, при виникненні аварії у вузлі мережі)
0000	якість джерела синхронізації не визначена (існуюча мережа синхронізації)

Байти E1 і E2 призначені для організації службового зв'язку, у тому числі й голосового. Забезпечується передача мови в регенераторній секції (байт E1) або в мультиплексорній секції (байт E2).

Байт B1 використовується для виявлення помилок на регенераторній секції. Виявлення помилок здійснюється відповідно до процедури контролю парності ВІР-8, що виконується для всього скрембльованого синхронного транспортного модуля. Результатом є 8-бітне кодове слово, що міститься в байті B1 наступного модуля STM до скремблювання.

Байти B2 призначені для контролю помилок на мультиплексорній секції. Результатом виконання процедури ВІР-24 є 24-бітне кодове слово, що передається трьома байтами B2 модуля STM-1. У модулі STM-1 процедура ВІР-24 виконується для всього вмісту нескрембльованого модуля за винятком перших трьох рядків SOH (RSOH), а результат передається в байтах B2 нескрембльованого наступного модуля. Перші три рядки SOH (RSOH) не записуються в B2, щоб можливі зміни RSOH регенераторами не впливали на B2.

Байт M1 використовується для передачі повідомлення про помилки, виявлені за допомогою коду ВІР-24 (з використанням байтів B2) у секції мультиплексування на приймальному боці, назад на передавальний бік. Можливі значення для STM-1 від 0 до 24, для STM-4 від 0 до 96.

Показчики розміщуються на фіксованих позиціях у кадрі й містять адресу першого байта віртуального контейнера (перший байт трактового заголовка POH) у кадрі.

Показчики виконують дві основні функції:

- забезпечення прямого доступу до навантаження;
- забезпечення синхронізації навантажувальних блоків і кадрів (структур) вищого рівня.

Перша функція показчиків є найбільш важливою, оскільки саме з нею пов'язана основна перевага технології SDH – доступ до індивідуальних каналів без необхідності покровоного мультиплексування/ демультимплексування цифрових потоків.

Доступ до віртуальних контейнерів вищого рівня можливий безпосередньо після обробки показчика AU_PTR. Для доступу

до віртуальних контейнерів нижчого рівня необхідно обробити додатковий показчик TU_PTR (рис. 6.23).

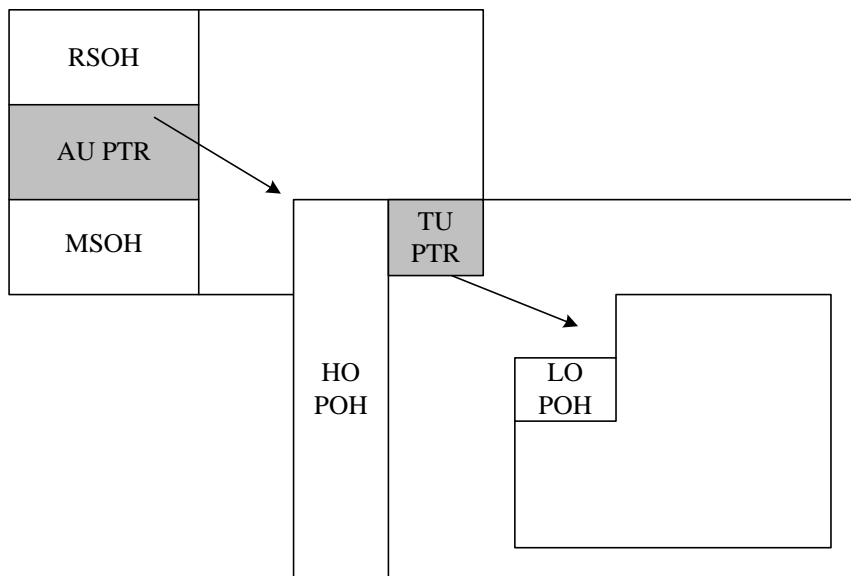
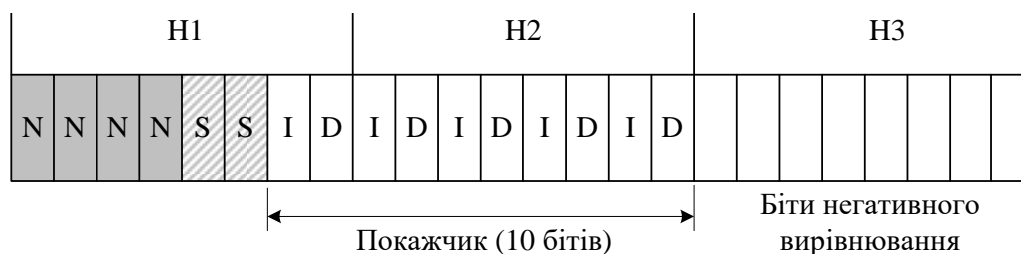


Рис. 6.23. Механізм організації прямого доступу до навантаження за допомогою показчиків

Існують три типи показчиків:

- показчик AU;
- показчик TU-3;
- показчик TU-1х, TU-2.

Структура показчиків перших двох типів наведена на рис. 6.24. У байтах Н1 і Н2 містяться: значення показчика (адреса трактового заголовка РОН); прапор нових даних; біти точного вирівнювання; тип показчика (AU-3, AU-4 і TU-3). Байт Н3 призначений для розміщення інформаційних бітів при негативному вирівнюванні.



N – прапор нових даних; S – біти ідентифікації;
D – декриментні біти; I – інкриментні біти

Рис. 6.24. Загальна структура показчиків AU-х і TU-3

Структура показників TU-1x, TU-2 зображена на рис. 6.25.

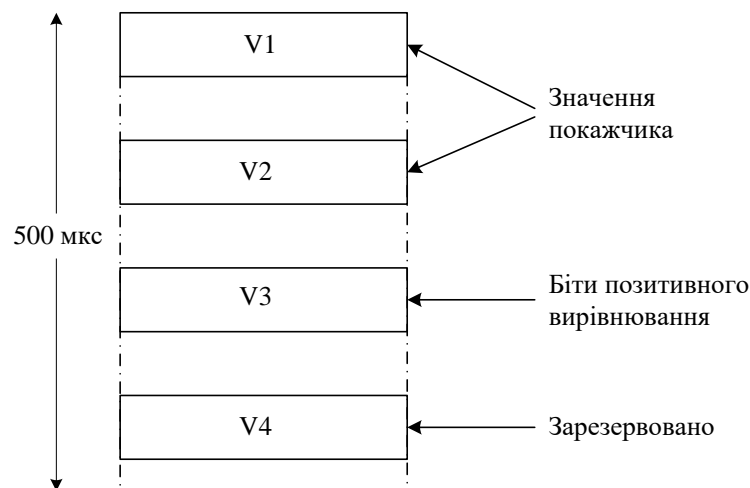


Рис. 6.25. Загальна структура показників TU-1x і TU-2

При розміщенні віртуального контейнера в кадрі вищого рівня необхідно компенсувати розходження швидкостей передачі й початкових фаз за допомогою побайтного позитивного, нульового й негативного вирівнювання. Наприклад, це необхідно при спільній обробці в одному мережному вузлі декількох несинхронізованих з мережею модулів STM-1. Так, при об'єднанні декількох STM-1 в один модуль STM-N необхідно адаптувати контейнери вищого рівня VC кожного з STM-1 до кадру STM-N.

Нульове вирівнювання. Якщо впроваджуваний у кадр вищого порядку віртуальний контейнер VC синхронний, то вирівнювання не потрібно. Фазове розходження між кадром і початком віртуального контейнера VC (що фіксується в значенні показника) залишається незмінним. Це називається нульовим вирівнюванням.

Позитивне вирівнювання. Якщо швидкість передачі віртуального контейнера VC нижче швидкості передачі кадру, то за необхідності для вирівнювання швидкостей на визначених позиціях кадру передаються 3 байти вирівнювання (вони не містять інформації). Це відповідає операції позитивного вирівнювання. Початок віртуального контейнера VC (перший байт РОН) затримується на 3 байти відносно кадру. Значення

показчика має бути збільшене на 1. Приклад позитивного вирівнювання для AU-4 наведений на рис. 6.26.

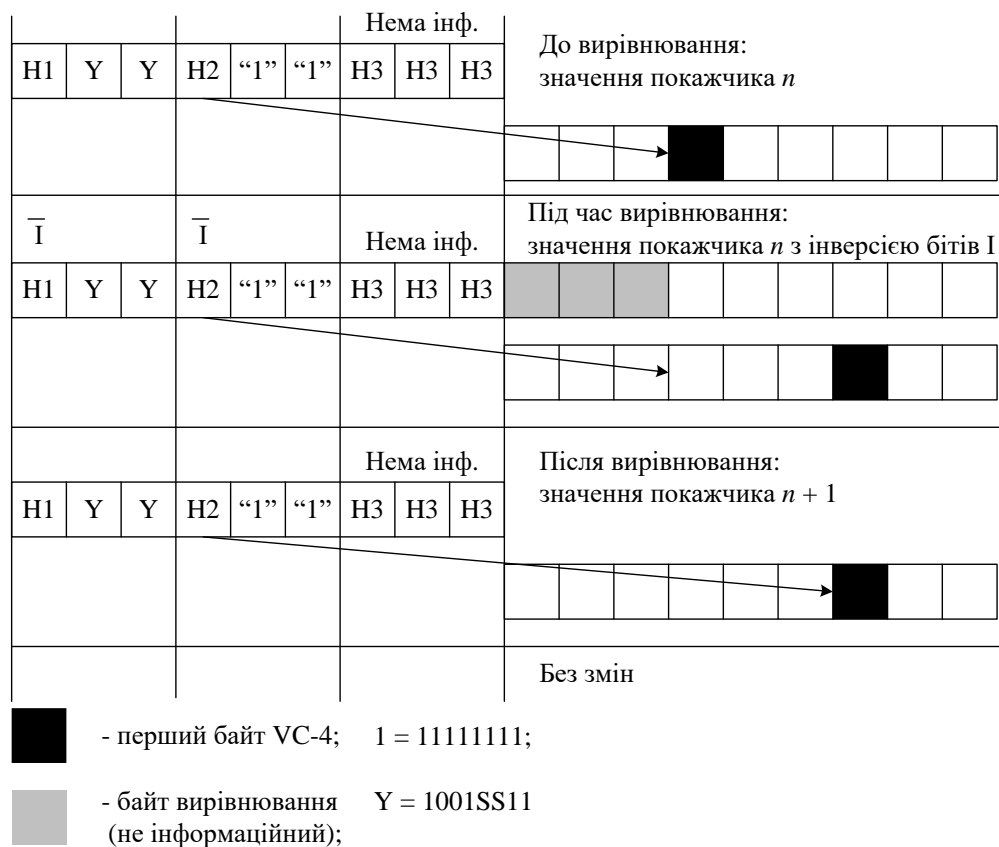


Рис. 6.26. Приклад позитивного вирівнювання для AU-4

Негативне вирівнювання. Якщо швидкість передачі віртуального контейнера VC вище швидкості передачі кадру, то за необхідності відповідна пропускна спроможність повинна бути забезпечена в самій структурі кадру. Для цього передбачені байти точного вирівнювання показчика, у яких можуть розміщатися 3 байти вмісту віртуального контейнера VC. Фазове розходження між кадром і віртуальним контейнером VC зменшується на 3 байти й значення показчика має бути зменшене на 1. Приклад негативного вирівнювання для AU-4 наведений на рис. 6.27.

Корекція показчика може здійснюватися в кожному четвертому кадрі, тобто повинно бути щонайменше 3 послідовно наступних один за одним кадрів з тим самим значенням показчика.



Рис. 6.27. Приклад негативного вирівнювання для AU-4

6.7. Виявлення помилок у системі SDH

У системі передачі SDH для виявлення помилок використовується процедура контролю парності VIP- N (Bit Interleaved Parity). Схема обчислення контрольного слова наведена на рис. 6.28.

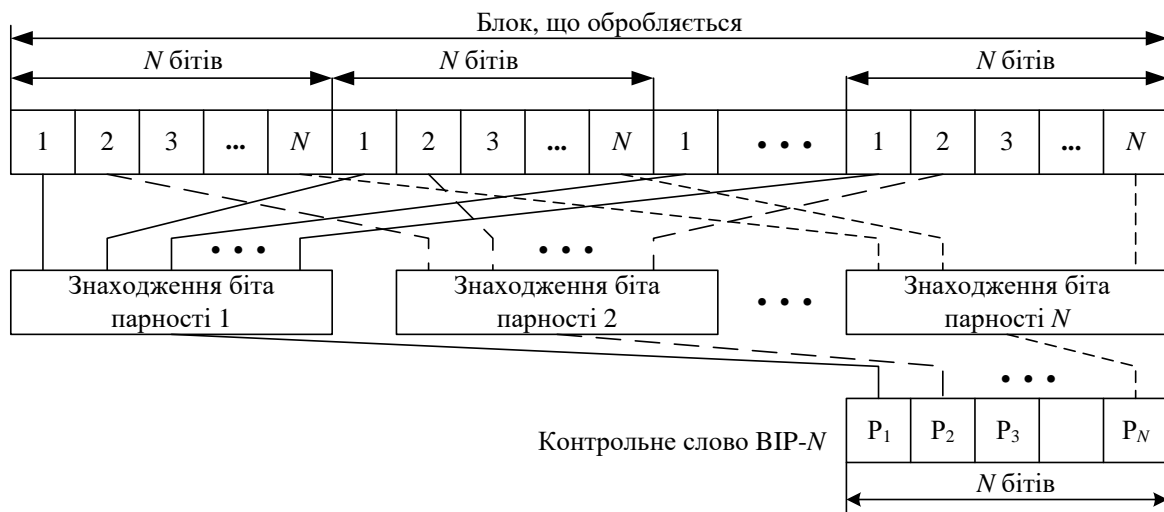


Рис. 6.28. Схема обчислення контрольного слова VIP- N

Контроль парності виконується для конкретного блока даних у межах груп даних по 2, 8 або 24 біти (ВІР-2, ВІР-8 і ВІР-24 відповідно).

Бітовий потік (наприклад, STM- N , VC) розбивається на блоки по N бітів. Всі перші біти блоків додаються за модулем 2. Результат поміщається в перший біт контрольного слова ВІР- N . Аналогічно обробляються інші біти аж до N -го.

Результат підрахунку передається у вигляді контрольного слова на приймальний бік. На приймальному боці проводяться аналогічні обчислення й здійснюється порівняння двох контрольних слів, після чого результат порівняння передається в напрямку, зворотному передачі.

Оскільки технологія SDH передбачає створення секційних і трактових заголовків, процедура контролю парності дає можливість тестування параметрів цифрової системи передачі від секції до секції й від початку до кінця тракту передачі. Для цього використовуються спеціальні байти в складі заголовків SOH і POH (що було розглянуто вище). Наприклад, кількість помилок, виявлена за допомогою контрольного слова, переданого по каналу В3, передається в байті G1 трактового заголовка POH VC-4 наступного синхронного транспортного модуля.

На рис. 6.29 наведена схема посекційного моніторингу якості передачі. Використовувані для контролю парності байти й пов'язані з ними ділянки цифрової системи передачі наведені в табл. 6.8.

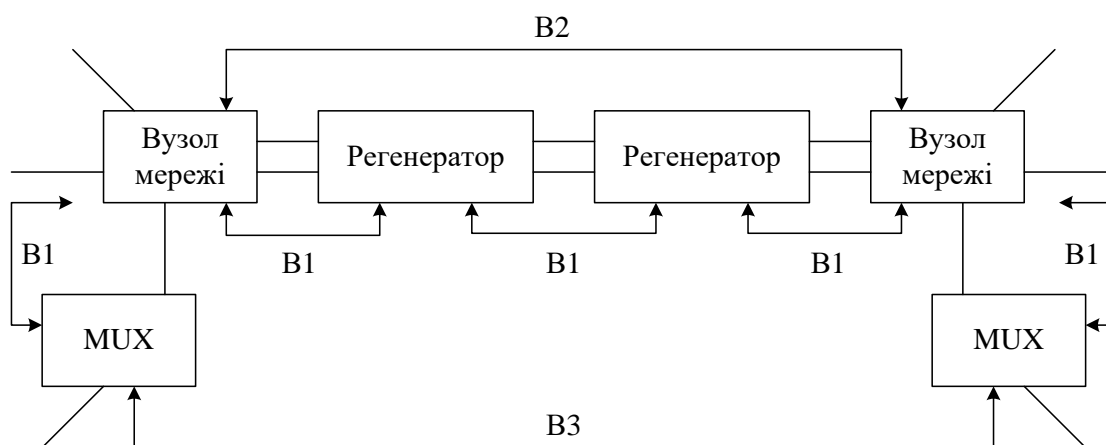


Рис. 6.29. Посекційний моніторинг якості передачі

Байти, використовувані для контролю парності й ділянки мережі SDH

Байт	Заголовок	Довжина	Секція моніторингу
B1	RSOH	ВІР-8	STM-1
B2	MSON	ВІР-24	STM-1 без RSOH
B3	POH VC-3/4	ВІР-8	VC-3/4
V5	POH VC-1/2	ВІР-2	VC-1/2

6.8. Апаратура мереж SDH

Мережа SDH, як і будь-яка мережа, складається з окремих функціональних модулів: мультиплексорів, комутаторів, концентраторів, регенераторів і термінального обладнання. Цей набір визначається основними функціональними завданнями, розв'язуваними мережею SDH:

- об'єднання цифрових потоків з каналів доступу в лінійний (агрегатний) сигнал, придатний для транспортування в мережі SDH, – завдання мультиплексування, розв'язуване термінальними мультиплексорами мережі доступу;

- транспортування агрегатних сигналів по мережі з можливістю введення/виведення цифрових потоків – завдання транспортування, розв'язуване мультиплексорами введення/виведення;

- перевантаження віртуальних контейнерів у відповідності до схеми маршрутизації з одного сегмента мережі в інший, що здійснюється у виділених вузлах мережі, – завдання крос-комутації, розв'язуване за допомогою цифрових крос-комутаторів;

- об'єднання декількох цифрових потоків в один розподільний вузол – завдання концентрації, розв'язуване концентраторами;

- відновлення (регенерація) форми й амплітуди сигналу, переданого на більші відстані, для компенсації спотворень і загасання – завдання регенерації, розв'язуване за допомогою регенераторів;

– сполучення мережі користувача з мережею SDH – завдання сполучення, розв’язуване за допомогою кінцевого обладнання – різних узгоджувальних пристроїв.

Розглянемо роботу деяких функціональних модулів.

Синхронний мультиплексор SMUX (Synchronous Multiplexor) є основним функціональним модулем мережі SDH. Мультиплексор є універсальним і гнучким пристроєм, що дозволяє вирішувати практично всі перераховані вище завдання, тобто, крім завдання мультиплексування, виконувати завдання комутації, концентрації й регенерації. Це виявляється можливим у силу модульної конструкції мультиплексора, при якій виконувані функції визначаються лише можливостями системи управління й складом модулів, включених у специфікацію мультиплексора.

На вхід синхронного мультиплексора (рис. 6.30) можуть надходити сигнали (електричні або оптичні) плезіохронної та синхронної цифрових ієрархій. Існують мультиплексори, що безпосередньо сприймають канали на 64 кбіт/с і мають інтерфейси для приєднання локальних мереж і мереж FDDI та для роботи в асинхронному режимі перенесення інформації АТМ та ін. З агрегатного (оптичного лінійного) боку може здійснюватися передача зі швидкістю синхронних транспортних модулів STM-N.

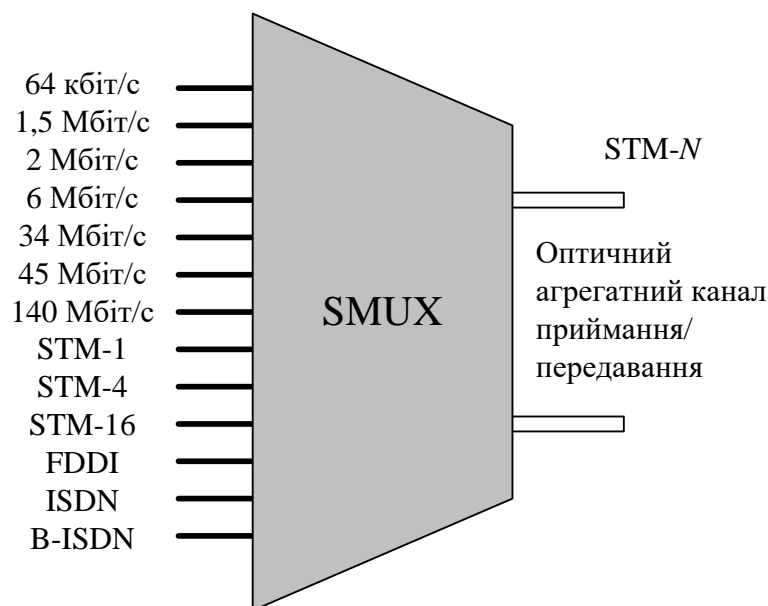


Рис. 6.30. Інтерфейси синхронних мультиплексорів

Наявність двох агрегатних оптичних портів дає змогу за допомогою мультиплексорів будувати такі конфігурації, як “кільце”, “ланцюжок”, а також резервувати потоки. Багато типів мультиплексорів для резервування можуть мати чотири оптичні порти.

З наведених на рис. 6.30 даних не випливає, що реальні типи апаратури містять усі інтерфейси. Кожен конкретний мультиплексор має лише невелику частину цих можливостей.

Можна виділити два основних типи мультиплексорів: термінальний мультиплексор і мультиплексор введення/виведення.

Термінальний мультиплексор ТМ (Terminal Multiplexor) є мультиплексором і кінцевим пристроєм мережі SDH з каналами доступу, що відповідають ієрархіям PDH і SDH. Термінальний мультиплексор дозволяє вводити канали доступу із входу інтерфейсу на агрегатний вихід або виводити канали доступу з агрегатного входу на вихід інтерфейсу. Крім того, термінальний мультиплексор може здійснювати локальну комутацію каналів доступу.

Мультиплексор введення/виведення ADM (Add/Drop Multiplexer) додатково до можливостей, забезпечуваних термінальним мультиплексором, дозволяє здійснювати наскрізну комутацію агрегатних (оптичних лінійних) потоків в обох напрямках (наприклад, на рівні VC-4), а також здійснювати замикання каналу приймання на канал передавання одного оптичного агрегатного порту у випадку виходу з ладу одного з напрямків. Нарешті, він дозволяє (у випадку аварійного виходу з ладу мультиплексора) пропускати оптичний потік повз нього в обхідному режимі. Все це дає можливість використовувати мультиплексор введення/виведення в кільцевій топології.

Для прикладу на рис. 6.31 зображений мультиплексор введення/виведення 1-го рівня синхронної цифрової ієрархії, інтерфейс якого може мати до 63 портів навантаження для цифрових потоків зі швидкістю 2 Мбіт/с. Цей мультиплексор ADM дозволяє вводити та виводити від 1 до 63 таких потоків.

Концентратор являє собою мультиплексор, що об'єднує кілька цифрових потоків, які надходять від віддалених вузлів мережі в один розподільний вузол (не обов'язково віддалений),

пов'язаний з основною транспортною мережею. Концентратор дозволяє організувати відгалуження або підключення зовнішніх гілок до основної транспортної мережі й, у загальному випадку, зменшити кількість каналів, підключених безпосередньо до основної транспортної мережі SDH.

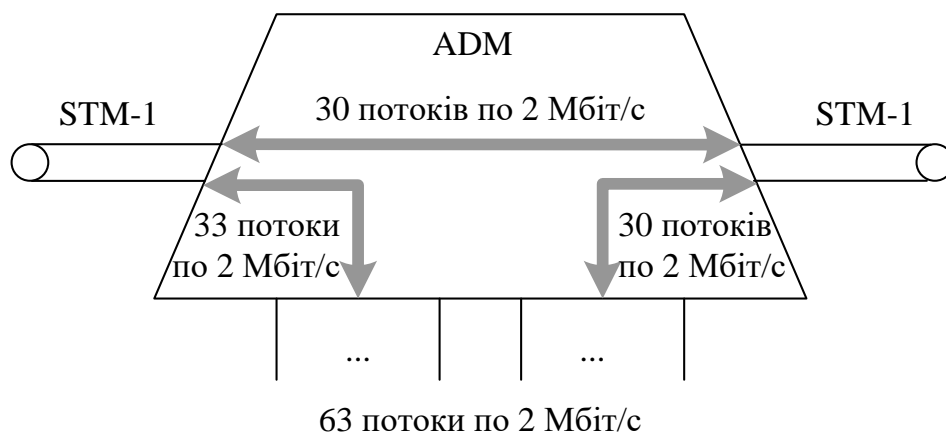


Рис. 6.31. Мультиплексор введення/виведення

Приклад використання мультиплексора в ролі концентратора наведено на рис. 6.32, *а*. Цей мультиплексор може приймати кілька частково заповнених синхронних потоків (через оптичні або електричні інтерфейси) й об'єднувати їх в один агрегатний потік.

Регенератор являє собою вироджений випадок мультиплексора, що має один вхідний канал, як правило, оптичний STM-*N* і один або два агрегатних виходи (рис. 6.32, *б*). Регенератор використовується для збільшення припустимої відстані між вузлами мережі SDH шляхом регенерації сигналів корисного навантаження. Звичайно ця відстань становить 15 – 40 км для довжини хвилі 1350 нм і 40 – 80 км для довжини хвилі 1550 нм.

Крос-комутатор дозволяє встановити зв'язки між різними каналами, асоційованими з певними користувачами мережі, шляхом організації напівпостійного (тимчасового) перехресного зв'язку (крос-комутації) між ними за командою оператора мережі з використанням засобів мережного управління. Цим крос-комутація відрізняється від звичайної комутації, коли з'єднання між абонентами здійснюються під управлінням абонентів мережі.

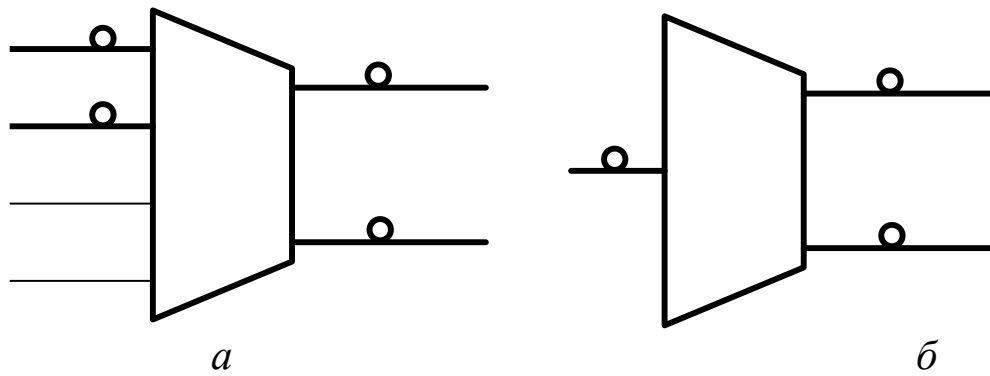


Рис. 6.32. Мультиплексор у режимах:
а) концентратора; б) регенератора

Крос-комутація дозволяє здійснювати маршрутизацію в мережі SDH на рівні віртуальних контейнерів різного рівня відповідно до заданої конфігурації мережі.

Фізично можливості внутрішньої комутації каналів закладені в самому синхронному мультиплексорі, що дозволяє говорити про мультиплексор як про внутрішній або локальний комутатор. Мультиплексор може динамічно змінювати логічну відповідність між навантажувальним блоком TU і каналом доступу, що рівнозначно внутрішній комутації каналів (рис. 6.33, *а*). Крім того, мультиплексор, як правило, має можливість комутувати власні канали доступу, що рівнозначно локальній комутації каналів (рис. 6.33, *б*).

Все це говорить про можливості розподіленого управління процесом комутації у вузлах мережі SDH. Однак ці можливості здебільшого обмежені як за кількістю каналів, що комутують, так і за типом віртуальних контейнерів, доступних для комутації. Тому, у загальному випадку, доводиться використовувати спеціально розроблені синхронні крос-комутатори SDXC, що здійснюють не тільки локальну, але й загальну або прохідну (наскрізну) крос-комутацію високошвидкісних потоків PDH і синхронних транспортних модулів STM-*N* (рис. 6.34). За допомогою крос-комутаторів можна організувати мережі з чарунковою (гратчастою) структурою. Важливою особливістю крос-комутаторів є відсутність блокування при комутації.

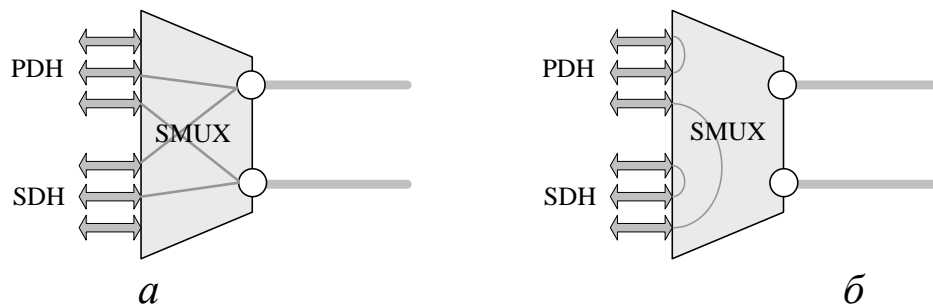


Рис. 6.33. Мультиплексор введення/виведення в режимах:
 а) внутрішнього комутатора; б) локального комутатора

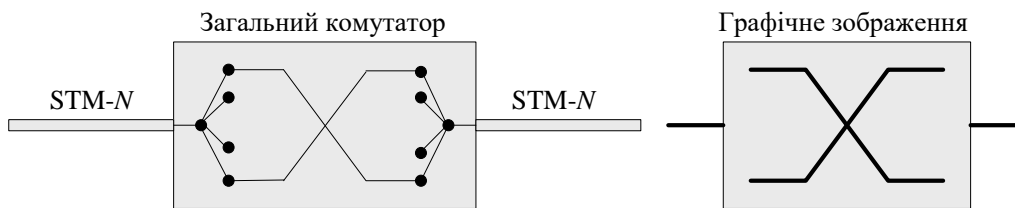


Рис. 6.34. Синхронний крос-комутатор

Виділяють кілька типів крос-комутаторів у залежності від того, які віртуальні контейнери вони можуть комутувати. У загальному випадку вони позначаються як SDXC $n/p/q/...$, де $n, p, q, ...$ – рівні віртуальних контейнерів, на яких здійснюється комутація. Для прикладу розглянемо SDXC типу 4/4; 4/1; 4/3/1 (рис. 6.35).

SDXC типу 4/4 має порти для сигналів всіх рівнів синхронної цифрової ієрархії STM-N, а також для плезіохронних сигналів на 140 Мбіт/с. Комутація здійснюється на рівні VC-4.

SDXC типу 4/1 має порти для синхронних сигналів STM-N та плезіохронних сигналів на 140 і 2 Мбіт/с. Комутація виконується на рівнях VC-4 і VC-1.

SDXC типу 4/3/1 має, крім того, порти для плезіохронних сигналів на 34 Мбіт/с. Перемикання відбувається на рівнях VC-4, VC-3 і VC-1.

Підбиваючи підсумок, зазначимо, що з великого розмаїття апаратури мереж SDH вище були розглянуті тільки найбільш поширені її види.

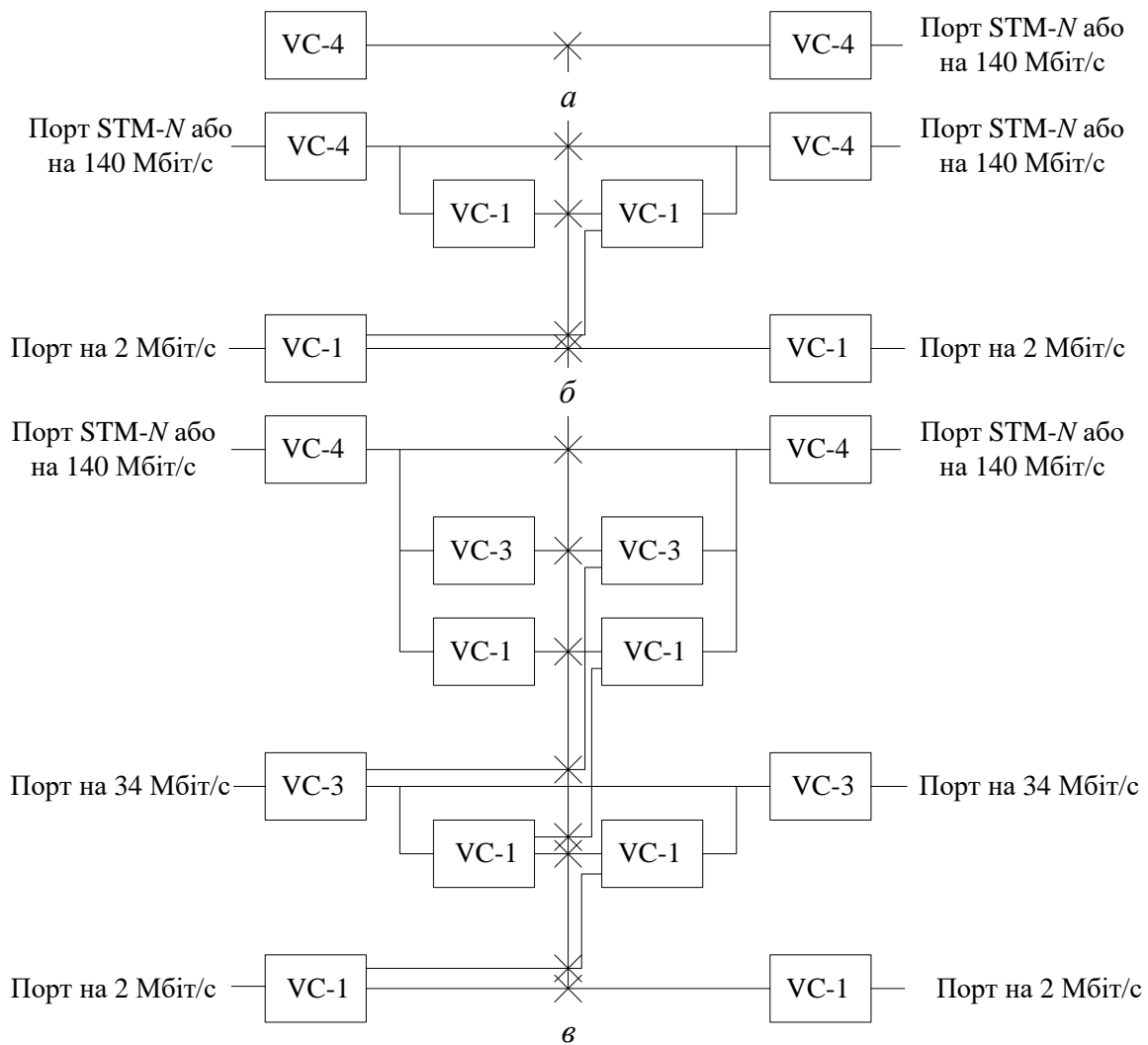


Рис. 6.35. Крос-комутатори: *а)* тип 4/4; *б)* тип 4/1; *в)* тип 4/3/1

6.9. Базові топології мереж SDH

Топологія “точка – точка”. Сегмент мережі, що зв’язує два вузли *A* і *B*, або топологія “точка – точка”, є найбільш простим прикладом базової топології мережі SDH (рис. 6.36). Вона може бути реалізована за допомогою термінальних мультиплексорів ТМ як за схемою без резервування каналу приймання/передавання, так і за схемою зі стовідсотковим резервуванням.

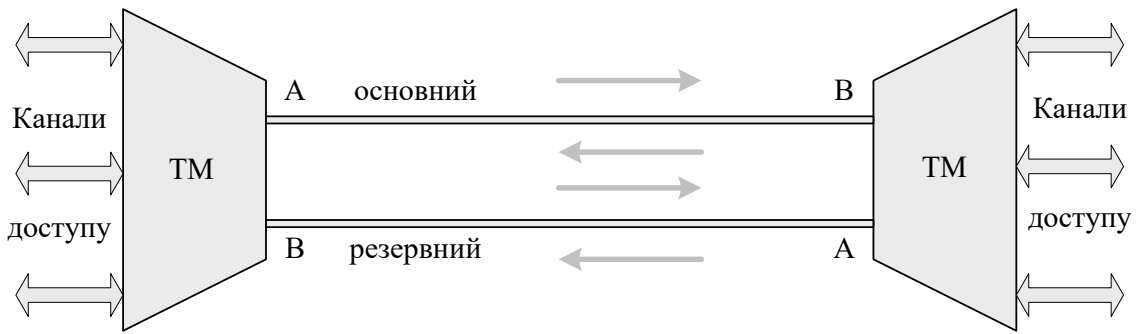


Рис. 6.36. Топологія “точка - точка”

Незважаючи на свою простоту, саме ця базова топологія найбільш широко використовується при передачі великих потоків даних по високошвидкісних магістральних каналах. Ця ж топологія використовується як складова частина більш складних топологій.

Топологія “послідовний лінійний ланцюг”. Ця базова топологія використовується тоді, коли інтенсивність трафіка в мережі невелика й існує необхідність відгалужень для введення/виведення каналів доступу. Вона може бути представлена або у вигляді простого послідовного лінійного ланцюга без резервування, як на рис. 6.37, або більш складним ланцюгом з резервуванням, як на рис. 6.38. Останній варіант топології часто називають “спрощеним кільцем”.

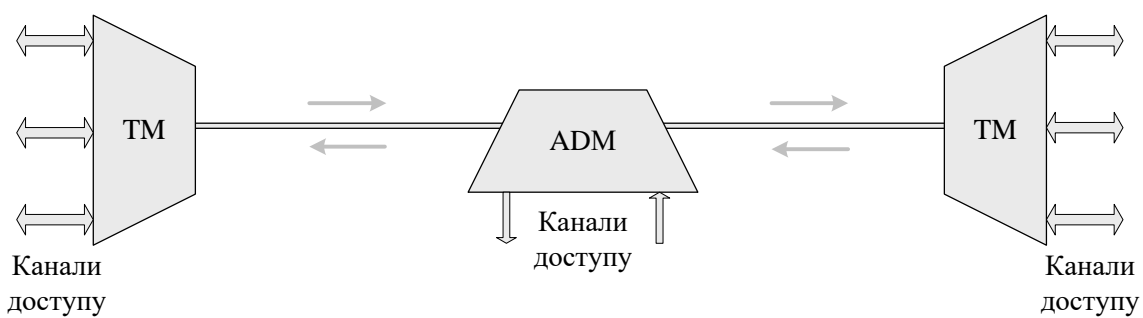


Рис. 6.37. Топологія “послідовний лінійний ланцюг” без резервування

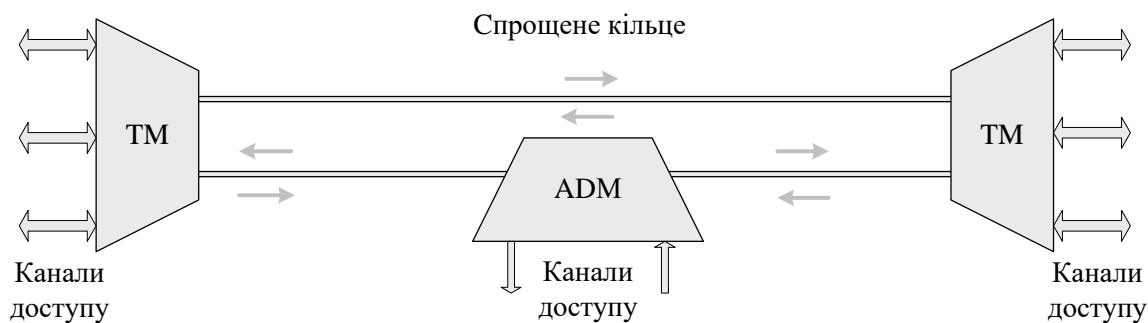


Рис. 6.38. Топологія “послідовний лінійний ланцюг” з резервуванням

Топологія “зірка” реалізує функцію концентратора. У цій топології один з віддалених вузлів мережі, пов’язаний із центром комутації або вузлом основної мережі SDH, відіграє роль концентратора, де частина трафіка може бути виведена на термінали користувача, а частина, що залишилася, може бути розподілена по інших віддалених вузлах (рис. 6.39.) Іноді таку схему називають оптичним концентратором, якщо на входи мультиплексора SMUX подаються частково заповнені синхронні цифрові потоки, а його вихід відповідає STM-N.

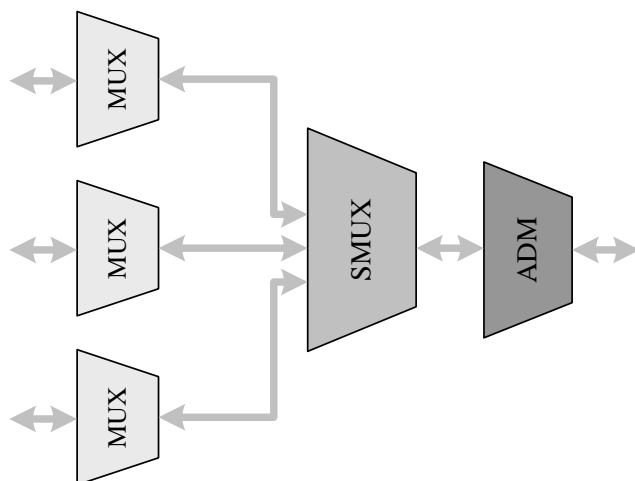


Рис. 6.39. Топологія “зірка” з мультиплексором SMUX в ролі концентратора

Топологія “кільце” широко використовується для побудови мереж SDH перших двох рівнів ієрархії (рис. 6.40).

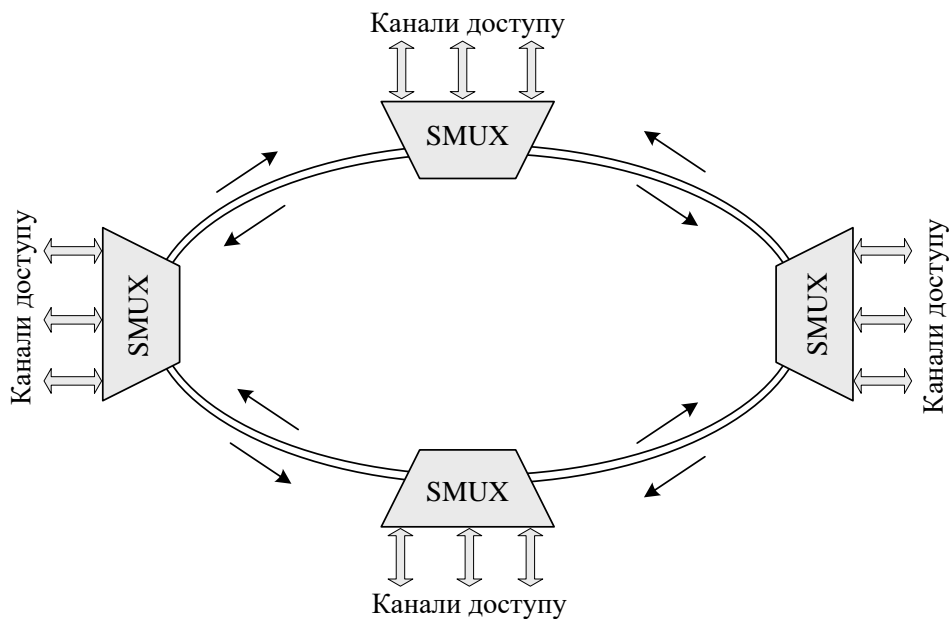


Рис. 6.40. Топологія “кільце”

Основна перевага цієї топології – легкість організації резервування завдяки наявності в синхронних мультиплексах двох пар оптичних каналів приймання/передавання, що дають можливість формування подвійного кільця з зустрічними потоками.

6.10. Забезпечення відмовостійкості мереж SDH

Однією з основних переваг технології SDH є можливість збереження або відновлення (за дуже короткий час – у десятки мілісекунд) працездатності мережі навіть у випадку відмови одного з її елементів або середовища передавання. Такі мережі називають мережами, що самовідновлюються. Зазначимо, що стосовно мереж SDH іноді використовується термін “мережі, що самозаліковуються”.

Розглянемо основні способи забезпечення швидкого відновлення працездатності синхронних мереж.

Резервування ділянок мережі по рознесених трактах. У цьому випадку ділянки між двома вузлами мережі з’єднуються по двох рознесених трактах (стовідсоткове резервування), сигнали

по яких передаються одночасно. У вузлі приймання вони можуть оброблятися за двома схемами:

- резервування за схемою 1 + 1 – прийняті сигнали аналізуються й вибирається той, котрий має найкраще співвідношення параметрів;

- резервування за схемою 1 : 1 – альтернативним маршрутам призначаються пріоритети – низький й високий, гілка з низьким пріоритетом знаходиться в режимі гарячого резерву, перемикання на неї відбувається за аварійним сигналом від системи управління.

Зазначимо, що це загальні методи відновлення працездатності, котрі можуть бути застосовані для будь-яких мереж.

Організація кільцевих мереж, що самовідновлюються. Найпоширенішою в мережах SDH є топологія типу “кільце”. Розрізняють односпрямоване й двоспрямоване кільця.

Односпрямоване кільце. У разі односпрямованого кільця (рис. 6.41) кожен вхідний потік спрямовується навколо кільця в обох напрямках, а на приймальному боці, як і за схемою 1 + 1, здійснюється вибір кращого сигналу. Для побудови кільця використовуються два волокна. Передача основними шляхами відбувається в одному напрямку (наприклад, за годинниковою стрілкою), а резервними – у протилежному (тут поділ на основний і резервний шляхи є умовним, оскільки вони обидва рівноправні). Тому таке кільце називається односпрямованим, з перемиканням трактів або з закріпленим резервом.

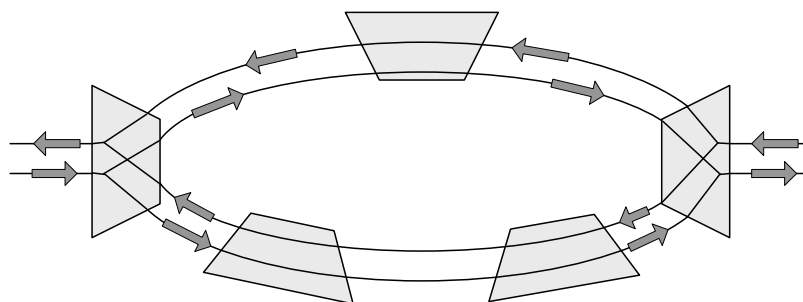


Рис. 6.41. Схема проходження сигналів за двома напрямками передачі для одного з'єднання в односпрямованому кільці

Двоспрямоване кільце. У разі двоспрямованого кільця з двома волокнами (рис. 6.42) сигнал не подвоюється. За нормального режиму кожен вхідний потік спрямовується вздовж кільця найкоротшим шляхом у будь-якому напрямку (звідси назва “двоспрямоване кільце”). Якщо з’являється відмова, то на обох кінцях відмовленої ділянки за допомогою мультиплексора введення/виведення перемикається весь потік інформації, що надійшов на цю ділянку, у зворотному напрямку. Інакше кажучи, у такому кільці здійснюється перемикання секцій або захист з резервом.

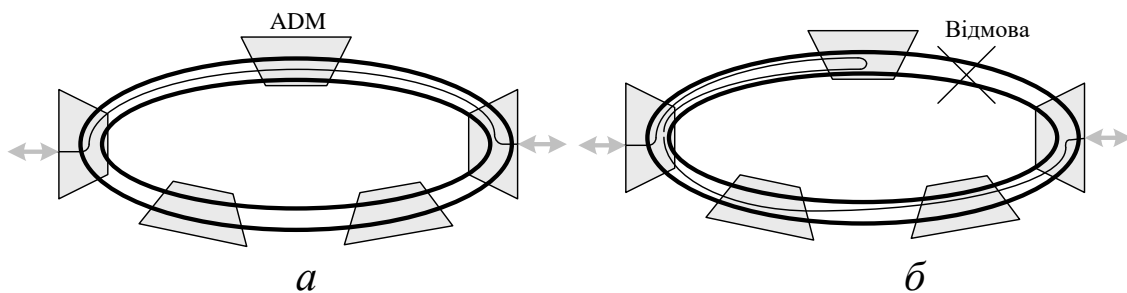


Рис. 6.42. Схема проходження сигналів за двома напрямками передачі для одного з’єднання у двоспрямованому кільці:
а) у нормальному режимі; б) з відмовою

Двоспрямоване кільце може бути з чотирма волокнами. Воно забезпечує вищий рівень відмовостійкості, ніж кільце з двома волокнами. Витрати на побудову цього кільця дуже високі, тому такий варіант використовують рідко.

Двоспрямоване кільце в більшості випадків є більш економічним, ніж односпрямоване, оскільки потребує меншої пропускної спроможності. Це пояснюється тим, що сигнали, які передаються на різних ділянках, що не перетинаються, можуть використовувати одні й ті самі ємності (як в основному, так і в аварійному режимах роботи). Разом з тим односпрямоване кільце є простішим у реалізації. Аналіз типових ситуацій свідчить, що кожен з двох видів кільцевої архітектури має свою сферу найкращого використання.

Односпрямовані кільця більше підходять для мереж доступу, призначених для приєднання користувачів до найближчого вузла. Двоспрямовані кільця вигідніші за умов

досить рівномірного розподілу трафіка, коли стають помітними їх переваги щодо пропускної спроможності. Тому використання цих кілець доцільне для з'єднувальних мереж. В обох варіантах мережі можна зберегти повну її працездатність за будь-якої одноразової відмови.

Резервування обладнання мережі широко (якщо не повсюдно) поширене в апаратурі SDH. Схема резервування в загальному випадку визначається як $N : 1$, що допускає різний ступінь резервування: від $1 : 1$ (100 %) до меншого ступеня, наприклад, $4 : 1$ (25 %), коли на 4 основні пристрої приходить 1 резервний, котрий автоматично вибирається системою крос-комутації за відмови одного з основних.

Відновлення працездатності мережі шляхом обходу непрацездатного вузла. Працездатність системи в цілому (на рівні агрегатних блоків) відновлюється за рахунок виключення ушкодженого вузла зі схеми функціонування. Так, системи управління SDH мультиплексорів, звичайно, дають можливість організувати обхідний шлях, що дозволяє пропускати агрегатний потік повз мультиплексор у випадку його відмови.

Використання апаратури оперативного перемикавання (АОП). Для мережі з довільною структурою, у вузлах якої встановлені крос-комутатори апаратури оперативного перемикавання (АОП), у випадках виникнення відмов, що розривають існуючі тракти, можливе перемикавання потоків з використанням резервів пропускної спроможності працездатних ліній, тобто реконфігурація (рис. 6.43).

У мережах на основі АОП резервування може здійснюватися з використанням різних маршрутів, кількість яких тим більша, чим більша зв'язність мережі й чим більші резерви щодо пропускної спроможності. Тому в таких мережах можливий захист від одночасних відмов декількох елементів, а не лише від одноразових відмов, як у кільцевих мережах.

Організація самовідновлення мережі на основі АОП має кілька варіантів. Насамперед слід сказати, що процедура реконфігурації може бути централізованою або децентралізованою (розподіленою).

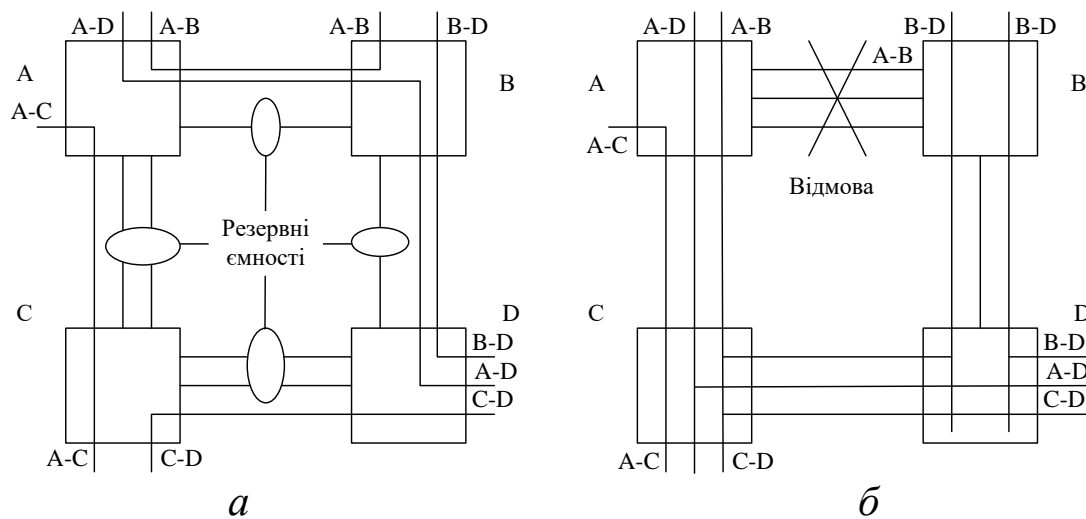


Рис. 6.43. Фрагмент мережі на основі апаратури оперативного перемикання і схема проходження трактів: *а)* у нормальному режимі; *б)* після реконфігурації, обумовленої відмовою між вузлами *A* і *B*

Основна перевага централізованого методу полягає в простоті його реалізації. Недоліком є критичне ставлення до відмов центру управління та до втрати чи спотворення інформації, що надходить у центр, і команд, які йдуть від центру до АОП. При використанні децентралізованого методу цілком розподілені процедури не потребують подібного центру. У разі виникнення відмов на мережі комплекти АОП різних вузлів, обмінюючись між собою повідомленнями, визначають стан мережі, виробляють узгоджене рішення щодо реконфігурації та реалізують його. Основним недоліком цього виду реконфігурації є більша складність розподілених процедур і, як наслідок, значні витрати часу на їх виконання.

6.11. Архітектура мереж SDH

Архітектурні рішення при проектуванні мережі SDH можуть бути сформовані на основі розглянутих вище базових топологій мережі.

Радіально – кільцева архітектура. Приклад радіально – кільцевої архітектури мережі SDH наведений на рис. 6.44. Ця мережа фактично побудована на базі використання двох базових топологій: “кільце” і “послідовний лінійний ланцюг”. Кількість

радіальних гілок обмежується з міркувань припустимого навантаження (загального числа каналів доступу на кільце).

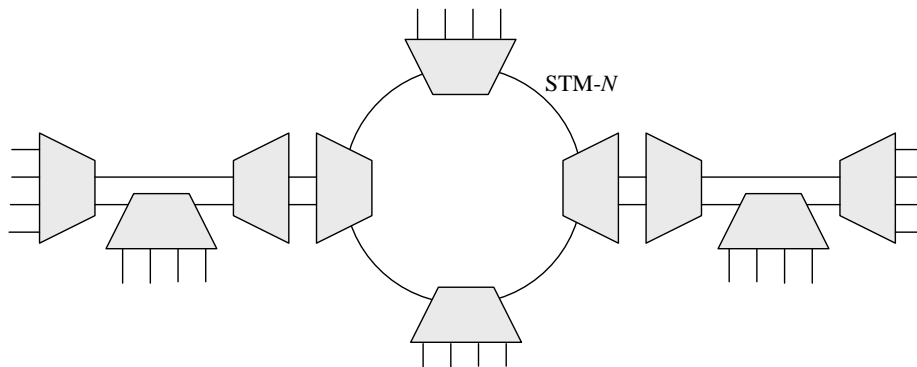


Рис. 6.44. Радіально – кільцева архітектура мережі SDN

Архітектура типу “кільце – кільце”. Інше, часто використовуване в архітектурі мереж SDN, рішення – з’єднання типу “кільце – кільце”. Кільця в такому з’єднанні можуть бути або однакового або різного рівня ієрархії. На рис. 6.45 показана схема з’єднання двох кілець рівня STM-4, а на рис. 6.46 – каскадна схема з’єднання кілець рівня STM-1, STM-4 і STM-16.

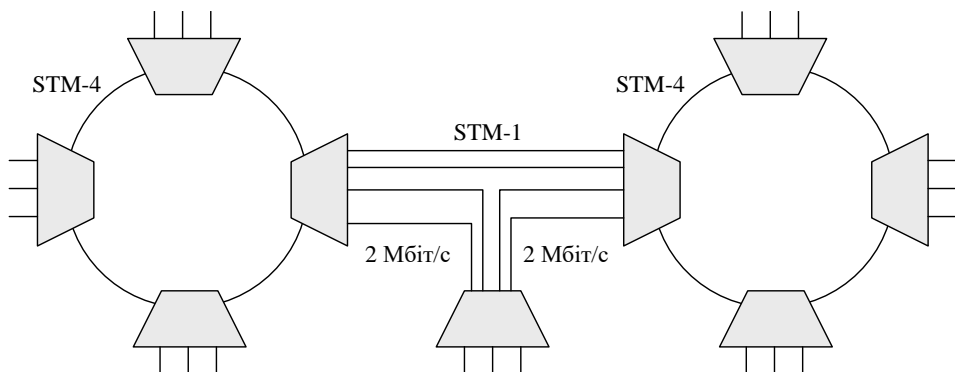


Рис. 6.45. Два кільця одного рівня ієрархії

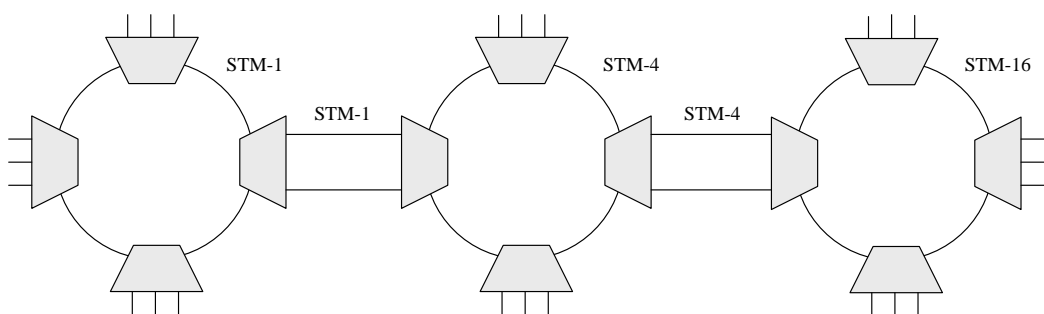


Рис. 6.46. Каскадне з’єднання трьох кілець

Лінійна архітектура. Для лінійних мереж великої довжини відстань між термінальними мультиплексорами набагато більша за ту відстань, що може бути рекомендована з погляду максимально припустимого загасання сигналу у волоконно-оптичному кабелі. У цьому випадку між мультиплексорами повинні бути встановлені регенератори для відновлення загасаючого оптичного сигналу (рис. 6.47).

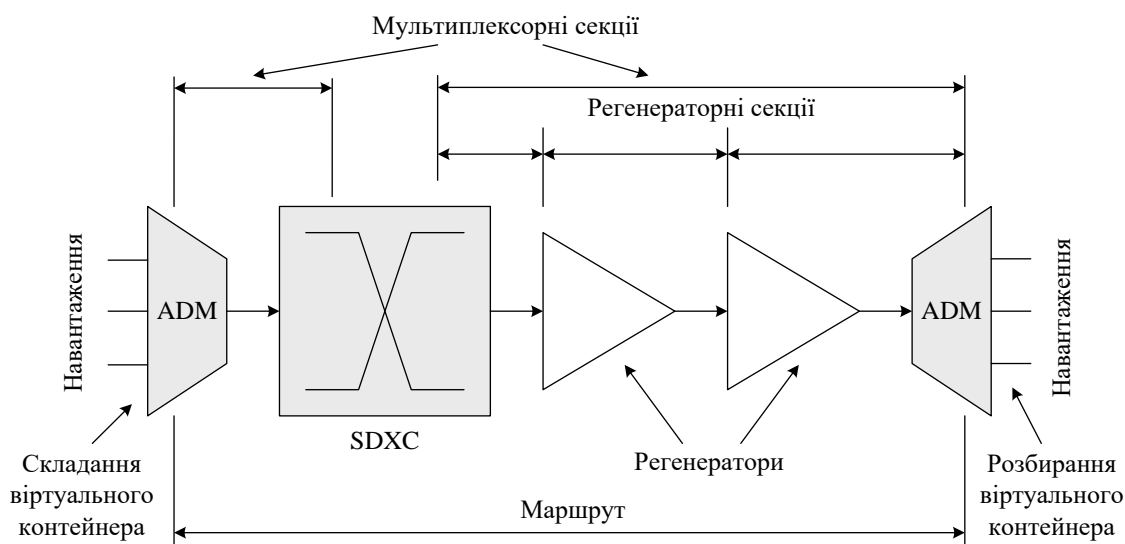


Рис. 6.47. Мережа SDH типу “точка – точка” і її сегментація

Модель трирівневої мережної структури. Згідно з сучасними поглядами, прийнятими в більшості розвинених країн, що реконструюють свої мережі зв'язку на базі синхронної цифрової ієрархії, перспективна мережа повинна мати ієрархічну трирівневу архітектуру (рис. 6.48). Така архітектура дає змогу раціональніше будувати гнучку, надійну й економічну мережу.

Верхній (базовий, магістральний) рівень утворюється головними вузлами, у яких встановлюються крос-комутатори типу 4/4. Основними одиницями, якими обмінюються ці вузли, є віртуальні контейнери VC-4. Кожна лінія несе декілька STM-4 або STM-16. Структура мережі на цьому рівні – ґратчаста.

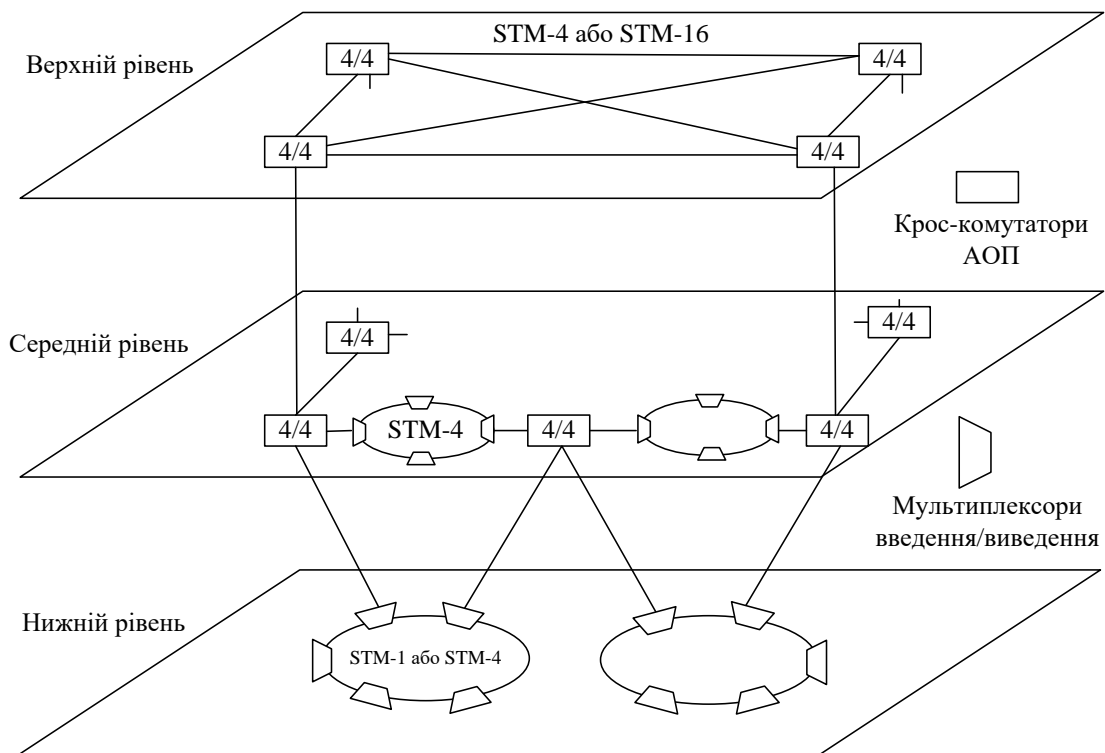


Рис. 6.48. Трирівнева архітектура мережі SDN

Середній рівень складається з декількох з'єднувальних (регіональних) мереж, кожна з яких охоплює певну територію. Вузли цих мереж обмінюються не лише віртуальними контейнерами VC-4, але й дрібнішими одиницями (наприклад, VC-12). Тому у вузлах використовуються крос-комутатори типу 4/1, а також мультиплексори введення/виведення. Найважливіші вузли цього рівня виходять на один чи декілька вузлів верхнього рівня. Структура з'єднувальних мереж може бути як кільцевою, так і ґратчастою. У лініях організуються тракти STM-4.

Нижній рівень становлять мережі доступу, куди входять основні джерела та споживачі навантаження. Кожна з мереж доступу виходить на один або декілька вузлів середнього рівня. Структура мереж – кільцева на основі мультиплексорів введення/виведення тракту STM-1 або STM-4.

У найзагальніших рисах функції кожного рівня можна охарактеризувати так: верхній рівень створює мережу трактів VC-4, середній рівень перерозподіляє тракти VC-12 і VC-3 між VC-4, а нижній забезпечує доступ до мережі користувачів.

Така ієрархічна архітектура має свої переваги, а саме:

- уможлиблює незалежний розвиток і реконструкцію кожного рівня;
- концентрує потоки навантаження, що дає змогу використовувати лінійні тракти високої пропускної спроможності (це економічно вигідно при побудові мережі);
- забезпечує виконання контролю, управління та резервування на кожному рівні, що спрощує та прискорює ліквідацію наслідків відмов у мережі.

Описана модель дає лише загальну схему, але можливі й різні відхилення від неї. У кожному конкретному випадку можуть змінюватися кількість рівнів, структура мереж, функції рівнів та ін. Для побудови мереж синхронної цифрової ієрархії типовими є кільцеві структури на базі мультиплексорів введення/виведення та ґратчасті на базі крос-комутаторів.

Контрольні запитання

1. Які існують рівні синхронної цифрової ієрархії, відповідні їм транспортні модулі та швидкості передавання?
2. Як поділяється синхронна цифрова ієрархія на функціональні шари?
3. Які функції виконують контейнери, віртуальні контейнери та синхронні транспортні модулі?
4. Для чого призначені заголовки інформаційних структур синхронної цифрової ієрархії?
5. Як здійснюється формування синхронних транспортних модулів STM-N з модуля STM-1?
6. Для чого призначені покажчики в інформаційних структурах синхронної цифрової ієрархії?
7. Як здійснюється виявлення помилок у мережі синхронної цифрової ієрархії?
8. Назвіть особливості апаратури мереж синхронної цифрової ієрархії.
9. Назвіть основні базові топології мереж синхронної цифрової ієрархії.
10. Як забезпечується відмовостійкість у мережі синхронної цифрової ієрархії?

7. ТЕХНОЛОГІЯ АТМ

7.1. Основи технології АТМ

Асинхронний метод перенесення інформації АТМ відіграватиме центральну роль в еволюції існуючих мереж. Він має ряд важливих переваг перед технологіями передавання даних у локальних і глобальних мережах і дає змогу реалізувати на високих швидкостях передавання відеоінформації, комп'ютерних даних і мовних сигналів одночасно однією фізичною лінією зв'язку. Це один з найважливіших факторів побудови локальних мереж і об'єднання офісів у корпоративні мережі з інтеграцією послуг.

Підхід, реалізований у технології АТМ (рис. 7.1), полягає в поданні потоку даних пакетами фіксованої й малої довжини (53 байти, з них – 5 байтів заголовок), що асинхронно мультиплексується в єдиному цифровому тракті. Пакети АТМ називаються чарунками.

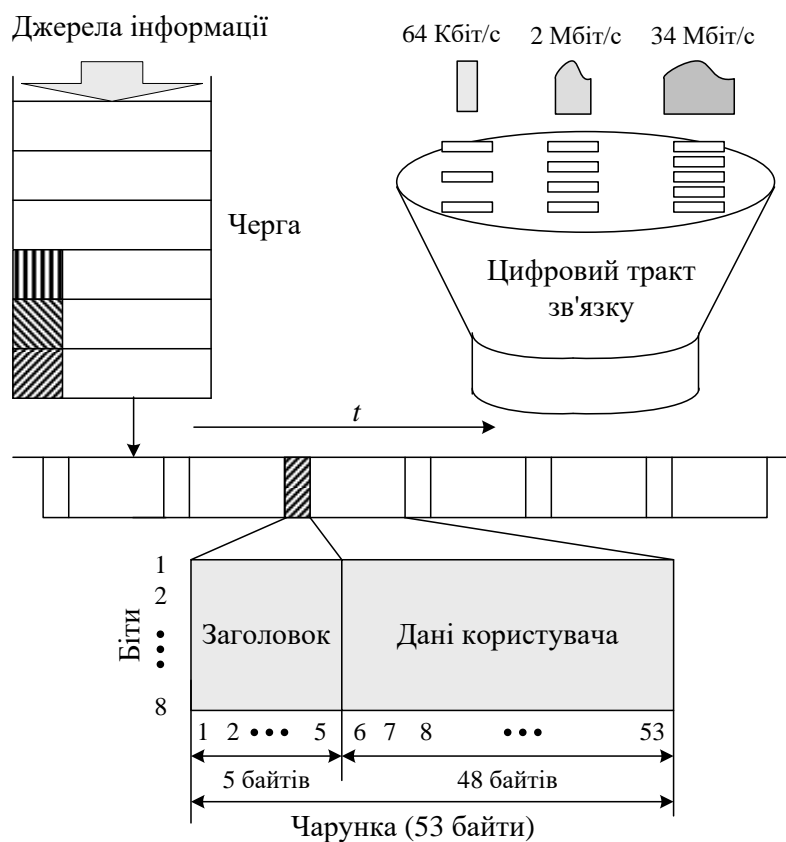


Рис. 7.1. Сутність технології АТМ

Керуюча інформація, що знаходиться в 5 байтах заголовка, уможлиблює визначення типу трафіка і його пріоритету, цілісності чарунки та її маршрутизації. Цей трафік, що направляється комутаторами, може передаватися частинами або повністю. Комутатори можуть відправляти дані будь-яким доступним фізичним шляхом, що значно підвищує швидкість передавання.

Передавання чарунки відповідно до рекомендації I.361 здійснюється в такій послідовності:

- байти передаються в порядку зростання, починаючи з 1-го;
- біти передаються в порядку зменшення, починаючи з 8-го;
- для всіх полів чарунки перший біт є найбільш значущим.

Мережа АТМ зберігає порядок передачі чарунок. Іноді чарунки можуть втрачатися, але порядок чарунок зберігається. Приймальний пристрій сприймає потік чарунок і перетворює його на вихідний бітовий потік.

При передачі даних інформація, звичайно, вже розбита на пакети. У цьому випадку чарунки, що несуть інформацію одного пакета, передаються в мережу згруповано. При виході з мережі вони можуть перемежовуватися з іншими чарунками. Проте збирання вмісту чарунок у вихідний пакет не має труднощів, оскільки вміст чарунок, що несуть іншу інформацію, просто не включається в пакет, що збирається.

Невелика довжина пакетів дозволяє скоротити час на їхню передачу й тим самим забезпечити невеликі затримки при передачі пакетів, що вимагають постійного темпу передачі, характерного для мультимедійної інформації. При пріоритетному обслуговуванні мультимедійного трафіка комутаторами мережі його пакети будуть змушені очікувати, в найгіршому випадку, протягом невеликого й фіксованого часу – часу передачі пакета з 53 байтів, що при швидкості в 155 Мбіт/с складатиме менше 3 мкс. Для того щоб пакети містили адресу вузла призначення й у той же час відсоток службової інформації не був більшим у порівнянні з розміром поля даних пакета, у технології АТМ застосований стандартний для глобальних обчислювальних мереж прийом – ці мережі завжди працюють *за протоколом з встановленням з'єднання й адреси кінцевих вузлів* використовуються тільки на етапі встановлення з'єднання. При

встановленні з'єднання йому присвоюється поточний номер з'єднання й у подальших передачах пакетів у рамках цього з'єднання (тобто до моменту розриву зв'язку) у службових полях пакета використовується не адреса вузла призначення, а номер з'єднання, що набагато коротше.

У мережах АТМ з'єднання кінцевого вузла з мережею здійснюється індивідуальною лінією зв'язку. Мережа АТМ має структуру, схожу на структуру телефонної мережі – кінцеві станції з'єднуються з комутаторами нижнього рівня, що у свою чергу з'єднуються з комутаторами більш високих рівнів. Комутатори АТМ користуються адресами кінцевих вузлів для маршрутизації трафіка в мережі комутаторів.

Вибір для передачі даних будь-якого типу невеликої чарунки фіксованого розміру ще не вирішує завдання суміщення різнорідного трафіка в одній мережі, а тільки створює передумови для її вирішення. Для повного вирішення цього завдання в технології АТМ розвинені ідеї замовлення пропускнуої спроможності і якості обслуговування QoS (Quality of Service), реалізовані в технології Frame Relay. Але якщо мережа Frame Relay споконвічно була призначена для передачі тільки пульсуючого комп'ютерного трафіка, то розроблювачі технології АТМ виділили 4 основних класи трафіка, для яких розробили різні механізми підтримки необхідної якості обслуговування.

Клас трафіка (називаний також класом послуг) якісно характеризує необхідні послуги з передачі даних через мережу АТМ. Якщо додаток вказує мережу, що потрібна, наприклад, передача голосового трафіка, то стає зрозумілим, що особливо важливими для користувача будуть такі показники якості обслуговування, як затримки й варіації затримок чарунок, що істотно впливають на якість переданої інформації, а втрата окремої чарунки з декількома відліками не є настільки важливим моментом, тому що пристрій, який відтворює голос, може апроксимувати відсутні відліки.

Іншим важливим параметром трафіка, що істотно впливає на спосіб його передачі через мережу, є величина пульсацій. Виділяють два різних типи трафіка відносно цього параметра – трафік з постійною швидкістю й трафік зі змінною швидкістю. До різних класів були віднесені трафіки, породжувані додатками,

які використовують для обміну повідомленнями протоколи із установленням з'єднань і без установлення з'єднань. У першому випадку дані передаються самим додатком досить надійно, як це звичайно роблять протоколи із установленням з'єднання, тому від мережі АТМ високої надійності передавання не потрібно. У другому випадку додаток працює без установлення з'єднання й відновленням загублених і перекручених даних не займається, що висуває підвищені вимоги до надійності передавання чарунок мережею АТМ.

Очевидно, що тільки якісних характеристик, котрі задає клас трафіка, для опису необхідних послуг виявляється недостатньо. У технології АТМ для кожного класу трафіка визначений набір кількісних параметрів, які користувач повинен задати. Це такі параметри, як максимальна, середня й мінімальна швидкості передавання даних; максимальна величина пульсацій трафіка; доля загублених чарунок; затримка передавання чарунок; варіація затримки чарунок.

Ідея створення ШЦМІО (широкосмугової цифрової мережі інтегрального обслуговування) на технології АТМ виникла як принципово новий метод побудови мереж зв'язку. Замість стандартних і чисельних мереж телефонного, телеграфного, факсимільного зв'язку і мереж передавання даних, кожна з яких розрахована на забезпечення лише одного виду зв'язку з тим чи іншим способом перенесення інформації, передбачається побудувати єдину цифрову мережу на базі широкого використання волоконно-оптичних ліній і єдиного методу транспортування мережею всіх видів інформації за допомогою технології асинхронного режиму перенесення пакетів фіксованої довжини.

Завдяки технології АТМ усе комутаційне устаткування стає однорідним і таким, що виконує для всіх видів інформації одне завдання – швидко комутацію фіксованих пакетів (чарунок) та асинхронний часовий розподіл ресурсів, за якого численні віртуальні з'єднання з різними швидкостями асинхронно мультиплекуються в єдиному фізичному каналі зв'язку – цифровому тракті.

Мережа АТМ, яка спроможна транспортувати єдиним методом усі види інформації, забезпечує:

- високу гнучкість і адаптацію щодо зміни вимог користувачів до обсягу, швидкості, якості доставки інформації;
- підвищення ефективності використання мережних ресурсів внаслідок статистичного мультиплексування множини джерел з пачковим трафіком;
- зниження загальних витрат на проектування, будівництво й експлуатацію мережі.

Проте основною проблемою, що виникає в мережах АТМ, є задоволення вимог різних служб до часової й семантичної прозорості мережі та їх адаптації до єдиного методу перенесення.

7.2. Еталонна конфігурація широкосмугової цифрової мережі інтегрального обслуговування

Розглянемо еталонну конфігурацію ШЦМІО, описану ІТУ-Т в рекомендації І.413. Еталонна конфігурація інтерфейсу “користувач – мережа” (рис. 7.2) має такі елементи, як функціональні групи та еталонні точки.

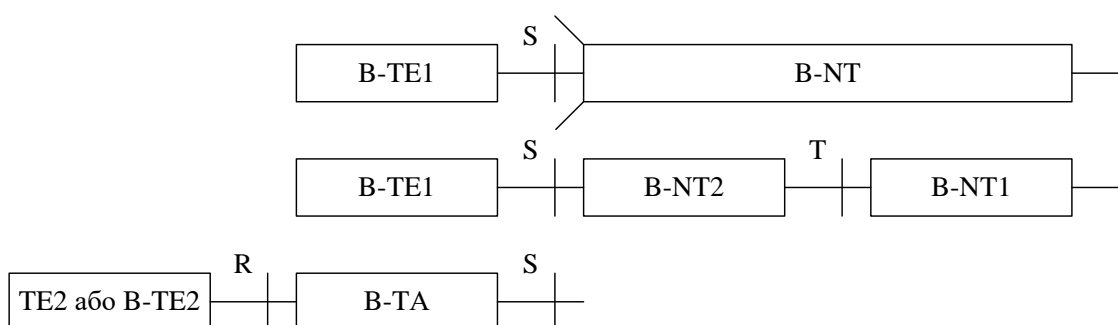


Рис. 7.2. Еталонна конфігурація інтерфейсу “користувач – мережа”

Один або кілька стандартних широкосмугових кінцевих пристроїв користувачів В-ТЕ1 приєднуються до пристрою широкосмугового мережного закінчення В-NT. Кінцеві пристрої користувачів можуть бути одно- або різнотипними.

Пристрій широкосмугового мережного закінчення В-NT забезпечує приєднання широкосмугового кінцевого пристрою користувача до мережі АТМ, а також можливість спільного використання абонентської лінії декількома стандартними

широкосмуговими кінцевими пристроями. З урахуванням необхідності виконання цих завдань функціональна група В-NT поділяється на дві підгрупи: широкосмугового мережного закінчення 1-го типу В-NT1, що виконує функції лінійного закінчення, та широкосмугового мережного закінчення 2-го типу В-NT2, яке виконує функції приєднання одного або кількох кінцевих пристроїв до однієї лінії доступу.

Між функціональними групами визначаються еталонні точки:

T – між В-NT1 і В-NT2;

S – між В-NT2 і В-TE1;

R – між нестандартним вузькосмуговим кінцевим пристроєм TE2 або нестандартним широкосмуговим кінцевим пристроєм В-TE2 і широкосмуговим термінальним адаптером В-ТА.

Пристрій мережного закінчення 1-го типу В-NT1 здійснює пряме і зворотне перетворення сигналів в еталонній точці T на сигнали, що відповідають передаванню інформації по лінії доступу, тобто виконує функції, подібні до функцій фізичного рівня еталонної моделі протоколів ВВС (взаємодії відкритих систем), а саме: утворює лінійне закінчення, керує процесом передавання, здійснює експлуатацію й технічне обслуговування устаткування мережі. За допомогою цього пристрою забезпечується незалежність інших функціональних груп (В-NT2 і В-TE1, В-ТА і TE2 або В-TE2) від способу передавання сигналів лініями доступу.

Пристрій мережного закінчення 2-го типу В-NT2 виконує функції фізичного і вищих рівнів еталонної моделі протоколів ВВС. Такими функціями є: адаптація до різних інтерфейсів фізичних середовищ і топологій; мультиплексування (демультиплексування) або концентрація (деконцентрація) трафіка джерел; розподіл ресурсів; контроль параметрів користувача; управління протоколами сигналізації; замикання внутрішнього трафіка.

Важливим завданням цього пристрою є забезпечення спільного використання одного мережного закінчення декількома кінцевими терміналами. При цьому кількість кінцевих пристроїв, їхній розподіл у просторі, а також фізична реалізація мережного закінчення В-NT2 можуть суттєво відрізнятись.

Пристрій мережного закінчення 2-го типу В-NT2 не потрібний (“нуль В-NT2”), якщо можливе пряме з’єднання кінцевого пристрою користувача В-TE1 із ширококутовим мережним закінченням 1-го типу В-NT1 (рис. 7.3). У цьому разі еталонні точки S і T збігаються.

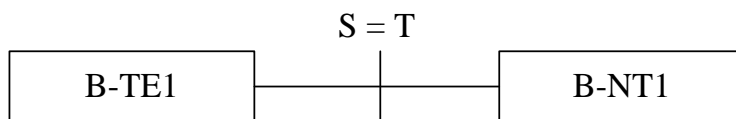


Рис. 7.3. Збіг еталонних точок S і T

У мережі можливе поєднання функцій ширококутових пристроїв мережного закінчення 1-го типу В-NT1 та 2-го типу В-NT2 (рис. 7.4, а).

Можливе також поєднання функцій ширококутового мережного закінчення 2-го типу В-NT2 та ширококутового кінцевого пристрою користувача В-TE1 (рис. 7.4, б).

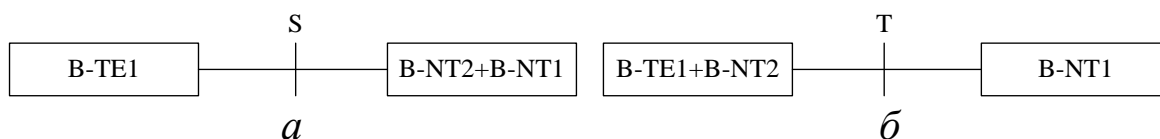


Рис. 7.4. Конфігурація з фізичним інтерфейсом:
а) лише в точці S ; б) лише в точці T

Мережа ШЦМІО може працювати разом з вузькосмуговою цифровою мережею інтегрального обслуговування (ВЦМІО), кінцеве устаткування якої TE1, що відповідає рекомендації 1.430 (базовий доступ), приєднується через стандартний інтерфейс до еталонної точки $S1$ (рис. 7.5). До ширококутового мережного закінчення 2-го типу В-NT2 може приєднуватися досить велика кількість ширококутового та вузькосмугового кінцевого устаткування користувачів зі стандартними інтерфейсами В-TE1 і TE1 в еталонних точках S і S_1 .

Завершуючи короткий опис еталонних конфігурацій ШЦМІО на ділянці “користувач – мережа”, звернемося до

нижньої частини рис. 7.2, де показані функціональні групи В-ТА, ТЕ2 і В-ТЕ2, а також еталонна точка *R* між цими групами.

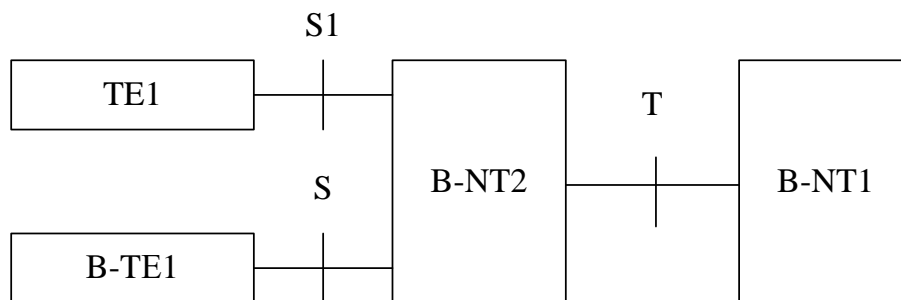


Рис. 7.5. Конфігурація з інтерфейсом 64 кбіт/с і широкопasmовим інтерфейсом у точках *S* і *S1*

В еталонних точках *S*, *S1* і *T* можуть використовуватися лише стандартні інтерфейси, визначені в рекомендації I.432, а в еталонній точці *R* – будь-які інтерфейси, що не належать до цифрової мережі інтегрального обслуговування, для забезпечення доступу в мережу АТМ нестандартного кінцевого устаткування.

Звичайні кінцеві пристрої ТЕ2 можуть приєднуватися до ШЦМЮ через узгоджувальні широкопasmові пристрої В-ТА, що вигідно користувачеві як в економічному, так і в організаційному відношенні. Узгоджувальні широкопasmові пристрої приєднуються до стику в еталонній точці *S*. Проте один чи кілька узгоджувальних пристроїв можуть об'єднуватися з широкопasmовим пристроєм мережного закінчення 2-го типу В-NT2, створюючи один пристрій, який приєднується до стику в контрольній точці *T* (рис. 7.6).

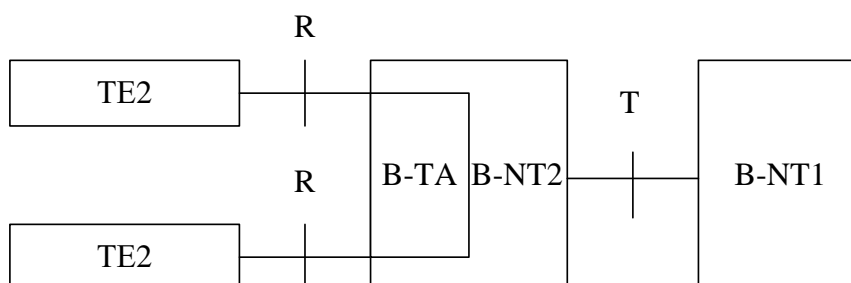


Рис. 7.6. Об'єднання широкопasmових термінальних адаптерів В-ТА з широкопasmовим пристроєм мережного закінчення 2-го типу В-NT2

Забезпечення широкосмуговим пристроєм мережного закінчення В-NT2 взаємодії кінцевого устаткування абонента (див. рис. 7.5) не можна пов'язувати з певною топологією. При цьому можливі фізичні конфігурації типу “зірка”, “шина”, “кілеце” і навіть їхні комбінації (наприклад, “зіркова шина”). Можливі топології фізичної реалізації і доступу в ШЦМЮ наведені на рис. 7.7.

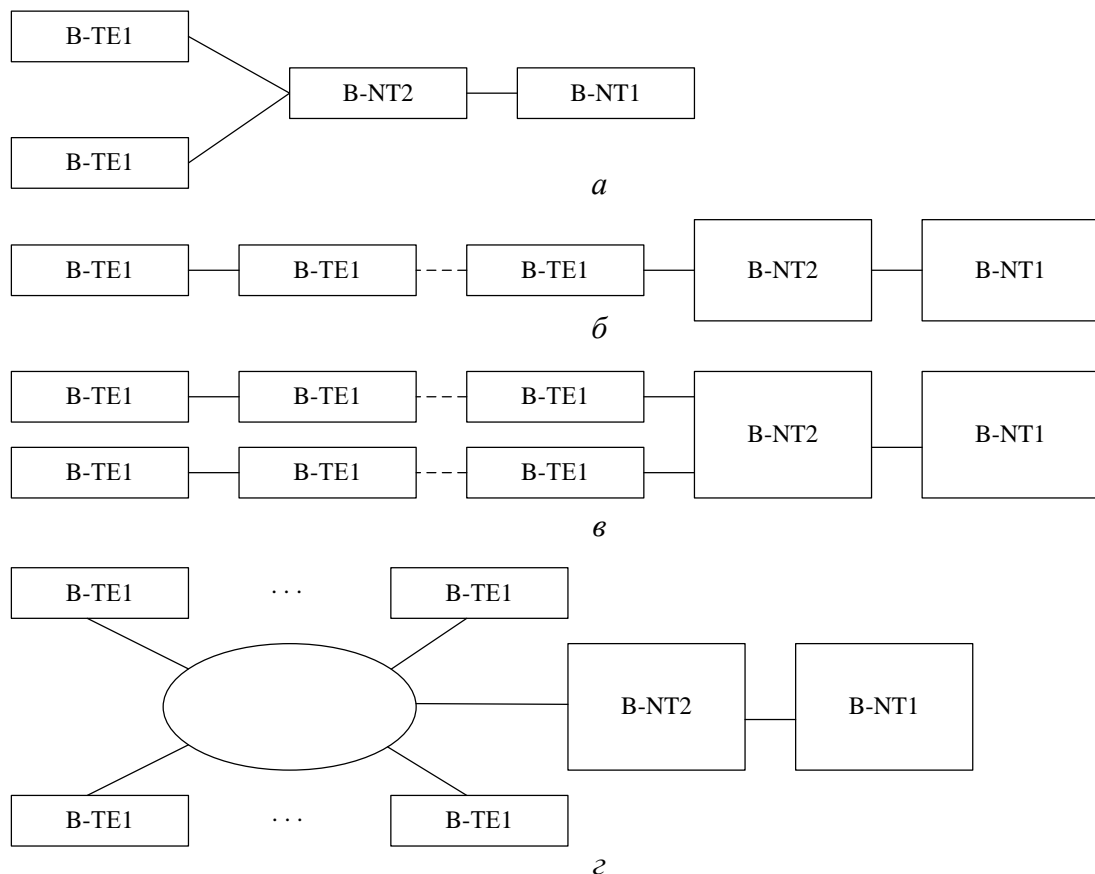


Рис. 7.7. Можливі топології фізичної реалізації доступу в ШЦМЮ: а) “зірка”; б) “шина”; в) “зіркова шина”; з) “кілеце”

Згідно з рис. 7.7 допускається безліч способів реалізації доступу користувачів у мережу АТМ. Проте ІТУ-Т в рекомендації І.413 прийняла такі суттєві обмеження:

– на широкосмуговий пристрій мережного закінчення 1-го типу В-NT1 в еталонній точці *S* допускається лише один інтерфейс;

– на фізичному рівні інтерфейси підтримують з'єднання типу “точка – точка”, якщо для одного джерела (передавача) є лише один стик (приймач).

На рис. 7.8 наведено два варіанти еталонної конфігурації ШЦМІО на технології АТМ: згідно з рекомендаціями ІТУ-Т та відповідно до стандартів АНСІ, де кінцевими системами ES (End System) вважаються устаткування користувача, у тому числі локальна або міська мережа АТМ, а також локально – обчислювальні мережі типу Ethernet чи Token Ring та установчі виробничі АТС, а проміжною системою IS (Intermediate System) – комутатори доступу або транзитні комутатори АТМ. З рис. 7.8 видно, що мережі АТМ можуть поділятися на мережі загального користування та приватні (корпоративні).

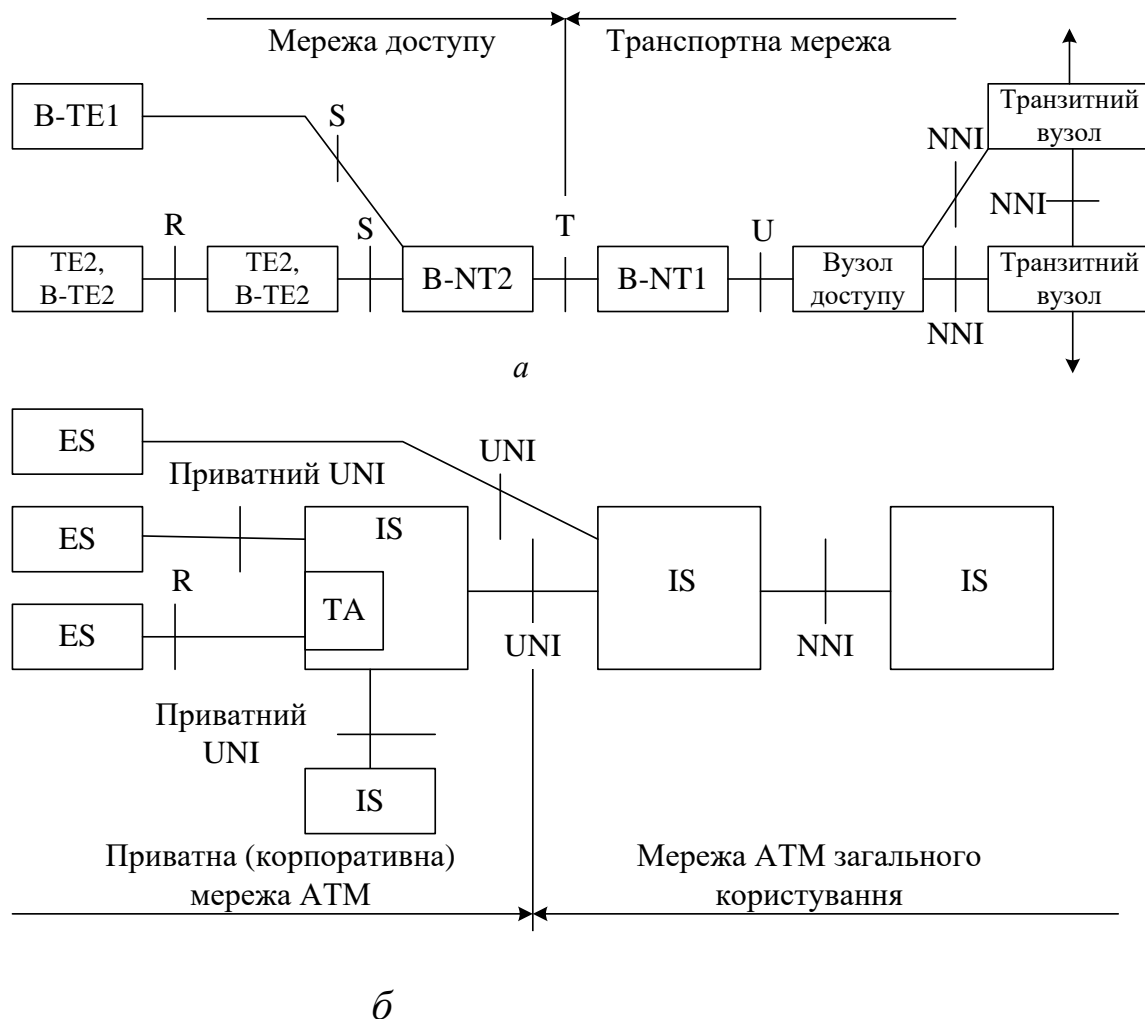


Рис. 7.8. Еталонна конфігурація ШЦМІО: а) згідно з ІТУ-Т; б) відповідно до АНСІ

Широкосмуговий пристрій мережного закінчення 1-го типу В-NT1 служить для завершення ліній передавання і для виконання відповідних функцій експлуатації й технічного обслуговування, а мережні закінчення 2-го типу В-NT2 можуть бути, наприклад, локальною чи міською обчислювальною мережею або пристроєм, що виконує функції мультиплексування та концентрації чарунок.

Сучасні мережі зв'язку прийнято поділяти на дві частини – транспортну мережу, котра виконує функції транспортування інформації, та мережу доступу, що забезпечує доступ користувача до послуг з транспортування інформації. Транспортну мережу називають також мережею комутації, а мережу доступу – абонентською мережею CN (Customer Network).

Мережа доступу займає ділянку, через яку користувач здійснює доступ у мережу загального користування, і розташовується на користувальному боці широкосмугового пристрою мережного закінчення 2-го типу В-NT1. Інтерфейс між мережею доступу і транспортною мережею розташований у точці T .

Інтерфейс “користувач – мережа” UNI (User – Network Interface) може бути стиком у приватній мережі, який збігається з еталонною точкою S , або стиком у мережі загального користування, що збігається з еталонними точками T чи U (рис. 7.7).

Мережний інтерфейс NNI (Network Node Interface) є стандартним стиком між мережами або між вузлами мережі. В АТМ цей термін використовується для позначення стику між вузлами приватної (корпоративної) мережі.

7.3. Еталонна модель протоколів широкосмугової цифрової мережі інтегрального обслуговування

Описуючи еталонну модель протоколів АТМ, фактично розглядатимемо модель протоколу широкосмугової цифрової мережі інтегрального обслуговування, тому що технологія АТМ виникла завдяки створенню адекватної транспортної мережі для потреб ШЦМЮ, а потім стала використовуватись як

універсальна транспортна мережа. Проте в рекомендаціях ІТУ-Т модель АТМ описана як складова протоколу ШЦМІО.

Дотримуючись рекомендацій ІТУ-Т (модель протоколів ШЦМІО є розподілом моделі, описаної в рекомендації I.320), подамо загальний вигляд еталонної моделі протоколів ШЦМІО за технологією АТМ (рис. 7.9).

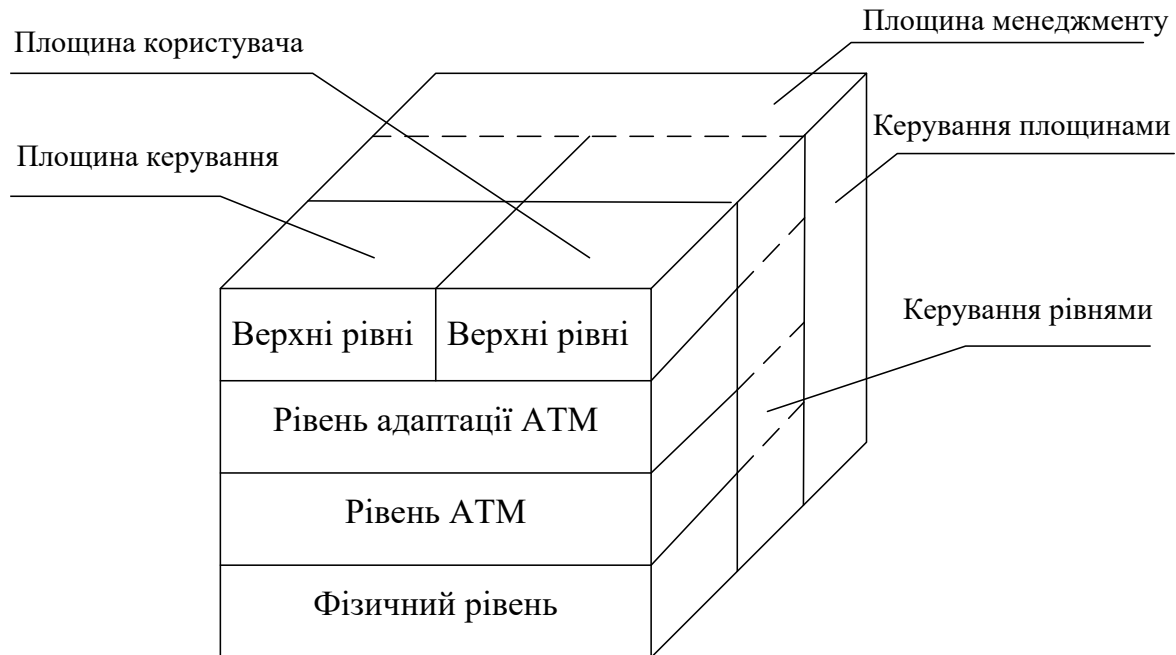


Рис. 7.9. Еталонна модель протоколів у ШЦМІО

До складу моделі входять три площини: площина користувача, площина управління і площина менеджменту.

Площина користувача (U-plane) забезпечує транспортування всіх видів інформації разом з механізмами захисту від помилок, контролю і управління потоком, обмеження навантаження тощо. Площина користувача має рівневу структуру.

Площина управління (C-plane) визначає протоколи встановлення, контролю і роз'єднання зв'язку. Їй належать усі функції сигналізації, крім протоколів метасигналізації. Площина управління також має рівневу структуру.

Площина менеджменту (M-plane) забезпечує виконання функцій двох типів – менеджменту (управління) площинами і менеджменту (управління) рівнями.

Функції управління площинами передбачають координацію протоколів між усіма “гранями” моделі і належать до всієї ШЦМІО, зв’язуючи її в одне ціле. Ділянка управління площинами не має рівневої структури.

Функції управління рівнями забезпечують розподіл мережних ресурсів, узгодження їх з параметрами трафіка, оброблення інформації, експлуатацію й технічне обслуговування мережі, управління нею. Процедури метасигналізації також належать до функцій управління рівнями. Ділянка управління рівнями має рівневу структуру.

Розглянемо тепер рівні еталонної моделі АТМ. Нижнім рівнем є фізичний рівень РНУ (Physical Layer).

Над фізичним рівнем розміщується рівень АТМ (ATM Layer). На даному рівні присутні чарунки.

Над рівнем АТМ розміщується рівень адаптації АТМ – ААЛ (ATM Adaptation Layer). Даний рівень реалізується в кінцевих системах і є прозорим для мережі АТМ. Під прозорістю розуміється те, що службова інформація рівня ААЛ розміщується усередині 48 байтів навантаження чарунки й мережа не аналізує цю інформацію.

Функції рівнів еталонної моделі протоколів ШЦМІО визначені в рекомендаціях I.321 і I.413. На цей час детально обґрунтовані функції тільки перших трьох рівнів моделі, якими є фізичний, безпосередньо АТМ, де структуруються чарунки, та адаптації АТМ, який підтримує послуги верхніх рівнів (емуляцію каналів, високошвидкісне передавання даних без встановлення з’єднання, ретрансляцію кадрів тощо).

Оскільки мережа АТМ повинна здійснювати доставку інформації різного типу, передбачено кілька різних рівнів ААЛ.

Три рівні моделі АТМ приблизно відповідають за функціями фізичному, каналному й мережному рівню моделі OSI, хоча точну відповідність установити не можна. На рис. 7.10 показано співвідношення рівневих структур ШЦМІО з еталонною моделлю OSI, а також поділ рівнів ШЦМІО на підрівні та їх основні функції (табл. 7.1).

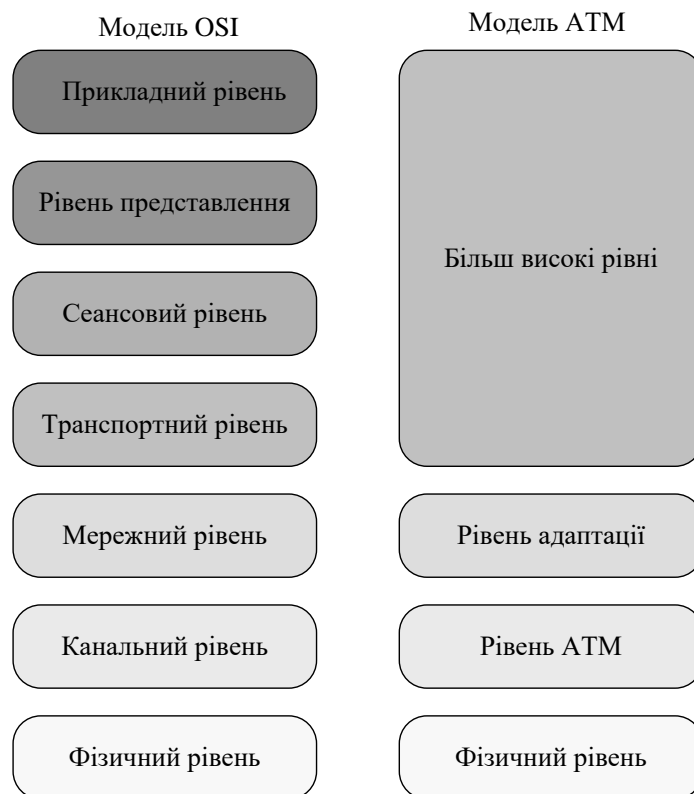


Рис. 7.10. Різниця моделі ATM від моделі OSI

Таблиця 7.1

Основні функції рівнів еталонної моделі ШЦМІО

Рівень	Підрівень	Основні функції
Адаптації ATM	Конвергенції	Конвергенція до служби
	Сегментації й складання	Сегментація інформації й складання чарунок
ATM	Віртуального каналу й віртуального шляху	Загальне управління потоком; генерація або видалення заголовка чарунки; перетворення ідентифікаторів віртуальних шляхів і віртуальних каналів; мультиплексування або демультиплексування чарунок
Фізичний	Конвергенції із системою передачі	Узгодження швидкості чарунок; формування поля контролю помилок, виявлення й виправлення помилок; адаптація потоку чарунок до кадру системи передачі й виділення чарунок; генерація кадру системи передачі й відновлення кадру
	Залежний від фізичного середовища	Синхронізація; передача двійкового сигналу в даному середовищі

7.4. Фізичний рівень

Фізичний рівень є нижнім рівнем протокольного стека АТМ, що забезпечує інтерфейс між рівнем безпосередньо АТМ і фізичним середовищем.

Фізичний рівень поділяється на підрівень конвергенції до фізичного середовища та підрівень конвергенції до системи передавання.

Підрівень конвергенції до фізичного середовища визначає швидкість передавання бітового потоку через дане фізичне середовище, а також забезпечує синхронізацію між передаванням і прийманням інформації. На цьому рівні здійснюється лінійне кодування і, якщо потрібно, електронно-оптичне та оптико-електронне перетворення сигналів. Як фізичне середовище поширення сигналу найчастіше застосовується одно- або багатомодове оптичне волокно. Можливе також застосування коаксіального кабелю, екранованої або неекранованої мідної пари та радіоканалу високої якості.

Підрівень конвергенції до системи передавання обумовлює порядок передавання чарунок АТМ у бітовому потоці й виконує такі функції:

- генерацію кадру системи передавання та його відновлення на приймальному боці;
- адаптацію потоку чарунок до кадру на передавальному боці та вилучення чарунок з кадру на приймальному боці;
- формування поля контролю помилок у заголовку на передавальному боці і виявлення та виправлення, якщо це можливо, одиночних помилок на приймальному боці;
- узгодження швидкості потоку чарунок.

Основну увагу тут приділимо підрівню конвергенції з системою передавання, а саме: розміщенню чарунок у кадрах систем синхронної та плезіохронної цифрової ієрархії й у системах передавання чарункового типу; формуванню поля контролю помилок у заголовку, виявленню і виправленню помилок; розмежуванню чарунок; узгодженню швидкості потоку чарунок.

Вилучення чарунок – це процес, що дає змогу на приймальному боці відновлювати їхні межі. Цей механізм

описаний у рекомендації I.432. Для захисту механізму вилучення інформаційне поле чарунки перед передаванням скремблюється.

На передавальному боці формується послідовність контролю помилок у заголовку. Така послідовність вміщується у відповідне поле заголовка чарунки. На приймальному боці значення цієї послідовності підраховується і порівнюється з тим значенням, яке надійшло. У разі розбіжності помилка, якщо це можливо, виправляється або чарунка стирається.

Узгодження швидкості потоку чарунок полягає в тому, що коли з боку рівня безпосередньо АТМ потік чарунок менший за пропускну спроможність системи передавання, то підрівень конвергенції фізичного рівня з передавального боку додає чарунки, що не містять інформації, а приймач відкидає їх. Такі чарунки називаються порожніми. Рекомендація I.321 покладає виконання цієї функції на підрівень конвергенції фізичного рівня за допомогою порожніх чарунок, а в інших документах вважається, що узгодження швидкості відбувається на рівні безпосередньо АТМ з використанням не призначених для цього чарунок. Це свідчить про потенційну можливість несумісності на фізичному рівні двох систем, які використовують різноманітні типи чарунок для узгодження швидкості.

Міжнародна спілка електрозв'язку стандартизувала два типи інтерфейсу “користувач – мережа” для ШЦМЮ на технології АТМ. Інтерфейс першого типу організовується на швидкості 155,520 Мбіт/с. Він може бути реалізований з використанням двох коаксіальних або одного чи двох оптичних кабелів. Цей інтерфейс, як правило, симетричний за швидкістю передавання бітів обома напрямками. Інтерфейс другого типу формується на швидкості 622,080 Мбіт/с, являє собою об'єднання чотирьох інтерфейсів першого типу і реалізується переважно на оптичному кабелі. Цей інтерфейс може бути симетричним і асиметричним. Обидва типи інтерфейсу “користувач – мережа” можуть бути реалізовані з використанням кадрів синхронної цифрової ієрархії або безперервного передавання потоку чарунок.

У ролі цифрових можуть використовуватися системи передавання синхронної або плезіохронної цифрової ієрархій з власною структурою кадру. У цьому разі потрібний спеціальний механізм упакування чарунок у поле корисного навантаження

кадру систем передавання синхронної або плезіохронної цифрової ієрархії. Крім того, в інтерфейсі “користувач – мережа” ІТУ-Т запропонувала спеціальну структуру, в якій кадр еквівалентний чарунці.

До ІТУ-Т надійшли пропозиції щодо стандартизації інтерфейсів “користувач – мережа” з нижчими швидкостями передавання пакетів АТМ. Доцільність стандартизації цих інтерфейсів пояснюється такими основними причинами:

- зниження швидкості передавання розширює можливості використання існуючих цифрових мереж і мереж доступу;
- успіхи в техніці стиснення сигналів сприяють забезпеченню широкосмугових послуг на нижчих швидкостях без помітного погіршення якості переданої інформації;
- інтерфейси на нижчих швидкостях забезпечують економічнішу реалізацію термінального устаткування і лінійних споруд між мережним закінченням і комутатором доступу.

Розміщення чарунок АТМ у кадрах системи SDH. У рекомендації І.311 визначено, що синхронна цифрова ієрархія SDH є основою фізичного рівня ШЦМІО на технології АТМ як на мережному рівні, так і в мережі доступу інтерфейсу „користувач – мережа”. Приклад використання модуля STM-1 для перенесення чарунок АТМ наведений на рис. 7.11.

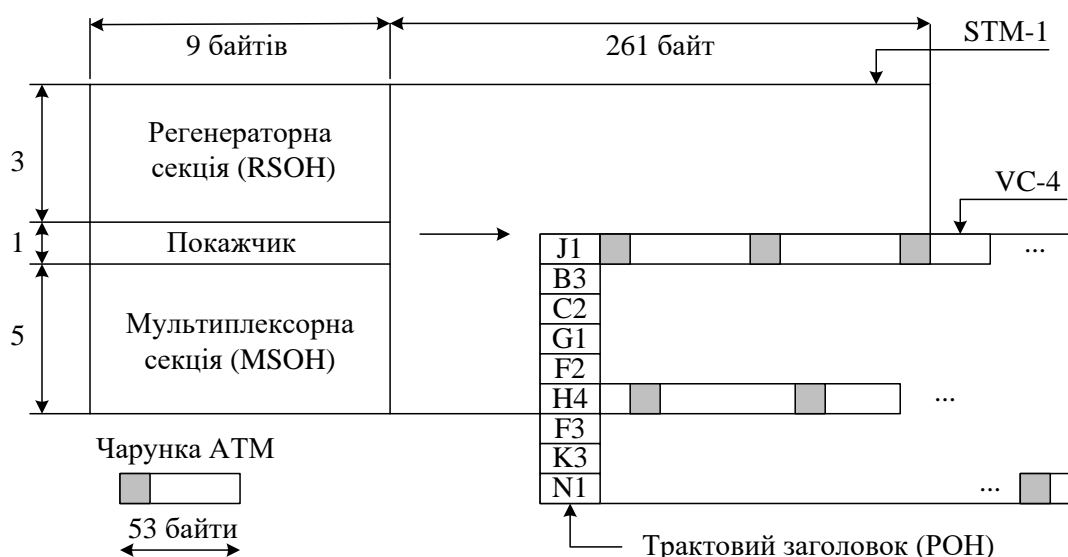


Рис. 7.11. Використання синхронного транспортного модуля STM-1 для перенесення чарунок АТМ

При використанні STM-1 для транспортування чарунок потік чарунок АТМ розміщується в контейнері С-4. Таким чином, в STM-1 для перенесення чарунок виділяється пропускна спроможність, що дорівнює

$$\frac{9 \cdot 260 \cdot 8}{125 \cdot 10^{-6}} = 149,760 \text{ І́ á³ð/ñ.}$$

Розмір контейнера (9 x 260 = 2 340 байтів) не кратний розміру чарунки в 53 байти. Оскільки об'єм контейнера повинен бути заповнений повністю, то чарунка АТМ може перетинати межу контейнера. Потім до контейнера С-4 додається трактовий заголовок РОН і утворюється віртуальний контейнер VC-4, що транспортується в STM-1.

Використання для перенесення чарунок АТМ модуля STM-4 дозволяє збільшити швидкість передачі до 4 x 149,760 = 599,040 Мбіт/с.

Інтерфейс на основі чарунок. Сектором стандартизації ІТУ-Т на інтерфейсі “користувач – мережа” рекомендований спосіб передачі чарунок АТМ неперервними потоками зі швидкостями 155,520 Мбіт/с і 622,080 Мбіт/с (рис. 7.12).

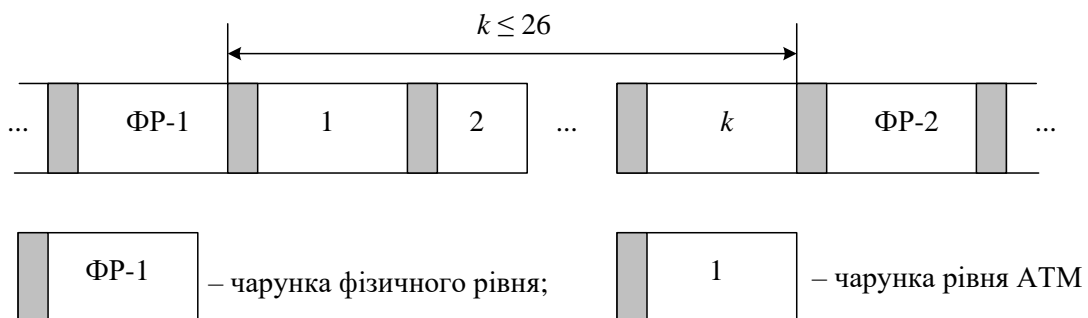


Рис. 7.12. Передача чарунок АТМ неперервним потоком

Максимальна відстань між суміжними чарунками фізичного рівня становить 26 чарунок рівня АТМ. Після 26-ти чарунок рівня АТМ обов'язково вставляється чарунка фізичного рівня, що несе службову інформацію експлуатації й технічного обслуговування, аналогічну інформації, що переноситься в

системі SDH секційним заголовком SOH і трактовим заголовком POH.

Відношення 26:27 еквівалентно відношенню 149,760 Мбіт/с до 155,520 Мбіт/с або 599,040 Мбіт/с до 622,080 Мбіт/с. Таким чином, система передачі на основі чарунок має таку ж пропускну спроможність для транспортування чарунок, як STM-1 і STM-4 відповідно.

Якщо швидкості потоку чарунок рівня АТМ недостатньо, для узгодження швидкостей вставляються порожні чарунки.

Чарунки експлуатації й технічного обслуговування (ЕТО) фізичного рівня повинні відрізнятися від чарунок АТМ, що здійснюється за рахунок присвоєння чарункам ЕТО фізичного рівня унікальних заголовків.

Розміщення чарунок у кадрах системи PDH. Порядок розміщення чарунок у кадрах систем плезіохронної цифрової ієрархії (PDH) визначає рекомендація G. 804. Фактично збережені повністю тільки бітові швидкості PDH, визначені в рекомендації G.702. Стара структура кадрів PDH частково замінена на нову, котра здатна підтримувати транспортування чарунок АТМ і забезпечувати перенесення сигнальних елементів PDH.

Як приклад розглянемо порядок розміщення чарунок АТМ у кадрі потоку E1 зі швидкістю 2,048 Мбіт/с (рис. 7.13). Кадр E1 містить 32 байти, що повторюються з періодом 125 мкс. Байти 0 і 16 використовуються для синхронізації й інших службових цілей. Інші 30 байтів використовуються для передавання чарунок. Отже, у цьому випадку здійснюється перенесення чарунок зі швидкістю 1,920 Мбіт/с.

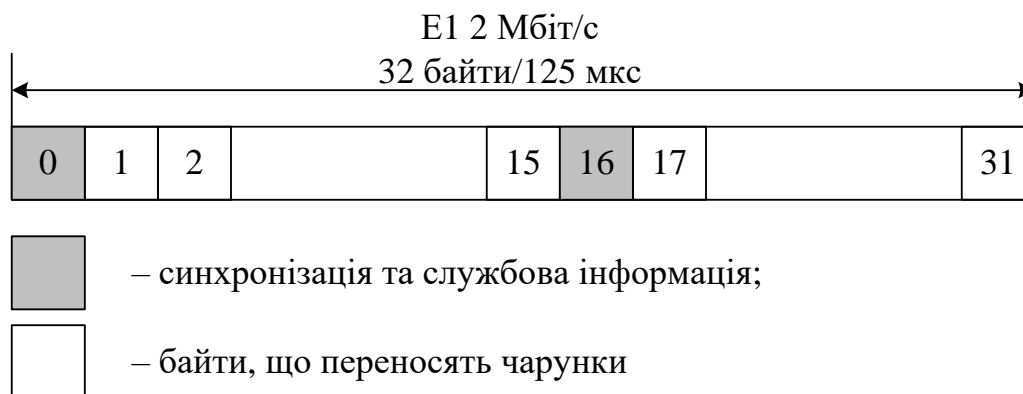


Рис. 7.13. Перенесення чарунок АТМ в кадрі E1

Контроль, виявлення та виправлення помилок у заголовку. Суттєвого поліпшення семантичної прозорості мережі АТМ можна досягнути за умови захисту заголовка чарунки АТМ хоча б від одиночних помилок. У цьому разі найбільш придатним є адаптивний механізм, який забезпечує корекцію одиночних помилок і виявлення множинних.

Для захисту заголовка найдоцільніше застосовувати коди БЧХ, що є циклічними кодами з великим вибором довжини кодової комбінації та широким спектром можливостей виправлення помилок. У чарунці АТМ заголовок становить 5 байтів. Для поля контролю помилок відведено 8 бітів. Цього цілком достатньо, щоб виправляти одиночні помилки і виявляти до 89 % множинних помилок.

Розглянемо, в чому полягає сутність протоколу формування поля контролю помилок у заголовку. Кожен передавач чарунок АТМ підраховує значення поля контролю для перших чотирьох байтів заголовка і результат заносить у п'ятий байт. Значення поля є остачею від ділення (за модулем 2) добутку значення інформаційної частини та старшого ступеня заданого твірного полінома x^8 на твірний поліном $x^8 + x^2 + x + 1$. Устаткування передавача підраховує цю остачу й додає до неї за модулем 2 фіксовану комбінацію 01010101. Ця сума й заноситься в поле контролю помилок заголовка.

Поле контролю помилок у заголовку дає змогу виявляти й виправляти (коригувати) у заголовку чарунки однобітові помилки, а також виявляти до 89 % багатобітових помилок і стирати (відкидати) такі чарунки. Обидві ці можливості реалізуються устаткуванням приймання чарунок.

Розмежування чарунок. У будь-якій системі з комутацією пакетів (наприклад, Х.25) приймальний вузол має бути здатним визначати їхні межі. У протоколі HDLC, де використовуються пакети змінної довжини, їх розмежовують за допомогою унікальної двійкової послідовності 01111110, яку прийнято називати прапором. Ця послідовність не повинна зустрічатися в пакеті. Для гарантування прозорості дані підлягають спеціальній процедурі – вставленню бітів, завдяки чому прапорова комбінація всередині пакета не утворюється. У мережах АТМ можна

застосовувати аналогічний механізм, але його використання на високих швидкостях, що типово для АТМ, не оптимальне.

Зараз досліджено три варіанти розмежування пакетів (чарунок) АТМ, котрі ґрунтуються на використанні порожніх чарунок, на організації регулярної кадрової структури та на перевірці поля контролю помилок у заголовку чарунки. Кожен варіант можна описати діаграмою (рис. 7.14), яка має три стани – “Пошук”, “Передсинхро” і “Синхро”.

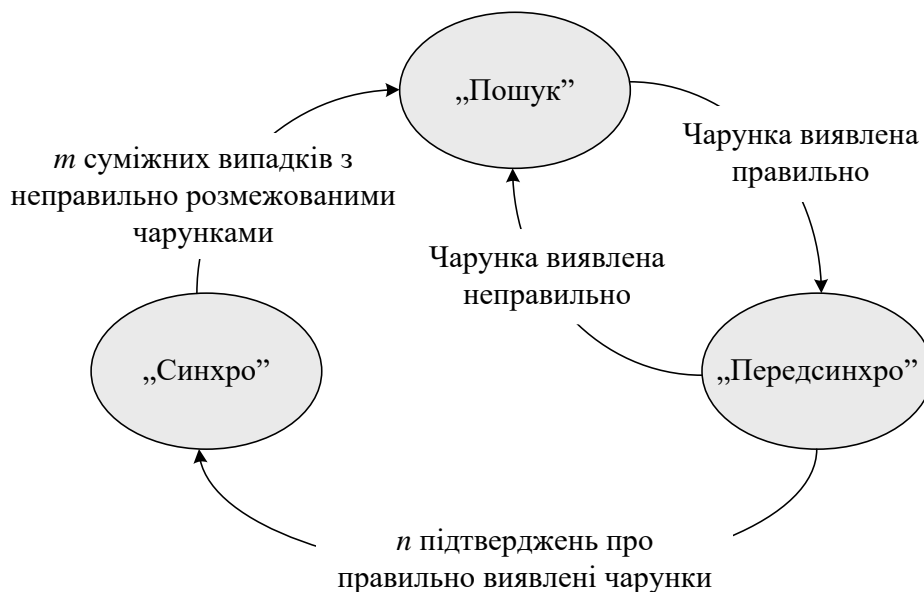


Рис. 7.14. Діаграма реалізації розмежування чарунок

У стані “Пошук” система за допомогою деякого механізму біт за бітом перевіряє, чи не визначена межа чарунки. Якщо межа визначена, то стан змінюється на “Передсинхро”, де межі перевіряються чарунка за чарункою. Якщо виявлено n таких, що йдуть одна за одною, меж, то система переходить у стан “Синхро”. Система гадатиме про зрив синхронізації лише тоді, коли буде виявлено t таких, що йдуть один за одним, випадків втрати чарункових меж. Параметри n і t визначають швидкість, з якою система входить у синхронізм і виявляє його втрату.

Розглянемо ці можливі варіанти розмежування чарунок.

Перший варіант – це *розмежування з використанням порожніх чарунок*. Порожні чарунки, що вставляються для узгодження швидкості цифрового тракту, характеризуються особливим значенням заголовка. У стані “Пошук” це значення

відшукується біт за бітом у вхідному бітовому потоці. У стані “Передсинхро” воно перевіряється чарунка за чарункою, щоб підтвердити правильність виділення межі. Для цього можна використати задану кількість правильно визначених меж порожніх чарунок. Та оскільки порожні чарунки виявляються в тракті лише тоді, коли немає корисної інформації, то може пройти досить тривалий час до появи наступної порожньої чарунки. Тому довірчий інтервал, протягом якого приймається рішення про входження в синхронізм, може бути значним. Те саме відбувається й у стані “Синхро”.

Перед прийняттям рішення про зрив синхронізації також може пройти тривалий час, тому що в разі великих навантажень завжди існує певна ймовірність події, за якої протягом цього інтервалу порожніх чарунок немає. Крім того, потрібно брати до уваги механізм розмежування, який може ідентифікувати заголовок чарунки, що має корисну інформацію, як перекручений заголовок порожньої чарунки.

Другий варіант – *розмежування з організацією регулярної кадрової структури*. Щоб уникнути помилкової ідентифікації заголовків, можна використовувати перевірку заголовків періодично вставлених порожніх чарунок. Така перевірка має багато спільного з першим варіантом і є окремим випадком розмежування з використанням порожніх чарунок, у якому порожні чарунки вставляються через однакові проміжки часу. Це дає гарантію того, що чарунка, яка надійшла через інтервал T після порожньої чарунки, теж порожня.

У стані “Пошук” система виявляє заголовки періодичних порожніх чарунок. Виявивши заголовок вставленої чарунки, система переходить у стан “Передсинхро” й очікує аналогічного заголовка, який надійде через період T . Для досягнення стану “Синхро” потрібно n підтверджень, що йдуть одне за одним.

За такого варіанта користувач не може навмисно вставити значення заголовка в інформаційне поле, бо сам передавач через однакові проміжки часу T вставляє особливі чарунки. Період T вибирають на основі компромісу між ефективністю передавання та потрібною тривалістю синхронізації. Справді, вставлення порожніх чарунок сприяє зниженню пропускну здатності

цифрового тракту. Але чим менший період T , тим швидше система входить у стан синхронізації.

Нарешті, третій варіант – *розмежування з використанням поля контролю помилок у заголовку*. Цей спосіб використовує кореляцію між бітами заголовка та відповідними контрольними бітами, записаними в поле контролю механізмом виявлення та виправлення помилок.

У стані “Пошук” процес розмежування виконують, перевіряючи (біт за бітом, байт за байтом) збіг контрольних бітів із переданими даними способом ділення їх на твірний поліном. Якщо остача (контрольні біти) не відповідає переданій двійковій послідовності заголовка, то перевірку повторюють зі зсувом на один біт у бітовому потоці. За одним збігом система переходить у стан “Передсинхро”. Після отримання n підтверджень про відповідність остачі (синдрому) прийнятої двійкової послідовності заголовка система переходить у стан “Синхро”. З нього система може перейти в стан “Пошук” у тому разі, якщо m разів поспіль остача (синдром) не відповідатиме прийнятій послідовності.

Навмисна або випадкова імітація в інформаційному полі контрольних бітів циклічного поля може призвести до неправильної синхронізації або збільшення часу входження в синхронізм. Для усунення цього явища проводять скремблювання, що рандомізує біти інформаційного поля. Це гарантує псевдовипадкову послідовність бітів інформаційного поля та мізерність імовірності синдрому в інформаційному полі. Такий метод розмежування чарунок виявився найефективнішим і ITU-T прийняла його до реалізації (рекомендація I.432).

Зрозуміло, що параметри n і m впливають на характеристики процесу розмежування чарунок, тому запропоновано такі їх значення: $n = 6$, $m = 7$ – для систем передавання з синхронною цифровою ієрархією; $n = 8$, $m = 7$ – для системи передавання на основі чарунок.

У системах передавання з синхронною цифровою ієрархією вміст інформаційного поля скремблюють за допомогою скремблера, що самосинхронізується, з поліномом $x^{43} + 1$. Даний скремблер має функціонувати лише в разі перебування механізму розмежування в станах “Передсинхро” та “Синхро” і

виконуватися в стані “Пошук”. Для інтерфейсів на основі чарунок рекомендація I.432 встановлює розподілений скремблер 31-го порядку.

Розрахунки показують, що для систем передавання з синхронною цифровою ієрархією і STM-1 (155 Мбіт/с) навіть за ймовірності помилки на біт 10^{-4} механізм розмежування чарунок перебуватиме в стані “Синхро” в середньому близько одного року, а після втрати синхронізації потрібно 28 мкс, щоб знову ввійти в стан “Синхро”.

Узгодження швидкості потоку чарунок. Якщо для передавання інформації користувач не має призначених чарунок, то вставляються порожні чарунки рівня АТМ або чарунки ЕТО фізичного рівня (щоб адаптувати потік чарунок до двійкової швидкості передавання). На приймальному боці порожні чарунки відкидатимуться. Вставлення та відкидання порожніх чарунок виконують функцію узгодження швидкості потоку чарунок. Порожні чарунки ідентифікуються за стандартизованою двійковою комбінацією в заголовку: 1-й байт – 00000000; 2-й байт – 00000000; 3-й байт – 00000000; 4-й байт – 00000001; 5-й байт – дійсне значення поля контролю помилок у заголовку.

Ці комбінації використовуються для всієї мережі АТМ. Кожен байт інформаційного поля порожньої чарунки заповнюється комбінацією 01101010.

7.5. Рівень АТМ

Характеристики рівня АТМ не залежать ні від фізичного середовища передавання, ні від вигляду переданої інформації. Він виконує такі основні функції:

- мультиплексування та демультиплексування чарунок;
- перетворення ідентифікаторів віртуальних шляхів і віртуальних каналів;
- генерація або вилучення заголовка чарунки;
- загальне управління потоком в інтерфейсі “користувач – мережа”.

На передавальному боці реалізується механізм мультиплексування чарунок, що надходять від різних джерел, в

один потік пакетів АТМ. На приймальному боці механізм демультимплексування розбиває надходжуваний потік на складові, що відповідають ідентифікаторам віртуальних шляхів і віртуальних каналів (вони будуть розглянуті далі).

Функціональна характеристика рівня безпосередньо АТМ подана ІТУ-Т в рекомендації І.150, а специфікація його – в рекомендації І.361.

Базовим елементом рівня АТМ є чарунка. Загальний вигляд формату чарунки АТМ був наведений на рис. 7.1. Структура заголовків чарунок АТМ зображена на рис. 7.15.

Заголовок чарунки в інтерфейсі “користувач – мережа” (рис. 7.14, а) має такі поля:

- загального управління потоком GFC (Generic Flow Control) розміром 4 біти;
- ідентифікатора віртуального шляху VPI (Virtual Path Identifier) розміром 8 бітів;
- ідентифікатора віртуального каналу VCI (Virtual Channel Identifier) розміром 16 бітів;
- типу корисного навантаження PT (Payload Type) розміром 3 біти;
- пріоритету втрати чарунки CLP (Cell Loss Priority) розміром 1 біт;
- контролю помилок у заголовку HEC (Header Error Control) розміром 8 бітів.

Заголовок чарунки в мережному інтерфейсі (рис. 7.15, б) відрізняється від заголовка в інтерфейсі “користувач – мережа” тим, що в ньому не використовується поле загального управління потоком, а його біти віддані полю ідентифікатора віртуального шляху, довжина якого збільшена з 8 до 12 бітів.

Поле загального управління потоком GFC, що складається з 4 бітів, призначене, згідно з рекомендацією І.150, для управління навантаженням у з'єднаннях “користувач – мережа” з метою захисту від перевантажень у дво- та багатоточкових конфігураціях доступу. Поле GFC використовується також для контролю навантаження, створюваного кінцевими пристроями користувача, але воно не може керувати потоком, створеним мережею.

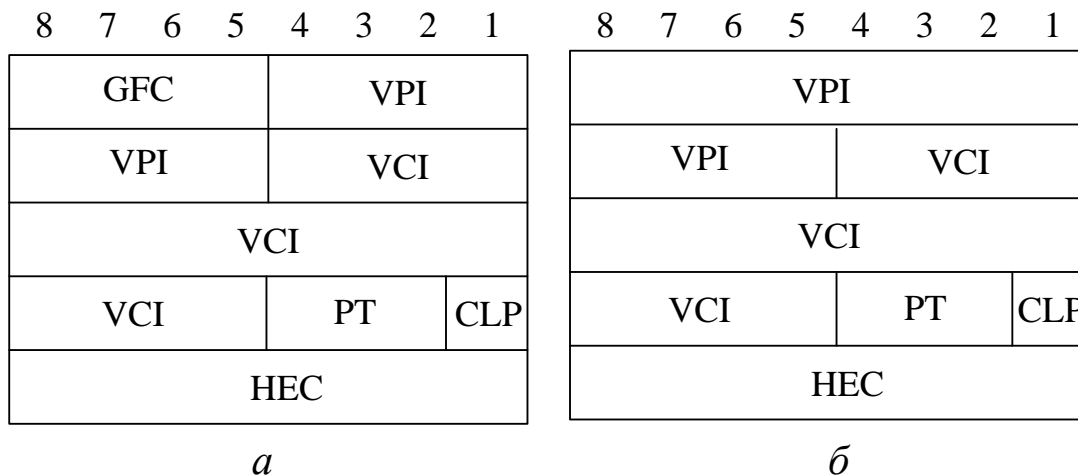


Рис. 7.15. Структура заголовка чарунки АТМ в інтерфейсі:
a) “користувач – мережа”; *б)* у мережному інтерфейсі

Поле ідентифікатора віртуального шляху VPI займає 8 бітів в інтерфейсі “користувач – мережа” і 12 бітів – у мережному інтерфейсі, що розширює можливості маршрутизації.

Поле ідентифікатора віртуального каналу VCI разом з полем VPI становить маршрутне поле чарунки. Поле VCI займає 16 бітів в інтерфейсі “користувач – мережа” та в мережному інтерфейсі.

Кількість бітів, використовуваних для маршрутизації, встановлюється за згодою між користувачем і мережею. Для визначення позицій, використовуваних для маршрутизації бітів усередині полів VPI та VCI, ІТУ-Т встановила такі правила:

- біти, використовувані в полі VPI чи VCI, мають бути суміжними;
- бітова комбінація завжди повинна починатися з меншого значущого біта відповідного поля;
- біти, що не використовуються ні користувачем, ні мережею, повинні встановлюватися на нуль.

Поле типу корисного навантаження PT виконує функцію ідентифікації користувальних чарунок, а також чарунок експлуатації, технічного обслуговування та управління ресурсами. Для чарунок, що несуть користувальну інформацію, передбачено можливість індикації навантаження, а для протоколу

рівня адаптації АТМ 5-го типу – індикацію “користувач рівня АТМ – користувачеві такого ж рівня”.

За наявності перевантаження будь-який перевантажений мережний вузол може модифікувати значення біта індикації перевантаження з 0 на 1 всередині поля типу корисного навантаження РТ чарунок користувача. Це дає змогу інформувати одержувача про виникнення в мережі перевантаження. У свою чергу одержувач може інформувати користувача, який передає інформацію, про необхідність зниження швидкості генерації чарунок.

Поле пріоритету втрати чарунки CLP використовується для зазначення явного пріоритету втрати чарунки. Якщо в це поле записана 1, то в разі виникнення перевантажень дана чарунка може бути відкинута мережним вузлом, а якщо записаний 0, то чарунка має високий пріоритет і повинна бути збережена.

Пріоритет втрати чарунки встановлюється користувачем або постачальником послуг. Чарунки, що належать джерелам з постійною швидкістю передавання, завжди повинні мати пріоритет порівняно з чарунками, що належать джерелам зі змінною швидкістю передавання. Якщо передаються чарунки, що належать джерелу зі змінною швидкістю передавання, частині чарунок може присвоюватися 1, а частині – 0. Це дає змогу розділити потік чарунок надвоє: одна частина потоку обумовлює якість обслуговування ($CLP = 0$); втрата чарунок другої частини не дуже позначається на якості обслуговування ($CLP = 1$).

На вузлах доступу можуть перевірятися параметри потоку користувача, а на транзитних вузлах – параметри мережного навантаження. Якщо параметри потоку перевищуватимуть встановлені угодою, то в частині чарунок значення поля CLP може змінюватися з 0 на 1. У разі перевантажень на інших вузлах ці чарунки можуть скидатися.

Поле контролю помилок у заголовку НЕС на рівні АТМ не заповнюється і не перевіряється. Механізм контролю помилок у заголовку визначений рекомендацією I.432.

Віртуальні канали та віртуальні шляхи. На рівні АТМ є два ієрархічні шари (віртуальних каналів і віртуальних шляхів), основне завдання яких – транспортування чарунок АТМ. Поняття

віртуальних каналів і віртуальних шляхів визначені ІТУ-Т в рекомендації I.113. Поняття *віртуальний канал* VC (Virtual Channel) використовується для опису односпрямованого передавання чарунок, що мають ідентифікатор віртуального каналу, а поняття *віртуальний шлях* VP (Virtual Path) описує односпрямоване передавання чарунок, які належать віртуальним каналам і мають ідентифікатор віртуального шляху.

Шлях передавання даних може містити декілька віртуальних шляхів, а кожен віртуальний шлях – декілька віртуальних каналів (рис. 7.16). Розглядаючи шари віртуальних каналів і віртуальних шляхів рівня АТМ, корисно визначити такі поняття, як “ланка віртуального каналу”, “ланка віртуального шляху”, “з’єднання віртуальних каналів” і “з’єднання віртуальних шляхів”.

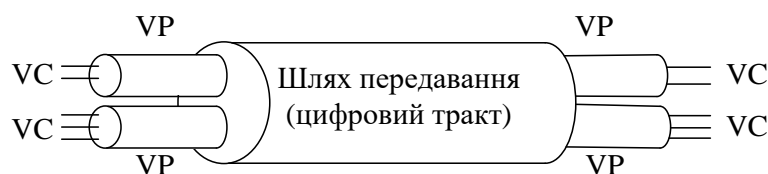


Рис. 7.16. Співвідношення між шляхом передавання, віртуальними шляхами та віртуальними каналами

Ланка віртуального каналу є частиною з’єднання між точкою, у якій чарункам присвоюється значення ідентифікатора віртуального каналу, і точкою, в якій цей ідентифікатор транслюється або заміняється. Аналогічно *ланка віртуального шляху* визначається точками, де ідентифікатори віртуальних шляхів призначаються, транслюються або заміняються. Послідовність ланок віртуального каналу називається *з’єднанням віртуальних каналів*, а послідовність ланок віртуального шляху – *з’єднанням віртуальних шляхів* (рис. 7.17).

Широкосмугова цифрова мережа інтегрального обслуговування на технології АТМ орієнтована на з’єднання, тому кожне з’єднання характеризуватиметься своїм ідентифікатором віртуального каналу VCI. При звільненні з’єднання значення VCI звільняється і може бути присвоєне іншому з’єднанню. Перевагою такого принципу призначення VCI

є використання його різних значень для забезпечення служб типу мультимедіа. Це дає змогу добавляти або віднімати віртуальні канали під час з'єднання користувача. Наприклад, служба відеотелефонії може починатися тільки з мови (один VC), а відео може бути добавлено або вилучено по окремому віртуальному каналу. Сигналізація також здійснюватиметься по окремому віртуальному каналу.

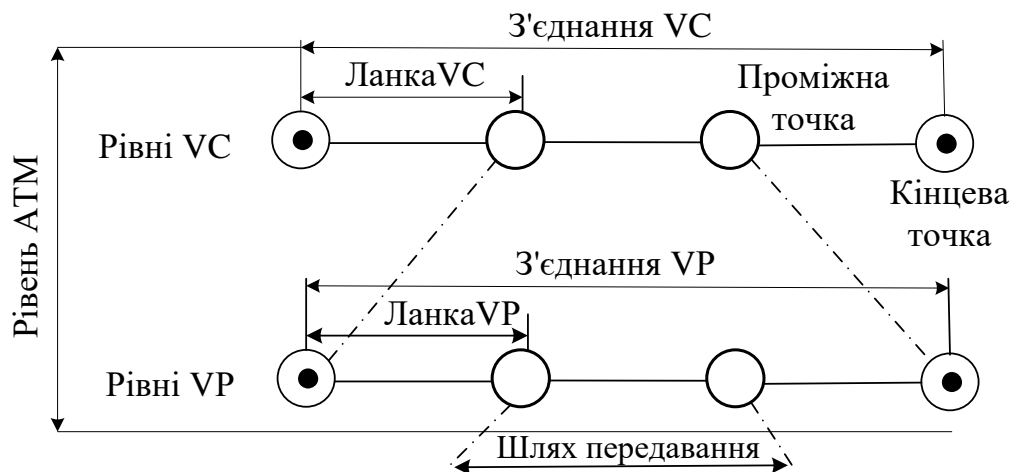
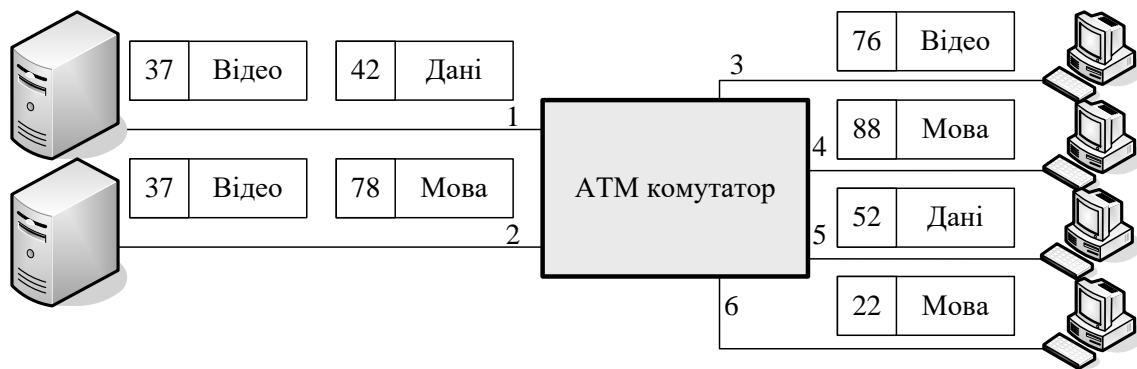


Рис. 7.17. Співвідношення між шарами рівня АТМ

Ідентифікатори віртуальних каналів і віртуальних шляхів у загальному випадку потрібні лише для однієї ланки. У з'єднаннях віртуальних каналів і віртуальних шляхів значення їх ідентифікаторів повинні змінюватися в пристроях, що комутують віртуальні канали і віртуальні шляхи.

Розглянемо приклад переміщення чарунок від джерела до одержувача. На рис. 7.18 наведені приклади віртуальних з'єднань через комутатор АТМ. Комутатор має таблицю з'єднань (або таблицю маршрутизації), що містить відповідності між вхідними й вихідними VPI/VCI і портами комутатора.

При надходженні чарунки комутатор аналізує значення VPI/VCI у заголовку. Припустимо, що вхідний VPI/VCI – 0/37. Оскільки чарунка надійшла на порт 1, комутатор аналізує запис у таблиці для порту 1 і виявляє, що чарунка повинна бути спрямована в порт 3. Крім того, при посилянні на порт 3 необхідно поміняти VPI/VCI чарунки на значення 0/76.



	Порт	VPI/VCI	Порт	VPI/VCI
Відео	1	0/37	3	0/76
Дані	1	0/42	5	0/52
Відео	2	0/37	6	0/22
Мова	2	0/78	4	0/88

Рис. 7.18. Приклад комутації чарунок АТМ

Таким чином, заголовок чарунки змінюється при її проходженні через комутатор. Значення VPI/VCI є значущим тільки відносно даного інтерфейсу. Дійсно, у прикладі значення “37” використовується для обох інтерфейсів, але не виникає двозначності, оскільки вони є фізично різними. Існує окремий запис для значення 37 порту 2, якому, звичайно, відповідає інший пункт призначення.

Таким чином, комбінація значень VPI/VCI дозволяє мережі ставити у відповідність конкретну чарунку конкретному з’єднанню, і отже, направляти чарунку за призначенням.

У розглянутій вище таблиці з’єднань комутатор VPI-0/VCI-37 транслюється в VPI-0/VCI-76 з тим же значенням віртуального шляху (рис. 7.18). Припустимо, що на транспортній мережі необхідно з’єднати два вузли за допомогою АТМ. Очевидно, було б добре мати пучок з’єднань. Тоді можливо встановлювати й роз’єднувати віртуальні канали між двома пунктами без звернення до транспортної мережі й, що більш важливо, без виконання протоколів з’єднання транспортної мережі. У цьому власне й полягає значення віртуального шляху. На рис. 7.19 показаний віртуальний шлях VPI4, що містить два віртуальних

канали. Ці віртуальні канали комутуються як пучок і направляються далі в мережу без зміни значень VCI.

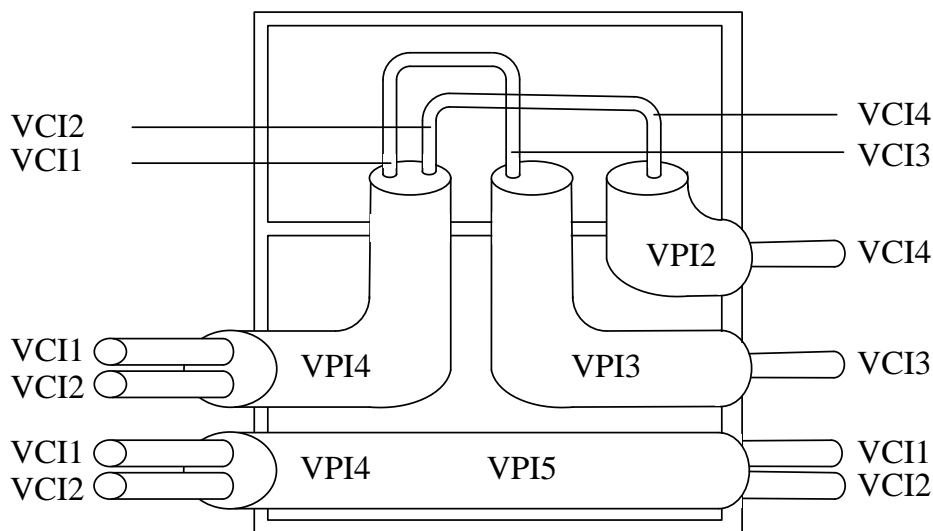


Рис. 7.19. Комутатор віртуальних шляхів і віртуальних каналів

Мережа не змінює значення VCI і розглядає тільки поле VPI. Поле VPI може змінюватися, але пучок у цілому проходить через мережу як єдиний об'єкт. За необхідності додавання ще одного каналу в пучок має взаємодіяти тільки кінцеве обладнання. Немає необхідності перенастроювати мережу й звертатися до оператора мережі. Такий тип обслуговування називається службою віртуального шляху.

З рис. 7.18 видно, що у комутаторах віртуальних каналів закінчуються ланки обох віртуальних каналів і ланки віртуальних шляхів. Отже, у комутаторі віртуальних каналів замінюються ідентифікатори віртуальних шляхів і віртуальних каналів. З огляду на це можна сказати, що комутатор віртуальних каналів завжди є і комутатором віртуальних шляхів.

У ШЦМІО можуть підтримуватися й напівпостійні з'єднання, що транспортують велику кількість чарунок по одночасно діючих віртуальних каналах (концепція "віртуальних мереж"). Відповідно до цієї концепції в одній мережі АТМ загального користування одночасно може існувати величезна кількість віртуальних мереж різних відомств або корпорацій. Ресурси мережі загального користування розподіляються між

віртуальними мережами динамічно, забезпечуючи високу ефективність при достатній простоті управління.

Розглянемо ще один приклад. У мережі АТМ (рис. 7.20) між користувачами *A* та *B* встановлено з'єднання віртуальних шляхів. Воно транспортує чарунки двох віртуальних каналів, кожен з яких має свій ідентифікатор (VCI1 та VCI2), що не змінюється на вузлах, де відбувається зміна вхідного VPI на вихідний.

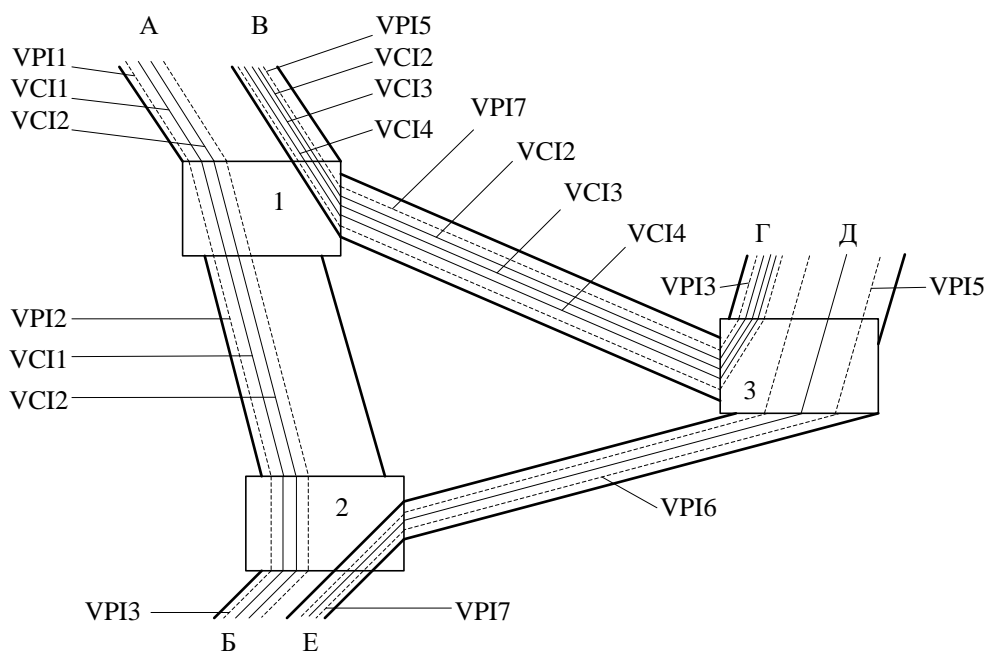


Рис. 7.20. Мережа АТМ, побудована на комутаторах віртуальних шляхів

З'єднання віртуальних шляхів між користувачами *B* і *Г* має три віртуальні канали з ідентифікаторами на кожній ланці – VCI2, VCI3 та VCI4. У ланці між користувачами *A* та *B* і комутатором 1 VCI2 використовується двічі. Однак це не створює труднощів, тому що різноманітні ідентифікатори віртуальних шляхів уможливають використання однакових VCI. З'єднання віртуальних шляхів між користувачами *Д* та *Е* має один віртуальний канал.

У загальному випадку в інтерфейсі “користувач – мережа” для поля VPI виділяється 8 бітів. Отже, у цифрових лініях доступу в мережу можна організувати одночасно $2^8 = 256$ віртуальних шляхів, у кожному з яких може бути до $2^{16} = 65\,536$

віртуальних каналів. У мережному інтерфейсі може бути організовано $2^{12} = 4096$ віртуальних шляхів.

З'єднання віртуальних каналів та віртуальних шляхів можуть встановлюватися між користувачами, користувачем і мережею та між комутаторами в мережі. Усі чарунки в з'єднанні віртуальних каналів транспортуються на одному маршруті; при цьому зберігається послідовність передавання чарунок.

З'єднання віртуальних каналів між користувачами встановлюються для транспортування інформації користувача або сигналізації. З'єднання між користувачем і мережею використовуються для доступу в мережу, тобто виконують функції перенесення інформації сигналізації між користувачем і мережею, а з'єднання між мережними вузлами – для транспортування трафіка маршрутизації та менеджменту.

З'єднання віртуальних шляхів між користувачами створюються лише на час проведення, наприклад, сеансу відеотелефонного зв'язку і містять з'єднання віртуальних каналів для перенесення інформації користувачів (мови, даних, рухомих зображень) та інформації сигналізації.

З'єднання (на постійній або напівпостійній основі) між користувачами можуть створюватися також для організації відомчих або корпоративних мереж, наприклад, для організації зв'язку Центрального банку з його відділеннями чи філіями.

З'єднання між мережними вузлами організовуються для створення з'єднань віртуальних каналів між абонентами цих вузлів в інтересах обміну маршрутною інформацією та інформацією менеджменту.

З'єднання між користувачами і мережею створюються для передавання агрегованого трафіка локальної обчислювальної мережі або АТС до комутатора доступу в ШЦМІО.

7.6. Рівень адаптації АТМ

Рівень адаптації (ATM Adaptation Layer, AAL) являє собою набір протоколів AAL1 – AAL5, які перетворюють повідомлення протоколів верхніх рівнів мережі АТМ в чарунки АТМ потрібного формату.

Інформаційні блоки, що надходять від кожної служби, можуть бути різними, мати специфічну структуру й висувати різні вимоги до їхнього перенесення в мережі АТМ.

З метою мінімізації кількості протоколів на рівні адаптації АТМ у рекомендації I.362 запропоновано здійснювати класифікацію служб за трьома основними ознаками:

- часова залежність між джерелом і одержувачем (існує чи ні);
- швидкість передавання джерела (джерела з постійною швидкістю передавання або джерела зі швидкістю передавання, що змінюється);
- режим встановлення з'єднання (зі встановленням з'єднання або без встановлення з'єднання).

У цей час ITU-T визначено 4 класи служб (рис. 7.21).

Характеристика	Класи			
	A	B	C	D
Часова залежність між джерелом і одержувачем	Існує		Не існує	
Швидкість передачі	Постійна	Змінна		
Режим з'єднання	Орієнтований на з'єднання			Не орієнтований на з'єднання

Рис. 7.21. Класифікація служб

У класі *A* між джерелом і одержувачем існує жорстка часова залежність. Швидкість передачі джерела постійна. Служба орієнтована на з'єднання. Типовим прикладом є передача мови з постійною швидкістю (64 кбіт/с) або транспортування по мережі АТМ цифрових потоків T1/E1. Надання такої послуги в мережах АТМ називається емуляцією каналу. Іншим прикладом може служити передача відео з постійною швидкістю.

У класі *B* також необхідно забезпечувати необхідні характеристики за часом і джитером доставки для служб, орієнтованих на з'єднання. Відмінність класу *B* від класу *A*

полягає в тому, що джерелами трафіка є джерела зі швидкістю передавання, що змінюється. Типовими прикладами є передача рухомих зображень і звуку.

У класі *C* не потрібно витримувати постійними часові характеристики з доставки пакетів. Служби орієнтовані на з'єднання, а джерела є джерелами зі швидкістю передавання, що змінюється. Прикладом може служити передача даних із установленням з'єднання й сигналізація.

Клас D відрізняється від *класу C* тільки тим, що *клас D* включає служби, не орієнтовані на встановлення з'єднання. *Клас D* призначений для передачі даних без установлення з'єднання.

Кожний протокол рівня AAL обробляє трафік визначеного класу. На початкових етапах стандартизації кожному класу трафіка відповідав свій протокол AAL, що приймав у кінцевому вузлі пакети від протоколу верхнього рівня й замовляв за допомогою відповідного протоколу потрібні параметри трафіка і якості обслуговування для даного віртуального каналу. При розвитку стандартів ATM така однозначна відповідність між класами трафіка й протоколами рівня AAL зникла, і сьогодні дозволяється використовувати для того самого класу трафіка різні протоколи рівня AAL.

Рівень адаптації AAL складається з декількох підрівней.

Нижній підрівень AAL називається підрівнем сегментації й реасемблювання SAR (Segmentation And Reassembly). Ця частина не залежить від типу протоколу AAL (і, відповідно, від класу трафіка, що передається) і займається розбиттям (сегментацією) повідомлення, прийнятого рівнем адаптації від протоколу верхнього рівня на чарунки ATM, постачанням їх відповідним заголовком і передачею рівню ATM для відправлення в мережу.

Верхній підрівень AAL називається підрівнем конвергенції CS (Convergence Sublayer). Цей підрівень залежить від класу трафіка, що передається. Протокол підрівня конвергенції вирішує такі завдання, як забезпечення часової синхронізації між передавальним і приймальним вузлами (для трафіка, що вимагає такої синхронізації), контролем і можливим виправленням помилок у користувальницькій інформації, контролем цілісності переданого пакета комп'ютерного протоколу.

Протоколи рівня адаптації АТМ для виконання своєї роботи використовують службову інформацію, що розміщується в заголовках рівня адаптації АТМ.

Після приймання чарунок, що прийшли по віртуальному каналу, підрівень сегментації й реасемблювання SAR протоколу ААL збирає послане по мережі вихідне повідомлення (яке в загальному випадку було розбито на кілька чарунок АТМ) за допомогою заголовків ААL, що для комутаторів АТМ є прозорими, оскільки містяться в 48-бітному полі даних чарунки.

Після складання вихідного повідомлення протокол ААL перевіряє службові поля кадру ААL і на їхній підставі ухвалює рішення щодо коректності отриманої інформації.

Жоден із протоколів ААL при передачі користувальницьких даних кінцевих вузлів не займається відновленням загублених або перекручених даних. Максимум, що робить протокол ААL, – це повідомляє кінцевий вузол про таку подію. Так зроблено для прискорення роботи комутаторів мережі АТМ, розраховуючи на те, що випадки втрат або перекручування даних будуть рідкими. Відновлення загублених даних (або ігнорування цієї події) надається протоколам верхніх рівнів, що не входять у стек протоколів технології АТМ.

Протокол ААL1, звичайно, обслуговує трафік класу *A* з постійною бітовою швидкістю, що характерний, наприклад, для цифрового відео й цифрової мови й чутливий до часових затримок. Цей трафік передається в мережах АТМ таким чином, щоб емулювати звичайні виділені цифрові лінії.

На рис. 7.22 зображена структура чарунки класу *A* для ААL1. Перший з 48 байтів навантаження чарунки АТМ використовується як заголовок даного протоколу.



Рис. 7.22. Структура чарунки протоколу ААL1

Заголовок виконує кілька функцій, у тому числі виявлення загублених чарунок і підтримку мітки часу для забезпечення

синхронізації між двома кінцевими системами. Також можливе використання цього заголовка для визначення границь байтів, що може знадобитися при емуляції з'єднання типу цифрового потоку E1.

Основною функцією протоколу AAL1 є відновлення швидкості вихідного цифрового потоку на приймальному боці. Як приклад розглянемо передачу мови зі швидкістю 64 кбіт/с. Передавач запам'ятовує відліки, наповнює ними чарунки й направляє останні в мережу з періодом близько 6 мс. Завданням приймача є відновлення вихідного потоку зі швидкістю 64 кбіт/с. Розглянемо роботу приймача (рис. 7.23).

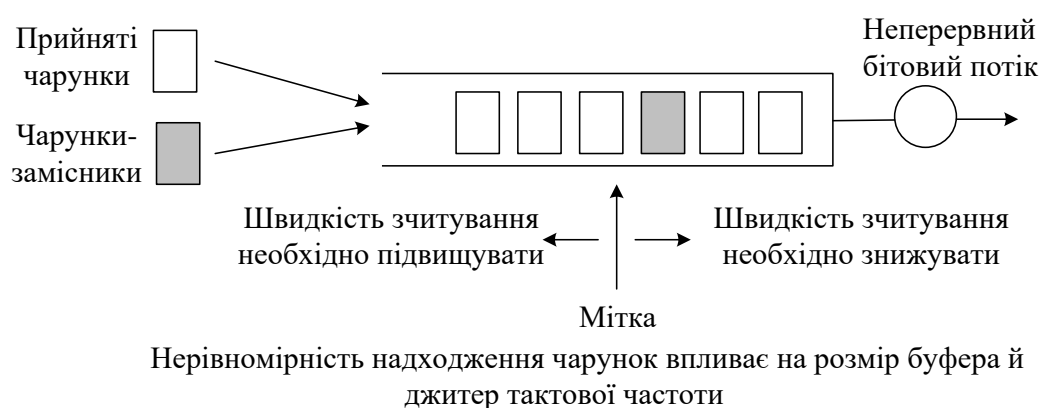


Рис. 7.23. Приклад відновлення швидкості цифрового потоку

Необхідно, щоб швидкість відновленого потоку збігалася зі швидкістю переданого потоку. Якщо швидкість зчитування з буфера буде великою (більше швидкості прибуття чарунок), то його вміст швидко вичерпається. Якщо швидкість зчитування буде малою, то буфер переповниться й почнеться втрата чарунок. Рішення полягає в тому, що приймач стежить за наповненістю буфера щодо середнього значення. Якщо буфер починає порожніти, то швидкість зчитування зменшується, якщо буфер починає наповнюватися – збільшується, тобто швидкість приймача вирівнюється щодо швидкості передавача.

Розмір буфера залежить від інтенсивності надходження чарунок з мережі. Чим більше нерівномірність надходження чарунок, тим більшим має бути буфер приймача. Фактично, джитер затримки чарунок, що виникає при проходженні через

мережу, безпосередньо відображається на розмірі буфера. Джитер затримки чарунок є дуже важливим фактором якості обслуговування.

Важливим моментом є виявлення втрати чарунок. Частина заголовка протоколу являє собою послідовний номер. Він призначений не для нумерації чарунок, а для виявлення втрати чарунок. Якщо послідовність у номерах відсутня, це означає втрату чарунки. Приймач вставляє на її місце чарунку – замісник, для того щоб швидкість відновленого потоку не змінилася. Цікаво, що за допомогою такої схеми можна емулювати з'єднання практично будь-якої швидкості.

Протокол AAL2 розроблений для передавання трафіка класу *B*. Він може бути важливий, оскільки надає можливість використання АТМ для підтримки нерівномірного трафіка.

Протокол AAL3/4 рекомендований ІТУ-Т для передавання даних службами зі встановленням з'єднань і службами без встановлення з'єднань за умови висунення високих вимог до достовірності інформації, що передається (звичайно використовується для передавання пульсуючого трафіка локальних мереж зі змінною бітовою швидкістю). Назва цього рівня адаптації відбиває його розвиток. Спочатку службам класу *C* і *D* були виділені 3-й і 4-й типи рівня адаптації АТМ, потім ці типи були об'єднані, тому рівень адаптації 3/4-го типу підтримує обидва класи служб.

Протокол AAL3/4 забезпечує негарантоване перенесення кадрів будь-якої довжини – від 1 до 65 535 байтів. З'єднання можуть бути встановлені площинами контролю (*C-plane*) або менеджменту (*M-plane*). Між двома рівноранговими об'єктами може бути встановлене одне або декілька з'єднань, проте комутація з'єднань не допускається.

Структура чарунки протоколу AAL3/4 наведена на рис. 7.24, з якого видно, що перед вихідним пакетом даних і після нього додаються блоки зі службовою інформацією. Отриманий блок розбивається на підблоки по 44 байти, до яких додаються 2 байти на початку й 2 байти наприкінці, що в сумі складає 48 байтів.

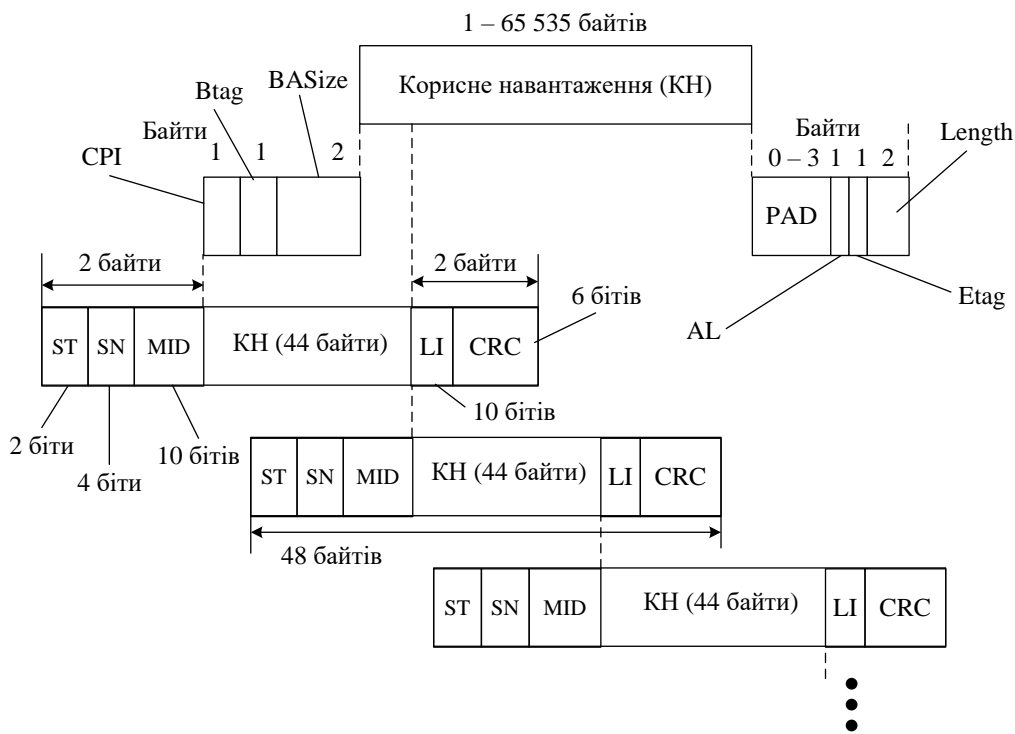


Рис. 7.24. Структура чарунки протокола AAL3/4

Поле доповнення PAD розміщується в кінці корисного навантаження. Довжина поля PAD повинна бути кратною 4 байтам, тобто 32 бітам. Тому довжина поля заповнення становить 0 – 3 байти. Інформації поле доповнення не несе.

Поле СРІ використовується для інтерпретації наступних полів. Воно показує лічильні одиниці для полів BASize і Length.

Передбачається, що поле СРІ буде використовуватися для ідентифікації функцій менеджменту рівня адаптації АТМ (контроль характеристик, виявлення несправностей, транспортування повідомлень експлуатації та технічного обслуговування).

У поле позначення початку Vtag записується однакове число, що змінюється (наприклад, збільшується) в кожному наступному блоці.

Поле “потрібна місткість буфера” BASize інформує приймальний пристрій про максимальні вимоги до місткості буфера.

Поле вирівнювання AL забезпечує 32-бітове вирівнювання довжини службової інформації наприкінці блока корисного

навантаження. Воно не несе жодної інформації і заповнюється нулями.

Поле позначення кінця Etag має таке значення, що було введено в поле позначення початку.

Показчик типу сегмента ST засвідчує, що блок даних є початком, продовженням чи закінченням повідомлення або односегментним повідомленням. Застосовується таке кодування: початок повідомлення – 10; продовження повідомлення – 00; закінчення повідомлення – 01; односегментне повідомлення – 11. Останній сегмент і сегмент, у який вмістилося повідомлення повністю, можуть мати менше октетів корисного навантаження, ніж довжина поля корисного навантаження (44 байти).

Поле індикатора довжини LI містить двійкове позначення кількості байтів корисного навантаження в чарунці.

Поле CRC використовується для виявлення помилок. У це поле записується результат підрахунку циклічної надлишкової перевірки, яка виконується над усім вмістом чарунки (ST, SN, MID, LI та корисним навантаженням).

Поле номера послідовності SN використовується для виявлення загублених або вставлених пакетів АТМ.

Ідентифікатор мультиплексування MID (Multiplexing Identifier) забезпечує мультиплексування за допомогою 10-бітового поля. Це дає змогу мультиплексувати трафік $2^{10} = 1024$ користувачів одним з'єднанням рівня АТМ типу “точка – точка”. У разі передавання даних без встановлення з'єднання ідентифікатор мультиплексування уможливорює почергове передавання блоків даних багатьох користувачів по одному постійному віртуальному з'єднанню рівня АТМ. Цим з'єднанням можуть транспортуватися пакети АТМ від одного або декількох терміналів без встановлення з'єднання через мережу АТМ до сервера або між двома локальними мережами. На рис. 7.25 зображено локальну обчислювальну мережу, термінали якої забезпечують обмін даних без встановлення з'єднання. З мережею АТМ локальна обчислювальна мережа сполучена шлюзом.

Вся інформація від терміналів транспортується віртуальним з'єднанням до сервера, який через ідентифікатор мультиплексування спрямовує прийняту від терміналів локальної

обчислювальної мережі інформацію адресатам мережі АТМ. Інформація маршрутизації перебуває на мережному рівні, і сервер має встановити відповідність між значенням ідентифікатора мультиплексування та інформацією мережного рівня, що транспортується тільки в першому сегменті. При мультиплексуванні в одному з'єднанні АТМ усі протокольні блоки даних одержують однакову якість обслуговування.

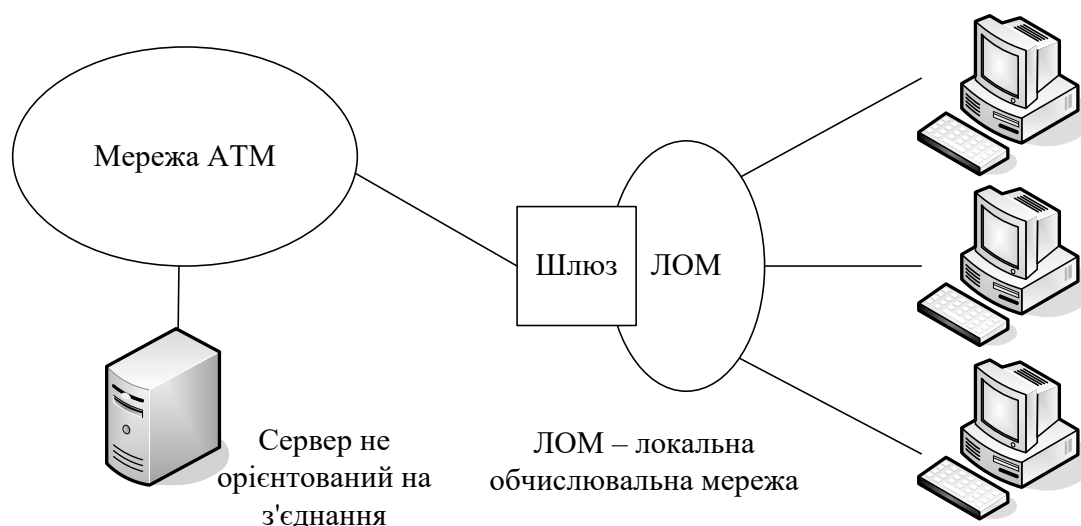


Рис. 7.25. З'єднання локальної обчислювальної мережі з мережею АТМ

Протокол AAL5 є спрощеним варіантом протоколу AAL3/4 і працює швидше, тому що вносить меншу надмірність (контрольна сума CRC обчислюється не для кожної чарунки, а для всього вихідного повідомлення в цілому).

З рис. 7.26 видно, що до пакета даних додається контрольна сума CRC, деяка службова інформація (UU, CPI, Length), а також доповнення (PAD) такого розміру, щоб результуюча довжина всієї конструкції являла собою ціле число 48-байтних підблоків. Останні є навантаженням чарунки АТМ. Для визначення останньої чарунки при складанні пакета на приймальному боці використовується один з бітів поля РТ заголовка чарунки АТМ.

На приймальному боці чарунки збираються в пакет на основі значення VPI/VCI. Для даного VPI/VCI збирається один великий пакет. Це означає, що в одному віртуальному каналі не повинно одночасно існувати чарунок, що несуть дані різних

пакетів. Зрозуміло, що цей тип обміну прийнятний тільки при невисокій вартості віртуального каналу.

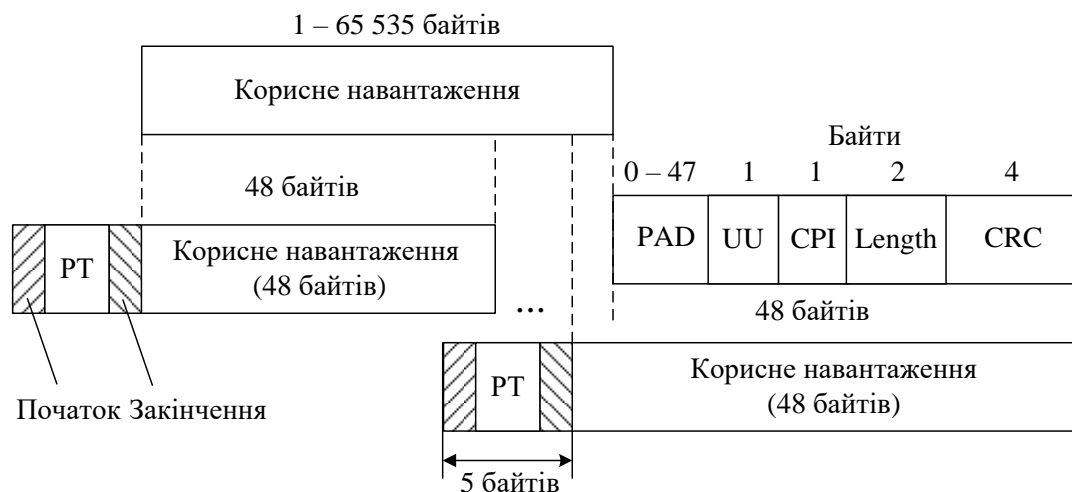


Рис. 7.26. Структура чарунки протоколу AAL5

Поле UU (“користувач – користувачеві”) використовується для прозорого передавання інформації користувача.

Поле CPI виконує ті самі функції, що й у рівні адаптації АТМ 3/4-го типу.

Поле довжини Length використовується для кодування у двійковому численні довжини корисного навантаження в байтах. Оскільки максимальна довжина кадру користувача може становити 65 535 байтів, то на поле довжини має відводитись 2 байти.

Спочатку протокол AAL5 розроблявся для передачі кадрів мереж Frame Relay, але тепер він найчастіше використовується для передачі будь-якого комп’ютерного трафіка (класи C і D).

Протокол AAL5 працює не тільки в кінцевих вузлах, але й у комутаторах мережі АТМ. Однак там він виконує службові функції, не пов’язані з передачею користувальницьких даних. У комутаторах АТМ протокол AAL5 підтримує службові протоколи більш високих рівнів, які займаються встановленням віртуальних з’єднань, що комутуються.

Існує певний інтерфейс між додатком, якому потрібно передати трафік через мережу АТМ, і рівнем адаптації AAL. За допомогою цього інтерфейсу додаток замовляє необхідну

послугу, визначаючи тип трафіка, його параметри, а також параметри якості обслуговування QoS. Технологія АТМ допускає два варіанти визначення параметрів QoS: перший – безпосереднє завдання їх кожним додатком, другий – призначення їх за замовчуванням залежно від типу трафіка. Останній спосіб спрощує завдання розроблювача додатка, тому що в цьому випадку вибір максимальних значень затримки доставки чарунок і варіації затримок здійснюється адміністратором мережі.

7.7. Архітектурні аспекти побудови мереж АТМ

Інтерес до впровадження в інформаційно-телекомунікаційних системах технології АТМ пояснюється багатьма чинниками, найважливішими з яких є:

- потреба в забезпеченні обміну рухомими та нерухомими зображеннями з високою якістю, тому що близько 80 % інформації людина звикла отримувати візуально;
- розвиток систем віддаленого оброблення даних, які потребують передавання величезних обсягів інформації в реальному масштабі часу;
- безперервне зростання вимог до створення високошвидкісних трактів зв'язку, що з'єднують локальні обчислювальні мережі і дають змогу застосовувати мультимедійні допоміжні програмні продукти;
- можливість в одній мережі забезпечувати як існуючі, так і служби майбутнього завдяки високій гнучкості мережі, без перебудови транспортної частини системи і лише внаслідок розроблення та впровадження відповідного термінального устаткування.

Світова практика побудови мереж АТМ загального користування свідчить, що впровадження їх доцільно починати на магістральній мережі, яка має бути мультисервісною і будуватися на принципах інтеграції з технологією ІР (рис. 7.27, 7.28).

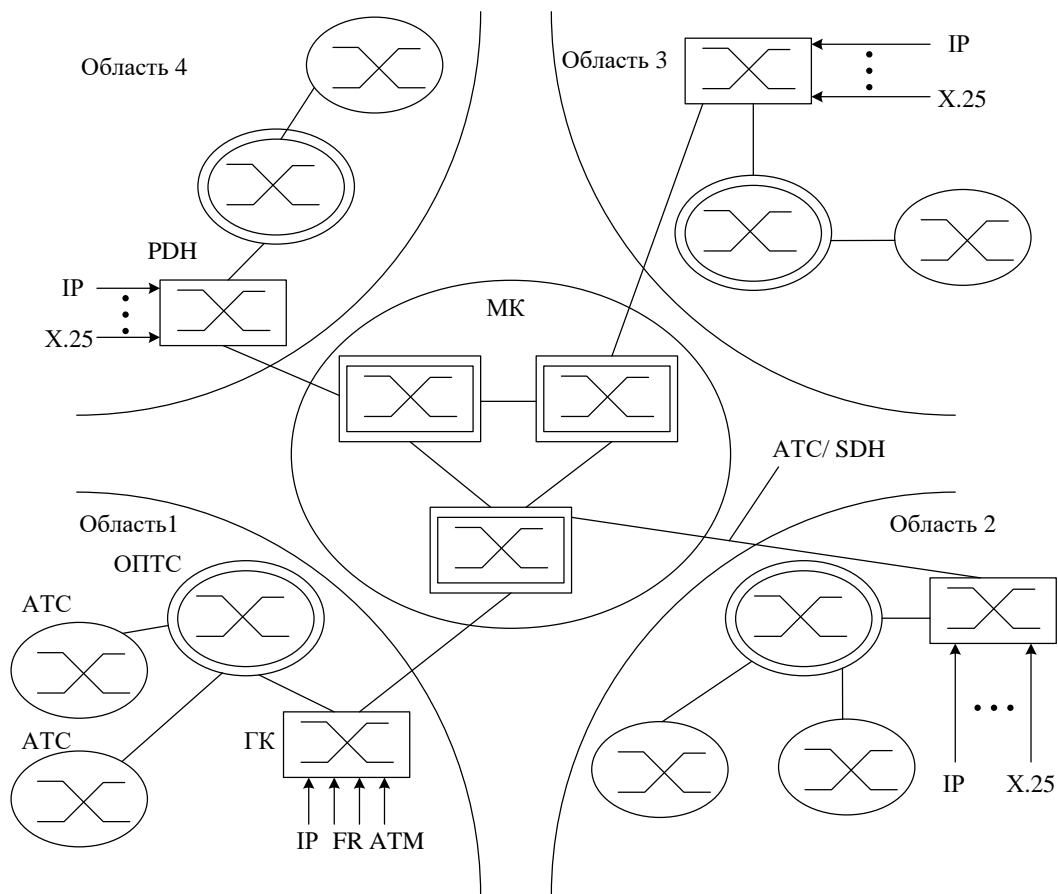


Рис. 7.27. Спрощена структура мультифункціональної магістральної мережі АТМ:

ГК – граничний АТМ комутатор; МК – магістральний АТМ комутатор; ОПТС – опорно-транзитна телефонна станція; FR – Frame Relay

Мережна структура АТМ ґрунтується на ієрархічному принципі, оскільки важко створити комутатори з достатньою кількістю портів і відповідною продуктивністю. Комутатори продуктивністю до 100 Гбіт/с (граничні комутатори) можна використати на першому рівні комутації, а продуктивністю до 2 Гбіт/с (магістральні комутатори) – на другому. Граничні комутатори забезпечують взаємодію мереж з різними протоколами роботи, а магістральні – транзитну комутацію. У невеликих за обсягом мережах граничний комутатор одночасно може виконувати функції магістрального.

До введення нової технології (протягом одного – двох років) на магістральній мережі можна використати кросову комутацію

та АТМ. Потім слід перейти до впровадження оперативної комутації.

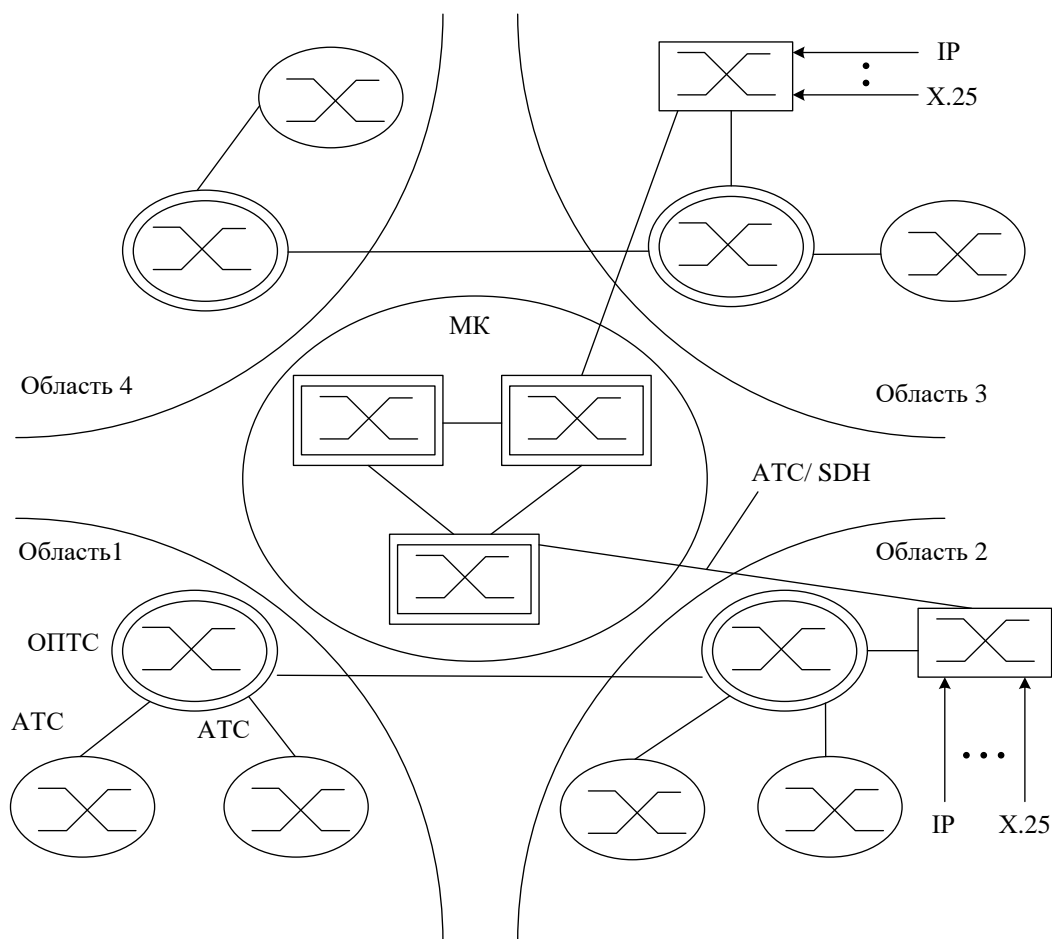


Рис. 7.28. Проміжний етап впровадження АТМ у магістральні мережі

Стосовно використання кросової комутації потрібно зазначити, що на магістральному рівні вимоги оперативності комутації обмежені плавною еволюцією мережної топології і відносно повільним збільшенням трафіка на існуючих лініях передавання. Відповідні зміни досить добре відслідковуються кросовою комутацією АТМ мережних трактів віртуальних шляхів. Магістральна мережа для телефонного трафіка на базі віртуальних шляхів являтиме собою повнозв'язану мережу.

Кросова комутація АТМ порівняно з аналогічною комутацією SDH має деякі переваги, до яких належать:

- досягнення плавної зміни смуги пропускання для надання послуг (на відміну від обмеженого набору в SDH);
- диференціація якості для різних послуг у реальному і нереальному масштабах часу (гарантування тривалості затримання, його девіації, ймовірності втрати і спотворення чарунки);
- досить точно виділення необхідної смуги пропускання для віртуальних шляхів відстеженням добових варіацій телефонного трафіка;
- перерозподіл смуги пропускання АТМ трактів на основі наданої пріоритетності.

Введення кросової комутації АТМ (рис. 7.29) дасть змогу вилучити крос-конектори SDH на первинній мережі, оскільки їх функції повністю перекриватимуться.

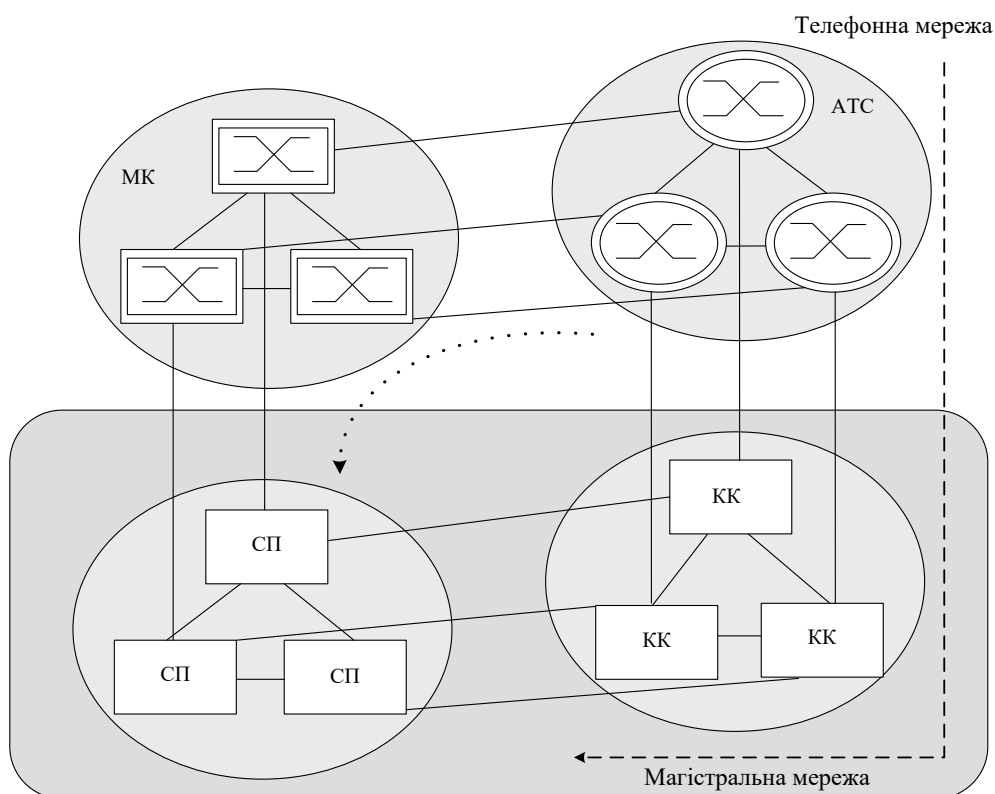


Рис. 7.29. Кросова комутація АТМ:

СП – система передавання; КК – крос-комутатор (штрихова лінія – взаємодія телефонної мережі з SDH до введення АТМ комутаторів, пунктирна – після введення АТМ комутаторів)

Схема мережі доступу, яка взаємодіє з магістральною мережею за допомогою граничних комутаторів, зображена на рис. 7.30.

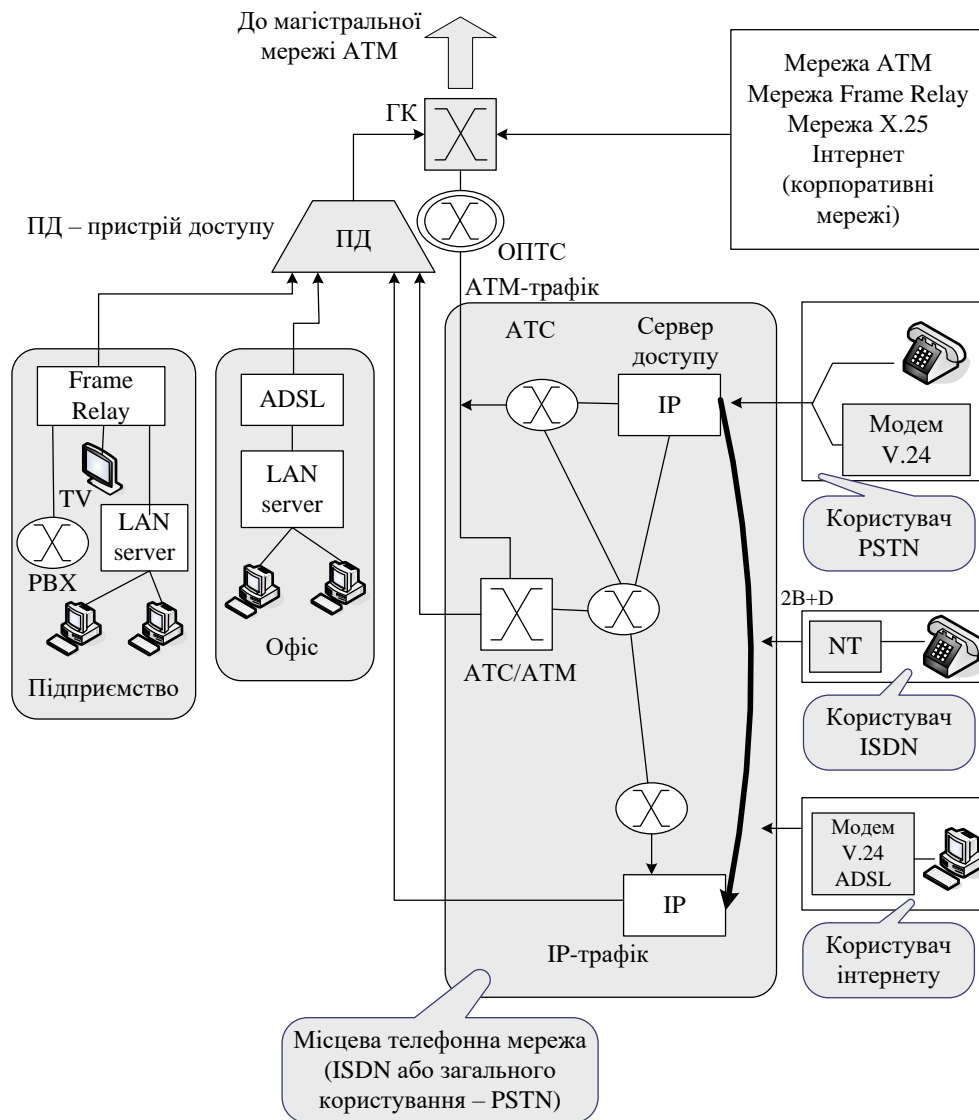


Рис. 7.30. Структура мережі доступу, яка взаємодіє з магістральною мережею за допомогою граничних комутаторів

Пристрої доступу (ПД) мультиплексують інформацію, що надходить від багатьох джерел (локальні мережі підприємств, організацій), котрі використовують різні протоколи (Frame Relay, АТМ тощо). Впроваджуючи АТМ на місцевій мережі, слід мати на увазі, що найближчим часом ця техніка не буде обслуговувати безпосередньо індивідуальних користувачів (наприклад, телефонних абонентів), оскільки вона призначена для

передавання широкосмугових потоків інформації (мінімальна стандартизована швидкість доступу абонента – 2 Мбіт/с). До мережі АТМ безпосередньо приєднуються професійні користувачі (організації, підприємства, установи), а індивідуальні, які працюють з невеликими обсягами інформації, ще якийсь час виходитимуть на цю мережу через існуючу телефонну мережу загального користування. Якщо індивідуальному користувачеві телефонної мережі загального користування потрібно буде передати великі обсяги інформації, то він має звернутися до послуг ІSDN або модемів технології DSL, розв’язавши в такий спосіб проблему високошвидкісного доступу абонента.

Викладене про магістральну мережу та мережі доступу стосується застосування накладеної стратегії впровадження АТМ, яка враховує одночасне використання інтегрованої стратегії, зокрема на місцевій телефонній мережі (рис. 7.31). З цією метою застаріле обладнання телефонних станцій (насамперед, транзитних) варто замінити новим, комутація на якому реалізується у вигляді комутації чарунок АТМ. Його інтерфейси передбачають взаємодію як з існуючою телефонною мережею (швидкість – 2 Мбіт/с), так і з широкосмуговими мережами за допомогою стандартизованих потоків АТМ.

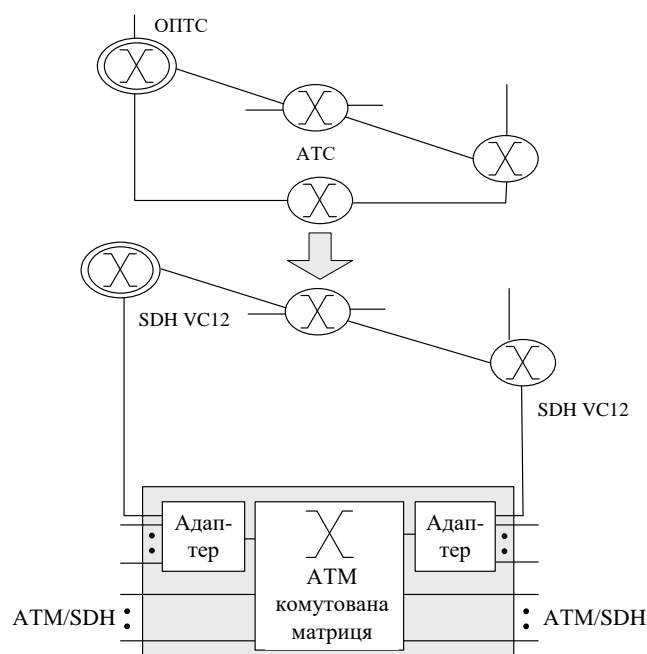


Рис. 7.31. Впровадження АТМ на місцевій телефонній мережі

Якщо навіть телефонна станція буде застосовуватись оператором мережі лише для надання вузькосмугових послуг (64 кбіт/с), то використання всередині комутатора комутаційної матриці АТМ дає змогу різко (у 2 – 3 рази) скоротити устаткування та споживану потужність, а також підвищити надійність і знизити вартість обслуговування. Коли з'являється потреба в наданні нових широкосмугових послуг, до складу станції можна ввести широкосмугові чарунки доступу та додаткові модулі програмного забезпечення.

На особливу увагу заслуговує проблема розвитку мережі Інтернет. Експонентне зростання кількості абонентів і тривале завантаження каналу породжує серйозні труднощі на існуючих телефонних мережах, які були використані в ролі мережі доступу до Інтернету і проектувалися насамперед для пропускання телефонного трафіка. За розрахунками, трафік Інтернету в Україні незабаром зрівняється за обсягом з телефонним. Щоб запобігти перевантаженню на місцевій мережі, потрібно на вході в місцеву телефонну мережу направити трафік Інтернету в мережах передавання даних. Для цього сервери доступу ІР треба розташовувати якомога ближче до користувача, розвантажуючи сполучені лінії та місцеві АТС (рис. 7.30).

Наведений опис архітектури мережі загального користування певною мірою умовний. Наприклад, для невеликих мереж наявність магістральних комутаторів необов'язкова, оскільки їхні функції можуть одночасно виконувати граничні комутатори. Пристрої доступу різних фірм-виготівників досить різноманітні за функціями; іноді вони здійснюють і комутацію.

У будь-якому разі мережу АТМ загального користування слід розглядати єдиною і такою, що складається з підмереж різних операторів (рис. 7.32), спільних систем сигналізації, нумерації й адресації та взаємопов'язаного управління. Спільними мають бути й протоколи взаємодії з іншими мережами. Крім того, устаткування повинно підтримувати вимоги, визначені постачальником послуг.

З усього сказаного можна зробити висновок, що технологія АТМ є найбільш ефективною для побудови транспортної мережі майбутнього, яка передає інформацію будь-якого вигляду.

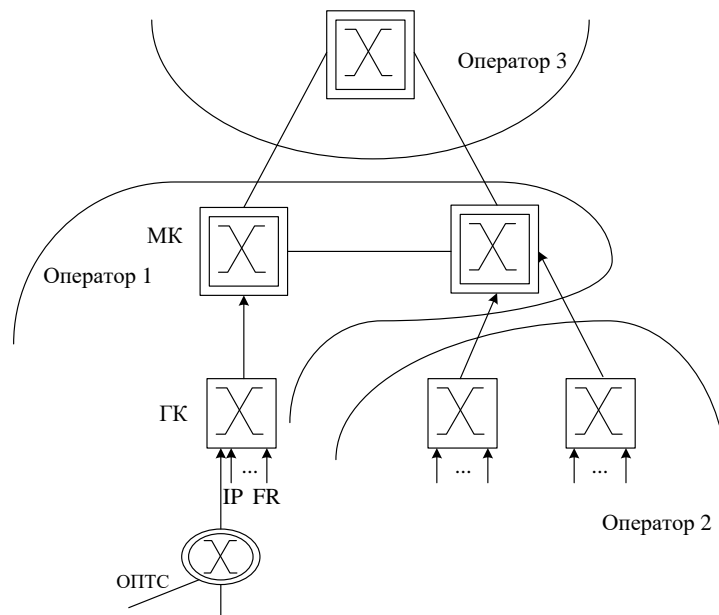


Рис. 7.32. Мережа АТМ загального користування, котра складається з підмереж різних операторів

Контрольні запитання

1. У чому полягає сутність режиму АТМ?
2. Чим характеризуються площини користувача, управління і менеджменту?
3. Які функції виконують підгрупи широкосмугового мережного закінчення В-NT1 і В-NT2?
4. Для чого призначені такі рівні: фізичний, АТМ і адаптації АТМ?
5. Що означають поняття “віртуальний канал” і “віртуальний шлях”?
6. Які функції виконує комутатор віртуальних шляхів і віртуальних каналів?
7. Чим характеризуються рівні адаптації АТМ 1 – 5-го типів?
8. У чому перевага рівня адаптації АТМ 5-го типу порівняно з іншими типами?
9. Чим характеризуються служби класів *A*, *B*, *C*, *D*?

8. СИНХРОНІЗАЦІЯ В ЦИФРОВИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ

8.1. Основні поняття й визначення

Поняття синхронізації досить багатозначне й, в залежності від конкретного змісту розв'язуваних завдань, може мати принципово різні значення. У системах електрозв'язку, наприклад, на різних рівнях взаємодії це поняття може мати такі значення:

- тактова синхронізація – виділення з періодичної структури робочого сигналу синхросигналу для підтримки роботи цифрових пристроїв і узгодження їх у часі на рівні тактових інтервалів;

- циклова синхронізація – визначення в цифровому потоці початку й кінця циклу або кодових груп різних джерел для їхнього правильного розподілу на прийманні;

- синхронізація пакетів, наприклад АТМ, тобто вирівнювання часових затримок і побудова правильної послідовності надходження пакетів при передачі інформації сигналів реального часу (телефонія, відео й т.д.);

- синхронізація обладнання, розміщеного в одному приміщенні або будинку, по тактових сигналах.

До цього переліку можна додати синхронізацію частот задавальних генераторів, обладнання аналогових систем передачі або інших систем із частотним розподілом каналів.

Незважаючи на розмаїтість додатків у всіх завданнях, у яких використовується поняття синхронізації має загальний сенс, що полягає у встановленні й підтримці необхідних часових співвідношень протікання процесів у часі. В інших випадках під синхронізацією розуміють процес підстроювання зв'язаних автоколивальних систем.

Основні завдання синхронізації можна сформулювати так:

- генерування детермінованих періодичних (ізохронних) сигналів, які називаються тактовими сигналами або сигналами синхронізації;

- встановлення зв'язку між генераторами (автоколивальними системами). У свою чергу це завдання можна

розділити на два – власне передачу сигналів синхронізації на відстань і відстеження тактової частоти на місці.

Далі розглянемо мережні аспекти й основні поняття синхронізації стосовно систем передачі й комутації. При такому обмеженні мережну синхронізацію можна розглядати як динамічний процес підстроювання автоколивальних систем пристроїв синхронізації за рахунок забезпечення взаємодії між ними. При цьому мають бути забезпечені такі умови:

- наявність декількох (не менше двох) автоколивальних систем, здатних самостійно генерувати тактові сигнали синхронізації;

- наявність зв'язків між ведучою й веденою системами для забезпечення взаємодії;

- наявність здатності веденої системи захоплювати й відслідковувати сигнали взаємодії.

Невиконання хоча б однієї з перерахованих умов виводить проблему з розряду мережної синхронізації.

8.2. Основні схеми розподілу сигналів синхронізації

Покажемо значення часових співвідношень між тактовими сигналами й сигналами даних (інформаційними) у процесі цифрової обробки. Для цього розглянемо приклади схем розподілу тактових сигналів, а потім один з основних принципів відстеження тактового сигналу, що називається принципом самосинхронізації.

Тактові сигнали необхідні для узгодження роботи цифрових пристроїв у процесі приймання й обробки даних, тобто для встановлення моментів ухвалення рішення (стробіювання) даних.

Спрощено взаємодію цифрових пристроїв можна звести до процесів запису й зчитування даних по тактовому сигналу, як показано на рис. 8.1.

Запис і зчитування даних здійснюється в моменти часу (звичайно в середині тактового інтервалу даних), обумовлені тактовими імпульсами (схема на рис. 8.1, *а* активується по передньому фронту імпульсів тактової послідовності, зображеної на рис. 8.1, *б*).

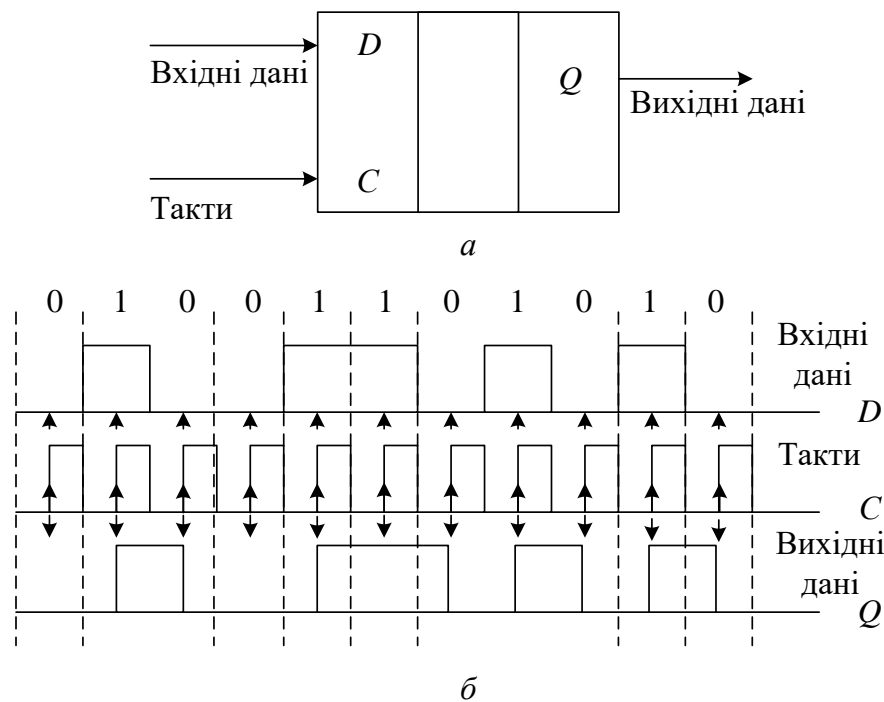


Рис. 8.1. Взаємодія сигналів даних і тактового сигналу в пристрої перезапису:
 а) пристрій перезапису; б) часові діаграми

Для правильного запису (зчитування) даних необхідно підтримувати визначені часові співвідношення між тактовими імпульсами й імпульсами даних, тобто синхронізм. Це завдання відносно легко вирішується в межах одного пристрою або локальної мережі. Розглянемо на прикладах практичні схеми синхронізації.

Локальні схеми розподілу. Схема із центральним задавальним тактовим генератором наведена на рис. 8.2. У цій схемі сигнали тактової синхронізації централізовано розподіляються по всіх елементах одного пристрою або мережі як для напрямків приймання, так і передавання. При розподілі синхросигналу в межах одної чарунки (друкованої плати), блока або станції, як правило, передбачаються окремі ланцюги (лінії, канали) синхронізації.

По суті, ця ж схема в загальному вигляді присутня при синхронізації мережі в режимі примусової синхронізації з одним ведучим генератором. У цьому випадку при розподілі синхросигналу в межах географічно розподілених пристроїв для

транспортування сигналу, як правило, використовуються робочі тракти систем передачі, що несуть корисне інформаційне навантаження.

Схема співнаправленої синхронізації наведена на рис. 8.3, а. У цій схемі сигнали тактової синхронізації передаються паралельно в одному напрямку із сигналом даних.

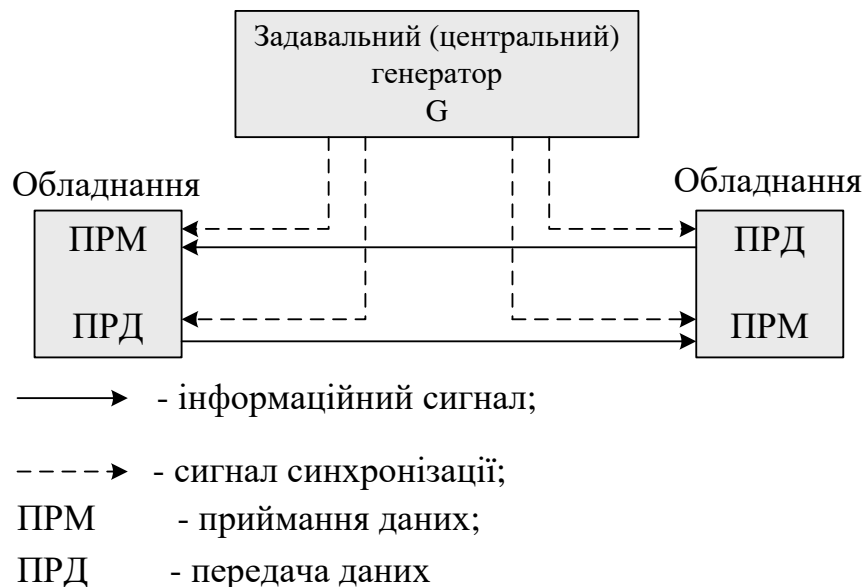


Рис. 8.2. Схема синхронізації з центральним генератором

Схема протинаправленої синхронізації наведена на рис. 8.3, б. У цій схемі один пристрій – ведучий, виконує роль центрального генератора, який встановлює режими синхронізму, напрямку передачі й приймання ведених пристроїв. У такій схемі для одного з напрямків сигнал передачі даних і сигнал тактової синхронізації направлені протилежно, тому схема синхронізації й називається протинаправленою. Протинаправлена схема синхронізації, як правило, використовується при взаємодії обладнання цифрових систем передачі з ІКМ, зокрема, у стику основного цифрового каналу.

Загальним для наведених вище схем є наявність окремих, виділених ланцюгів синхронізації. Ця обставина обмежує можливість застосування даного методу на довгих лініях, де виділення окремих ланцюгів недоцільне.

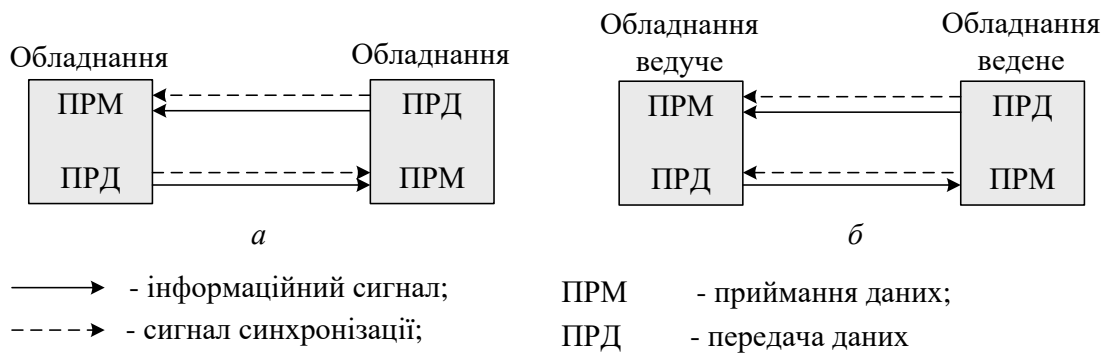


Рис. 8.3. Схеми синхронізації: *a*) співнаправлена;
б) протинаправлена

Принцип самосинхронізації. У системах передачі PDH, SDH як на довгих лініях між містами, так і усередині одного будинку або приміщення використовується так званий принцип самосинхронізації або автосинхронізації, який полягає в тому, що тактовий сигнал витягається із цифрового інформаційного сигналу безпосередньо в точці приймання й установлюється з ним у необхідному фазовому співвідношенні.

Для цього в кожній точці приймання, залежно від довжини лінії, встановлюється станційний або лінійний регенератор з функцією виділення тактового сигналу. Регенератор виконує 3 основні функції:

1. Відновлення форми сигналу (посилення сигналу, зменшення рівня шумів і міжсимвольної інтерференції). Ця функція реалізується підсилювачем – коректором лінійних спотворень, іноді з функціями автоматичного регулювання посилення й обмеження.

2. Відновлення тактової частоти (виділення тактового синхросигналу з лінійного інформаційного сигналу). Ця функція реалізується виділювачем тактової частоти (ВТЧ).

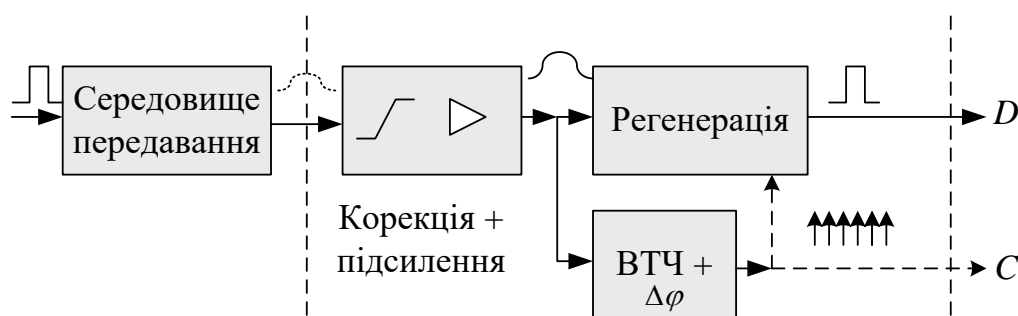
3. Регенерація сигналу (ухвалення рішення, який сигнал (0 або 1) був переданий). Ця функція реалізується D-тригером, керованим виділеним тактовим синхросигналом.

Основні елементи цифрового регенератора зображені на рис. 8.4.

Після проходження лінії передачі спотворений сигнал подається на вхід регенератора, у якому відбувається посилення й

корекція вхідного сигналу, відновлення/виділення тактового сигналу й власне регенерація цифрового сигналу – відновлення форми й часового положення.

Зверніть увагу на пристрій регулювання фази сигналу у виділювачі тактової частоти (ВТЧ) для підстроювання значущих моментів тактового сигналу й сигналу даних відносно один одного приблизно в таку позицію, як показано на рис. 8.1, а.



ВТЧ + $\Delta\varphi$ – виділювач сигналу тактової синхронізації й фазообертач (з регулюванням затримки сигналу);
 С – тактовий сигнал; D – інформаційний сигнал

Рис. 8.4. Схема пристрою регенерації цифрового сигналу з виділювачем сигналу тактової синхронізації

У наочному вигляді принцип самосинхронізації наведений на рис. 8.5. З рисунка можна бачити, що кожний напрямок передачі зліва направо від станції А до станції Б і в протилежному напрямку синхронізуються окремим незалежним генераторним обладнанням G1 і G2.

На кожній станції генератор задає тактову послідовність для всього обладнання одного напрямку. Якщо обладнання рознесене по різних блоках, то, як правило, для відновлення в кожній точці тактового сигналу використовуються станційні регенератори, показані на станціях А і Б. Для відновлення сигналу при проходженні по лінії зв'язку використовуються лінійні регенератори. Робота регенераторів синхронізується за тактовим сигналом, що виділюється з робочого лінійного сигналу даних. Виділювач тактової частоти регенератора на станції Б відіграє роль задавального тактового генератора для всієї приймальної частини обладнання.

У загальному випадку, розглянуту схему синхронізації можна охарактеризувати як двоспрямовану, тобто передача ведеться по двох цифрових каналах, кожний з яких здійснює незалежну односпрямовану цифрову передачу між двома точками.

Розходження тактових частот генераторів G1 і G2 не має істотного впливу на роботу кожного напрямку, тому що в ній використовується принцип самосинхронізації, а кожний пристрій у ланцюзі відіграє роль веденого для попереднього пристрою й роль ведучого для наступного. З іншого погляду, ведучий задавальний генератор тільки один, а всі інші пристрої відіграють роль ведених. У кожному разі якість тактового сигналу залежить від параметрів пристроїв виділення тактових сигналів – ВТЧ.

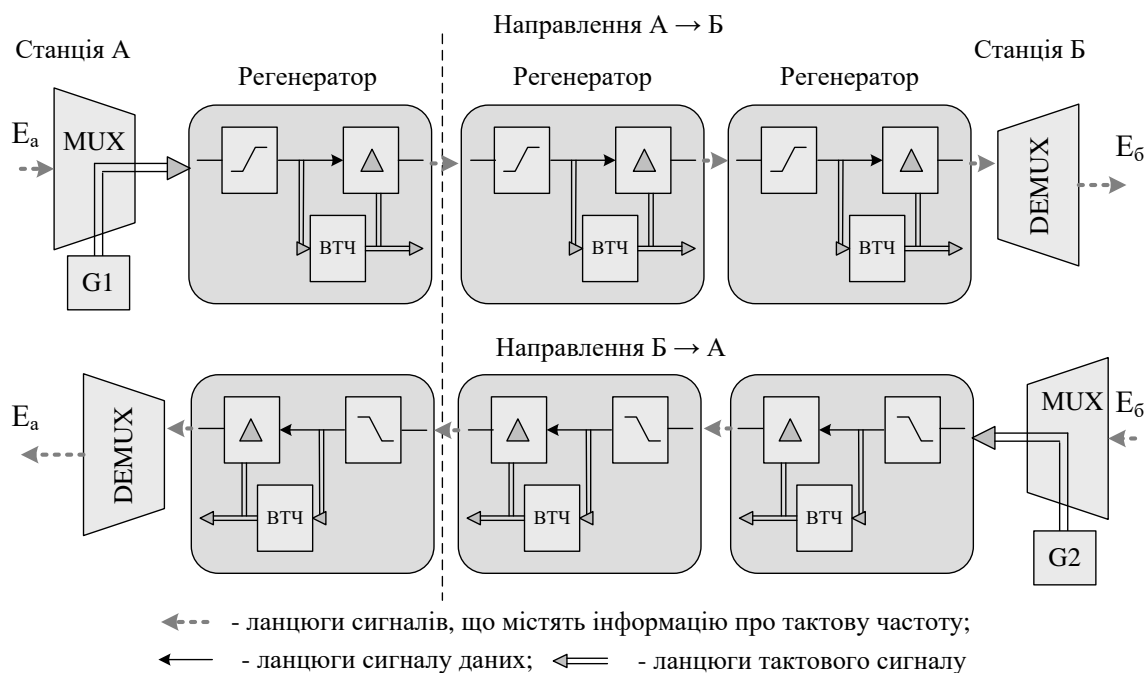


Рис. 8.5. Принцип самосинхронізації за тактовою частотою

Далі розглянемо основні принципи побудови ВТЧ.

8.3. Відновлення тактової частоти

Ефективне відновлення тактової частоти із прийнятого сигналу є одним з найважливіших завдань при розробленні

цифрових систем передачі. Тактовий сигнал, що генерується пристроєм ВТЧ, повинен задовольняти три основні умови:

- мати частоту, що відповідає швидкості передачі даних (наприклад, сигналу даних зі швидкістю 10 Гбіт/с повинен відповідати тактовий сигнал із частотою 10 ГГц);
- зберігати визначене фазове співвідношення із сигналом даних для забезпечення оптимального стробіювання інформаційних символів тактовим сигналом;
- вносити як можна менший джитер у вихідний сигнал даних.

З погляду фізичної реалізації розрізняють три основних методи виділення тактової частоти:

- підстроювання місцевого генератора з використанням системи ФАПЧ;
- резонансний (фільтровий) метод з використанням контура ударного збудження;
- метод часового зсуву (затримки).

Дамо коротку характеристику кожному з цих методів.

Метод ВТЧ на основі ФАПЧ. Стандартна схема ВТЧ на основі ФАПЧ наведена на рис. 8.6.

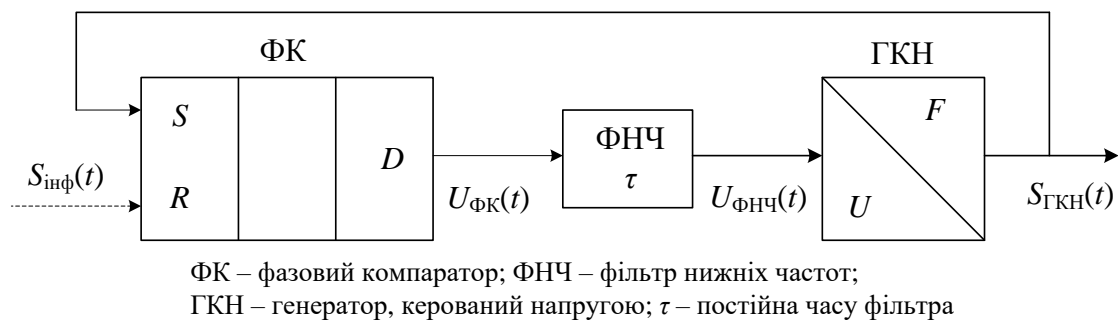


Рис. 8.6. Схема виділювача тактової частоти на основі ФАПЧ

Ланцюг виділення тактової частоти на основі ФАПЧ являє собою систему з негативним зворотним зв'язком. Фазовий компаратор реалізований на RS-тригері, на вхід S якого надходить тактовий сигнал з виходу генератора, керованого напругою (ГКН), позначений на рис. 8.5 як $S_{\text{ГКН}}(t)$, а на вхід R – інформаційний сигнал $S_{\text{инф}}(t)$. На виході фазового компаратора

формується імпульси $U_{\hat{o}\hat{e}}(t)$ із тривалістю, пропорційною різниці фаз сигналів $S_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}}(t)$ і $S_{\hat{z}\hat{o}}(t)$, що надходять на вхід ФНЧ. ФНЧ зменшує пульсації й формує сигнал $U_{\hat{o}\hat{i}\times}(t)$, що регулює частоту ГКН відповідно до частоти вхідного інформаційного сигналу.

При рівності періодів сигналів $S_{\hat{z}\hat{o}}(t)$ і $S_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}}(t)$ шпаруватість імпульсної послідовності $U_{\hat{o}\hat{e}}(t)$ дорівнює 2 або, інакше кажучи, півперіода на виході ФК присутня напруга логічної 1 і півперіода – логічного 0. Напруга на виході ФНЧ $U_{\hat{o}\hat{i}\times}(t)$ підтримується біля робочої точки в середньому положенні. При зміні частоти сигналу $S_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}}(t)$ шпаруватість $U_{\hat{o}\hat{e}}(t)$ буде змінюватися, що призведе до зміни напруги на виході ФНЧ і частоти ГКН.

Описана вище схема виділення тактової частоти на основі ФАПЧ досить проста в реалізації й одержала широке розповсюдження в цифровому обладнанні. Однак вона має ряд недоліків (джитер, спотворення сигналу й ін.), особливо істотних при роботі на високих швидкостях. Це призводить до необхідності вдосконалення схеми ФАПЧ і пошуку нових технічних рішень.

Резонансний (фільтровий) метод ВТЧ. Загальний принцип роботи схеми ВТЧ на основі резонансного контура зображений на рис. 8.7.

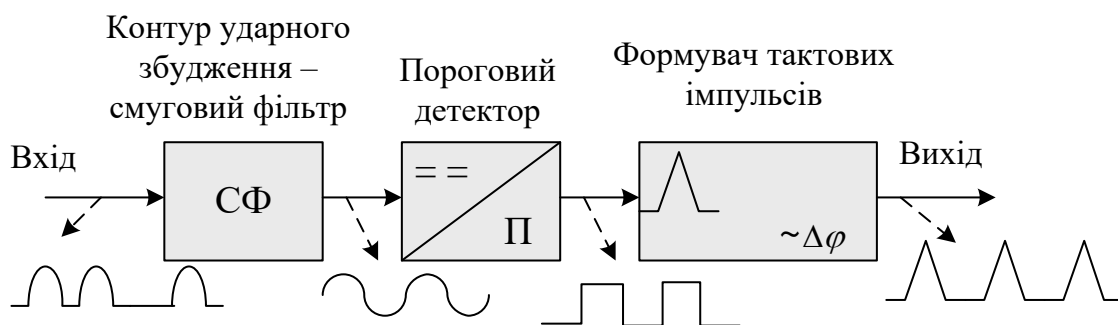


Рис. 8.7. Резонансний метод виділення тактової частоти

Вхідна імпульсна послідовність надходить на високодобротний резонансний контур (контур ударного збудження), настроєний на тактову частоту проходження

імпульсів. Після контура сигнал, що за формою наближається до сталого синусоїдального сигналу, подається на пороговий детектор (підсилювач – обмежувач), що спрацьовує при переході сигналу через нуль. Отриманий сигнал потім запускає місцевий задавальний генератор.

Недоліком розглянутого методу є те, що довга послідовність нулів призводить до дуже рідкого збудження резонансного контура й внаслідок цього до зсуву частоти коливального контура на власну частоту резонансу. Таким чином, змінна щільність імпульсів переданої послідовності призводить до постійних коливань фази сформованого тактового сигналу (тобто до джитера). Граничний детектор, ввімкнений після контура ударного збудження, також є джерелом фазових тремтінь, оскільки під впливом різних факторів (старіння, температурні впливи) може відбутися зсув робочої точки граничного детектора. У результаті виникають залежні від часу зміни рівня сигналу (амплітудна модуляція), що так само призводить до джитера в тактовому сигналі, котрий регенерується (фазової модуляції).

Метод зсуву (затримки). Цей метод виділення тактової частоти ефективний при використанні так званих “кодів, що самосинхронізуються”, наприклад, Манчестерського, біфазного й ін.

Принцип методу часового зсуву зображений на рис. 8.8, де наведені спрощена схема ланцюга ВТЧ і часові діаграми. Спрощена схема, наведена на рис. 8.8, складається з таких елементів:

- лінія затримки, що реалізована на логічному двовхідному елементі **I**;
- суматор за модулем 2;
- одинвібратор, що формує тактову послідовність $C(t)$ (із тривалістю імпульсів приблизно $3/4$ від тривалості одиничного тактового інтервалу);
- конденсатор C для фільтрації імпульсів з періодом $T/2$.

Для наочності в схему ввімкнений інвертор, і на діаграмі показана інвертована тактова послідовність $C(t)$.

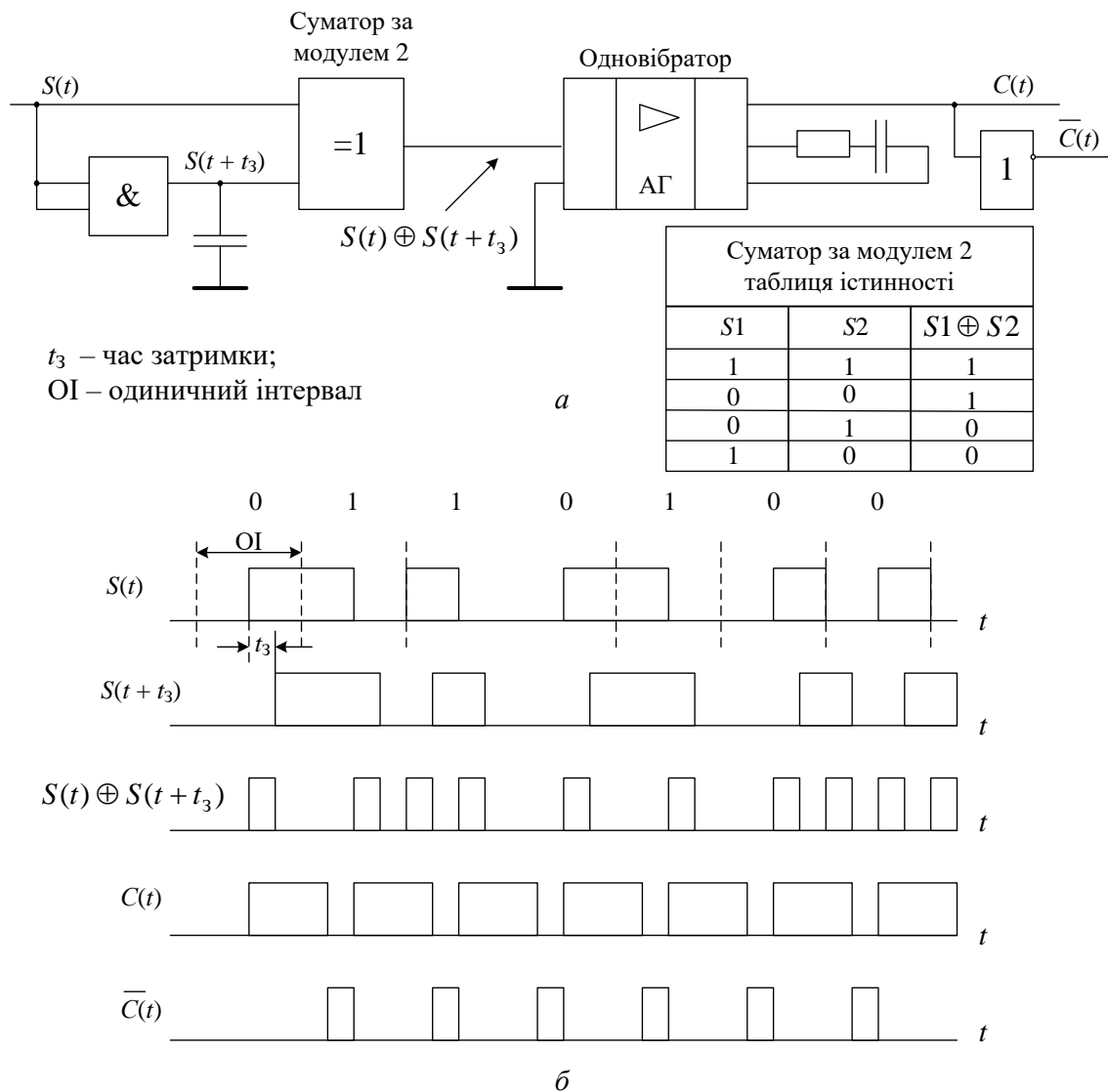


Рис. 8.8. Виділення тактової частоти методом часового зсуву:
а) схема ВТЧ; б) часові діаграми роботи ВТЧ

8.4. Основні методи синхронізації

Розглянемо кілька основних методів синхронізації цифрових мереж: плезіохронна робота, примусова синхронізація, взаємна синхронізація, вирівнювання швидкостей шляхом вставлення або видалення символів (стафінг) і застосування показників.

Плезіохронна робота. Кожний вузол мережі одержує еталонний сигнал від свого незалежного джерела синхронізації. Припустима частота проковзувань зберігається завдяки високій точності синхронізації на обох боках з'єднання. Стандарти визначають величину стабільності генераторів, що

використовуються для синхронізації плезіохронних з'єднань. Недолік плезіохронної роботи – високі вимоги до всіх задавальних генераторів.

Примусова синхронізація за принципом ведучий – ведений. При використанні цієї стратегії один ведучий задавальний генератор керує веденими задавальними генераторами всієї мережі.

Як видно з рис. 8.9, розподіл еталонного сигналу синхронізації від ведучого генератора до веденого може здійснюватися по прямих каналах (зіркоподібна топологія) або уздовж ліній, що включають кілька ведених генераторів, об'єднаних в ієрархічні рівні (деревоподібна топологія).

Як ведучий пристрій синхронізації використовується дорогий високостабільний генератор. Ведені пристрої синхронізації можуть бути набагато дешевші. Як правило, це системи із кварцовими генераторами й фазовим автопідстроюванням частоти.

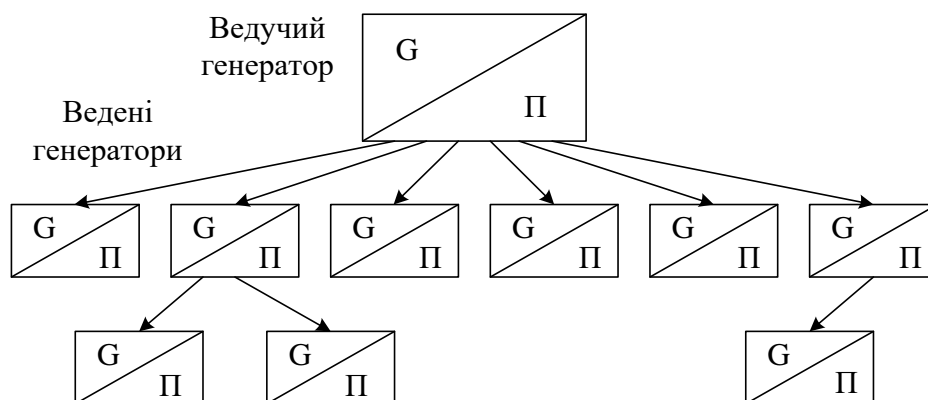


Рис. 8.9. Примусова синхронізація (ведучий – ведений)

Взаємна синхронізація. При використанні взаємної синхронізації кожний тактовий генератор керує всіма іншими генераторами, як показано на рис. 8.10.

Мережа, побудована за принципом взаємної синхронізації – “кожний з кожним”, виглядає досить привабливою: нема ведучого й ведених генераторів, а лише взаємне співробітництво. Однак важко гарантувати “дисциплінованість” взаємно керованих елементів. Дотепер галузь застосування взаємної синхронізації на мережах зв’язку обмежена. Однак тією чи іншою

мірою принцип взаємодії використовується досить широко, наприклад, при обчисленні всесвітнього скоординованого часу, у радіонавігаційних системах і т.д.

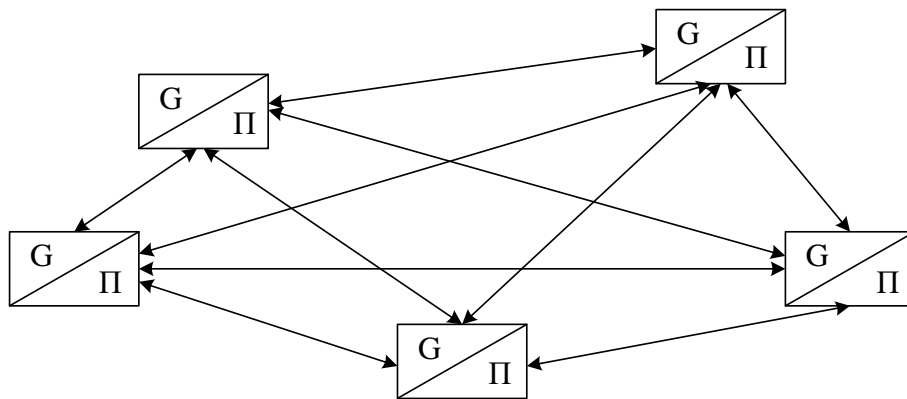


Рис. 8.10. Взаємна синхронізація

Змішана синхронізація. Цей варіант побудови мережі синхронізації передбачає використання принципу взаємної синхронізації для декількох вузлів центральної частини мережі (високоточних генераторів), а принципу ведучий – ведений – для периферійних пристроїв синхронізації (рис. 8.11). Змішана синхронізація дозволяє забезпечити більшу надійність і в той же час спрощує проблему контролю периферійної частини мережі (у порівнянні з повною взаємною синхронізацією).

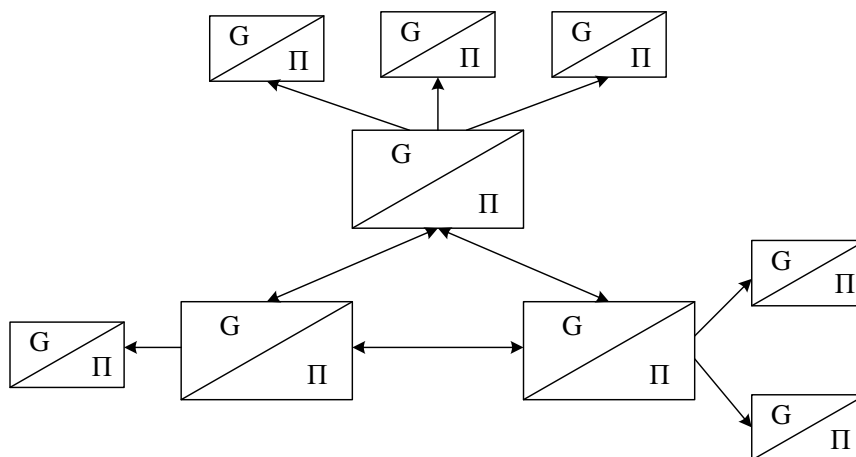


Рис. 8.11. Змішана синхронізація

Існує й безліч інших варіантів побудови мереж синхронізації, у яких робляться спроби оптимізації мережі за тими або іншими критеріями, наприклад:

– ієрархічна синхронізація ведучий – ведений, зображена на рис. 8.12. Ця стратегія передбачає такий механізм захисту: якщо ведучий пристрій синхронізації відмовляє, його місце відповідно до ієрархічного плану займає інший генератор. Завдяки своїм гарним характеристикам (висока надійність при розумних витратах) ієрархічна стратегія ведучий – ведений широко застосовується для синхронізації сучасних цифрових мереж електрозв’язку (зокрема, мереж SDH);

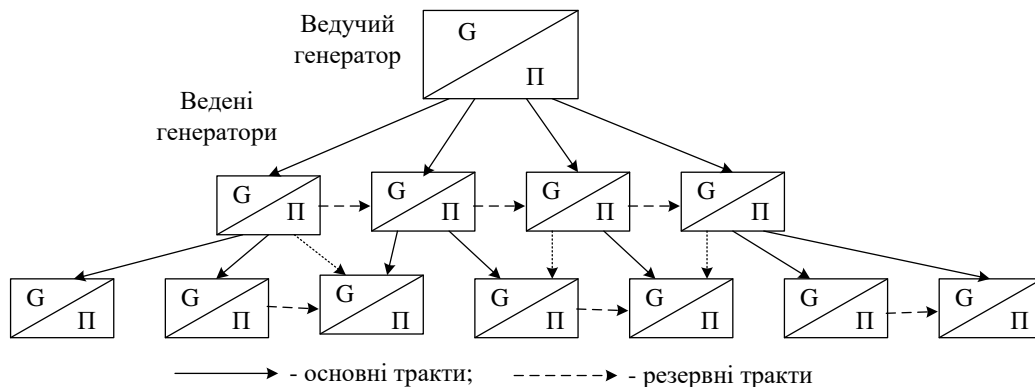


Рис. 8.12. Ієрархічна синхронізація ведучий – ведений

– ієрархічна взаємна синхронізація: так само, як і при взаємній синхронізації (рис. 8.10), де всі вузли зв’язані між собою, але ступінь (вага) участі кожного генератора при ухваленні рішення в кожній точці мережі різні. Ваговий коефіцієнт залежить від якості генератора, виду й довжини каналу синхронізації й т.д.;

– змішані плезіохронні/синхронні мережі синхронізації: на даному етапі мережі синхронізації окремих держав плезіохронні, а усередині кожної мережі підтримується та чи інша форма примусової синхронізації.

8.5. Особливості синхронізації мереж SDH

Повернемося до розгляду синхронного транспортного модуля STM-1, що складається із блока корисного навантаження й заголовка, котрий містить покажчики, які визначають положення віртуального контейнера в блоці корисного навантаження. Віртуальний контейнер може “плавати” усередині блока корисного навантаження. Така гнучкість у розміщенні

віртуального контейнера дозволяє переборювати невеликі частотні й фазові відхилення між окремими елементами мережі, що компенсуються зміною положення віртуального контейнера в межах деякого допуску. Цей аспект є центральним для синхронізації мереж SDH.

Хоча елементи мережі ієрархії SDH синхронізовані еталонним генератором, явища, що викликають порушення часових співвідношень функціонуючої мережі, можуть призвести до розбіжностей за фазою й частотою між елементами мережі. Для подолання подібних явищ саме й використовується механізм показчиків.

Тепер розглянемо поняття стабільності частоти задавального (еталонного) генератора. Стабільність частоти оцінюють, вимірюючи випадкові й детерміновані відхилення частоти задавального генератора від номінального значення на заданому інтервалі спостереження. Під нестабільністю частоти задавального генератора надалі будемо розуміти відношення величини відхилення частоти генератора від номінального значення на заданому інтервалі спостереження до номінального значення частоти. Залежно від інтервалу спостереження розрізняють короткочасну й довгочасну нестабільність частоти.

Порушення синхронізації можуть відбуватися через шум задавального генератора (короткочасна нестабільність частоти генератора), перемикання елемента мережі до альтернативного джерела синхронізації, а також входження елемента мережі в режим утримання синхронізації.

Шум задавального генератора викликає хаотичні коректування показчика як у позитивному, так і в негативному напрямках. Послідовне з'єднання декількох мережних елементів у мережі SDH призводить до ще більшого збільшення рівня шуму, що може викликати сплеск коректувань показчика. Якщо відбувається відмова всіх еталонів синхронізації в одному з елементів мережі, то розвивається тривалий збій частоти й у даному мережному елементі відбуваються постійні коректування показчика однакової полярності.

Перемикання еталона синхронізації може призвести до раптового зсуву фази, викликаючи тим самим процес коректувань показчика. Оскільки кожне коректування

показчика викликає значний зсув фази, то при повторюваних коректуваннях показчика тремтіння може накопичуватися до неприйнятних значень і, в остаточному підсумку, призвести до помилок у корисному навантаженні. Тому випадки коректування показчика мають бути зведені до мінімуму.

Таким чином, короткочасна нестабільність частоти задавальних генераторів елементів мережі є важливим чинником у визначенні частоти коректувань показчика, а довгочасна нестабільність не має значного впливу на активність коректувань показчика.

Впровадження мереж SDH, що використовують поряд зі звичною топологією “точка – точка” кільцеву і чарункову топології, призвело до додаткових складностей у вирішенні проблем синхронізації, тому що для двох останніх топологій маршрути сигналів можуть змінюватися в процесі функціонування мереж.

Мережі SDH мають кілька дублюючих джерел синхронізації:

- сигнал зовнішнього мережного тактового генератора або первинне джерело синхронізації PRC (Primary Reference Clock) частотою 2 048 кГц, визначений у рекомендації ITU-T G.811;

- вторинне джерело синхронізації транзитного вузла SSU-A (Synchronization Supply Unit – A) – сигнал частотою 2 048 кГц, що виділюється з первинного потоку 2 048 кбіт/с і визначений у рекомендації ITU-T G.812;

- вторинне джерело синхронізації кінцевого вузла SSU-B (Synchronization Supply Unit – B) – сигнал частотою 2 048 кГц, визначений у рекомендації ITU-T G.812;

- джерело синхронізації обладнання SDH – SEC (Synchronization Equipment Clock) – лінійний сигнал STM-N (рекомендація ITU-T G.813).

З огляду на те, що первинні цифрові потоки E1 зі швидкістю 2 Мбіт/с транспортуються у віртуальних контейнерах і можуть плавати в рамках структури вкладених контейнерів, що використовують показчики, їхні сигнали повинні бути виключені зі схеми синхронізації мережі SDH.

Причина цього полягає в тому, що компонентні сигнали корисного навантаження не можуть ефективно передавати тактові сигнали через великий джитер, що спостерігається при корекції показчиків, у той час як у мережах PDH ці потоки

відповідають нормам і їх можна використовувати для цілей мережної синхронізації. Так само еталонні сигнали, які передаються послугами АТМ, будуть мати значний вандер і не повинні використовуватися для синхронізації.

Нестабільність частоти внутрішніх задавальних генераторів мала й становить порядку 10^{-6} , крім того, необхідно враховувати можливість збільшення нестабільності в процесі так названого “каскадування сигналів генераторів”, коли вузол мережі відновлює сигнал задавального генератора за прийнятим сигналом й передає його наступному вузлу.

Найкращим способом передачі синхросигналу в мережі SDH визнана його передача безпосередньо в групових сигналах STM-N. Тактовий сигнал, виділений із сигналів STM-N, має найкращу якість, яку можна досягти сьогодні. На нього впливає тільки джитер, внесений лінією передачі (наприклад, джитер внаслідок теплового шуму й умов навколишнього середовища в оптичній лінії), а не процедури вирівнювання або інші наслідки завантаження компонентних сигналів. Еталонний ланцюг передачі сигналу синхронізації в системі SDH зображений на рис. 8.13.

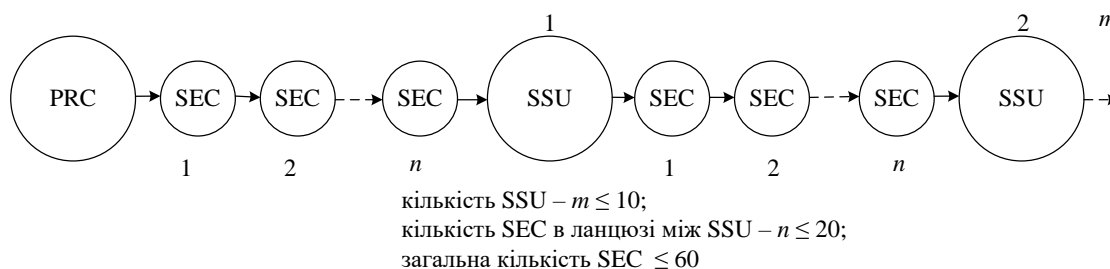


Рис. 8.13. Еталонний ланцюг синхронізації

Цілісність синхронізації мережі PDH базувалася на використанні ієрархічної примусової синхронізації (ведений/ведучий генератори). У ній проходження сигналів генераторів через вузли мережі було прозорим. У мережі SDH, що відновлює в кожному вузлі сигнал генератора з лінійного сигналу STM-N, така прозорість втрачається. У цій ситуації цілісність синхронізації мережі SDH краще підтримується при використанні розподілених первинних еталонних джерел PRC, що дозволяє усунути ефекти “каскадування сигналів генераторів”.

Режими роботи і якість джерела синхронізації. У системі SDH передбачається чотири стандартних режими роботи задавальних генераторів вузлів синхронізації:

- режим первинного джерела синхронізації PRC (ведучий або майстер-вузол);
- режим примусової синхронізації – режим веденого задавального генератора (транзитний і/або кінцевий вузли);
- режим утримання з точністю втримання $5 \cdot 10^{-10}$ для транзитного вузла й $1 \cdot 10^{-8}$ для кінцевого вузла й добовим дрейфом частоти $1 \cdot 10^{-9}$ і $2 \cdot 10^{-8}$ відповідно;
- вільний режим (для транзитного й кінцевого вузлів) – точність підтримки залежить від класу джерела й може складати $1 \cdot 10^{-8}$ для транзитного й $1 \cdot 10^{-6}$ для кінцевого вузлів.

Організаціями ITU-T і ETSI запропоновано використовувати поняття рівень якості джерела синхронізації. Цей рівень може бути переданий у вигляді повідомлення про статус синхронізації через заголовок модуля STM (див. табл. 6.7). У цьому випадку при збої в мережі, що призвело до захисного перемикавання, мережний елемент має можливість послати повідомлення про необхідність використання сигналу синхронізації, відновленого з альтернативного маршруту.

Використання світового скоординованого часу. Серед джерел синхронізації найбільш універсальним і точним є світовий скоординований час UTC. Для його трансляції використовуються супутникові системи LORAN-C і глобальна система позиціонування GPS. Традиційні системи приймання UTC вимагають значних витрат і використовуються, як правило, у центрах супутникового зв'язку. Однак у зв'язку із широким розвитком GPS була розроблена альтернатива первинним еталонним джерелам синхронізації – технологія локальних первинних еталонів, заснована на використанні UTC для підстроювання частоти.

Багато телефонних компаній використовують цю технологію в місцях розгортання GPS для створення альтернативи задавальним генераторам на транзитних вузлах. На таких вузлах в якості задавальних генераторів встановлюються рубідієві годинники. У комбінації з технологією локальних первинних еталонів використання синхронізації від UTC

дозволяє одержувати локальні первинні еталони, що істотно перекривають вимоги за стабільністю 10^{-11} , які установлені стандартами ITU-T і ETSI для первинних еталонних генераторів.

Побудова системи розподілених первинних еталонних джерел синхронізації не тільки дозволяє збільшити надійність синхронізації мереж SDH, але й усуває (при використанні повідомлень про статус синхронізації) можливість порушення синхронізації при здійсненні захисного перемикавання в кільцевій або чарунковій мережі SDH.

Приклад синхронізації кільцевої мережі SDH. Основною вимогою при формуванні мережі синхронізації є наявність основних і резервних шляхів розповсюдження сигналу синхронізації. Однак і в тому, і в іншому випадку необхідно чітко дотримуватися топології ієрархічного дерева й не повинно бути замкнутих петель синхронізації. Іншою вимогою є наявність альтернативних джерел синхронізації. Ідеальна ситуація, коли альтернативні джерела синхронізації проранжировані за пріоритетом й статусом.

Петлі синхронізації виникають, коли генератор використовує для відстеження свій власний сигнал синхронізації, як показано на рис. 8.14. При виникненні таких петель стабільність частоти еталонного генератора значно зменшується (фактично відбувається підстроювання частоти задавального генератора під самого себе).

На рис. 8.15 наведена схема синхронізації кільцевої мережі SDH, де схема ліворуч відповідає нормальному режиму функціонування мережі, а схема праворуч – збою, викликаному розривом кабелю між вузлами *B* і *C*.

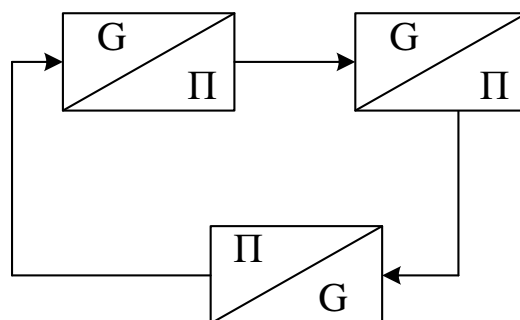


Рис. 8.14. Петля синхронізації

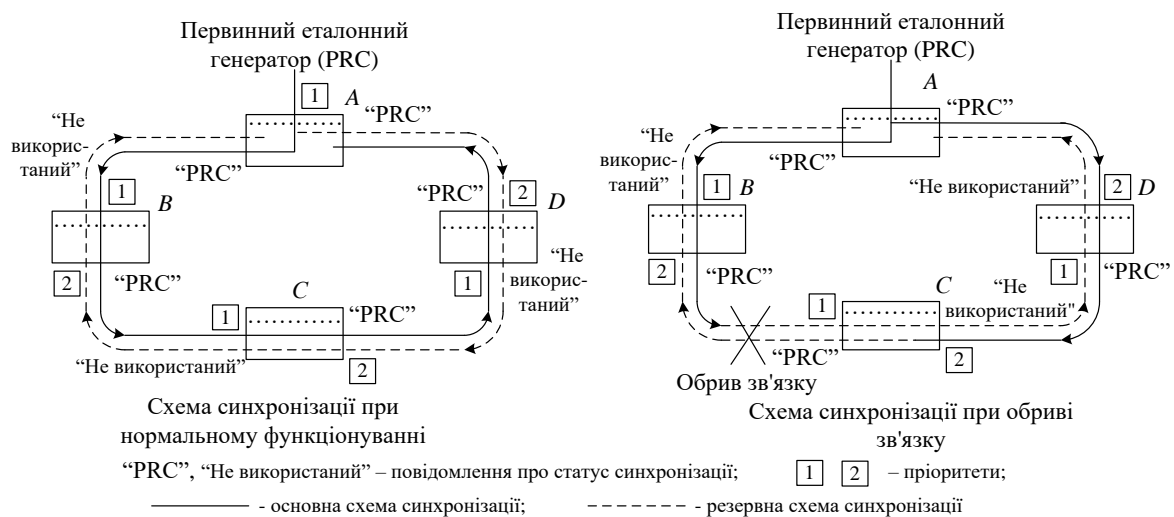


Рис. 8.15. Схема синхронізації кільцевої мережі SDN

Схема використовує ієрархічний метод примусової синхронізації. Один з вузлів (вузол *A*) призначається ведучим (або майстер – вузлом) і на нього подається сигнал синхронізації від зовнішнього первинного задавального генератора PRC. Від цього вузла сигнал синхронізації (джерело синхронізації першого пріоритету) розподіляється в напрямку проти часової стрілки, тобто до вузлів *B*, *C* і *D*. Синхронізація по резервній гілці (джерело синхронізації другого пріоритету) розподіляється за часовою стрілкою, тобто до вузлів *D*, *C* і *B*. Початковий розподіл джерел синхронізації по вузлах зведений в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Розподіл джерел синхронізації кільцевої мережі

Вузол	Джерело першого пріоритету	Джерело другого пріоритету
<i>A</i>	Зовнішній 2 МГц PRC	Не передбачений
<i>B</i>	Лінійний сигнал STM- <i>N</i> від вузла <i>A</i>	Лінійний сигнал STM- <i>N</i> від вузла <i>C</i>
<i>C</i>	Лінійний сигнал STM- <i>N</i> від вузла <i>B</i>	Лінійний сигнал STM- <i>N</i> від вузла <i>D</i>
<i>D</i>	Лінійний сигнал STM- <i>N</i>	Лінійний сигнал STM- <i>N</i>

При розриві кабелю між вузлами *B* і *C* вузол *C*, не одержуючи сигналу синхронізації від вузла *B*, переходить у режим утримання синхронізації й посилає вузлу *D* повідомлення про рівень якості джерела синхронізації – “Джерело синхронізації цифрового обладнання”. Вузол *D*, одержавши повідомлення про рівень якості джерела синхронізації від вузлів *A* і *C* і вибравши кращий (від *A*), посилає вузлу *C* повідомлення “Первинне джерело синхронізації” замість “Не використати для цілей синхронізації”. Вузол *C*, одержавши це повідомлення від вузла *D*, змінює джерело синхронізації на “Первинне джерело синхронізації” від *D*.

Приклад синхронізації чарункової мережі SDH. Розглянемо схему синхронізації чарункової мережі SDH, наведену на рис. 8 16.

Мережа має 12 вузлів і нескладну топологію зірки, що включає кілька лінійних ділянок, зв’язаних через вузли концентраторів.

Для полегшення завдання побудови мережі синхронізації схема розбивається на кілька ланцюгів синхронізації. Отримані ланцюги *W*, *X*, *Y*, *Z* показані ліворуч на рис. 8.16. Цифрами 1 і 2 на цьому рисунку показані пріоритети у використанні сигналів синхронізації. Суцільною лінією показані основні канали синхронізації, пунктиром – резервні канали синхронізації. Майстер-вузли заштриховані. Для розподілу синхронізації використовується та сама ієрархічна схема. Кожний ланцюг синхронізації може бути забезпечений одним або двома вузлами, що одержують синхронізацію від зовнішніх джерел (PRC). Ці вузли називають майстер-вузлами. Джерело PRC, розташоване на основній станції, є зовнішнім PRC, від якого одержують синхронізацію два майстри-вузла ланцюгів *W* і *X*. Ланцюги *Y* і *Z* мають загальний майстер-вузол *C&D*, що одержує сигнал синхронізації від останнього вузла ланцюга *X*. Суть запропонованого рішення полягає в організації альтернативного шляху передачі сигналу синхронізації в кожному ланцюзі.

Порушення синхронізації може наступити тільки при низькій надійності зв’язку, що забезпечує синхронізацію майстер-вузлу *C&D*. У цьому сенсі для цього майстер-вузла логічно використовувати локальний первинний задавальний генератор.

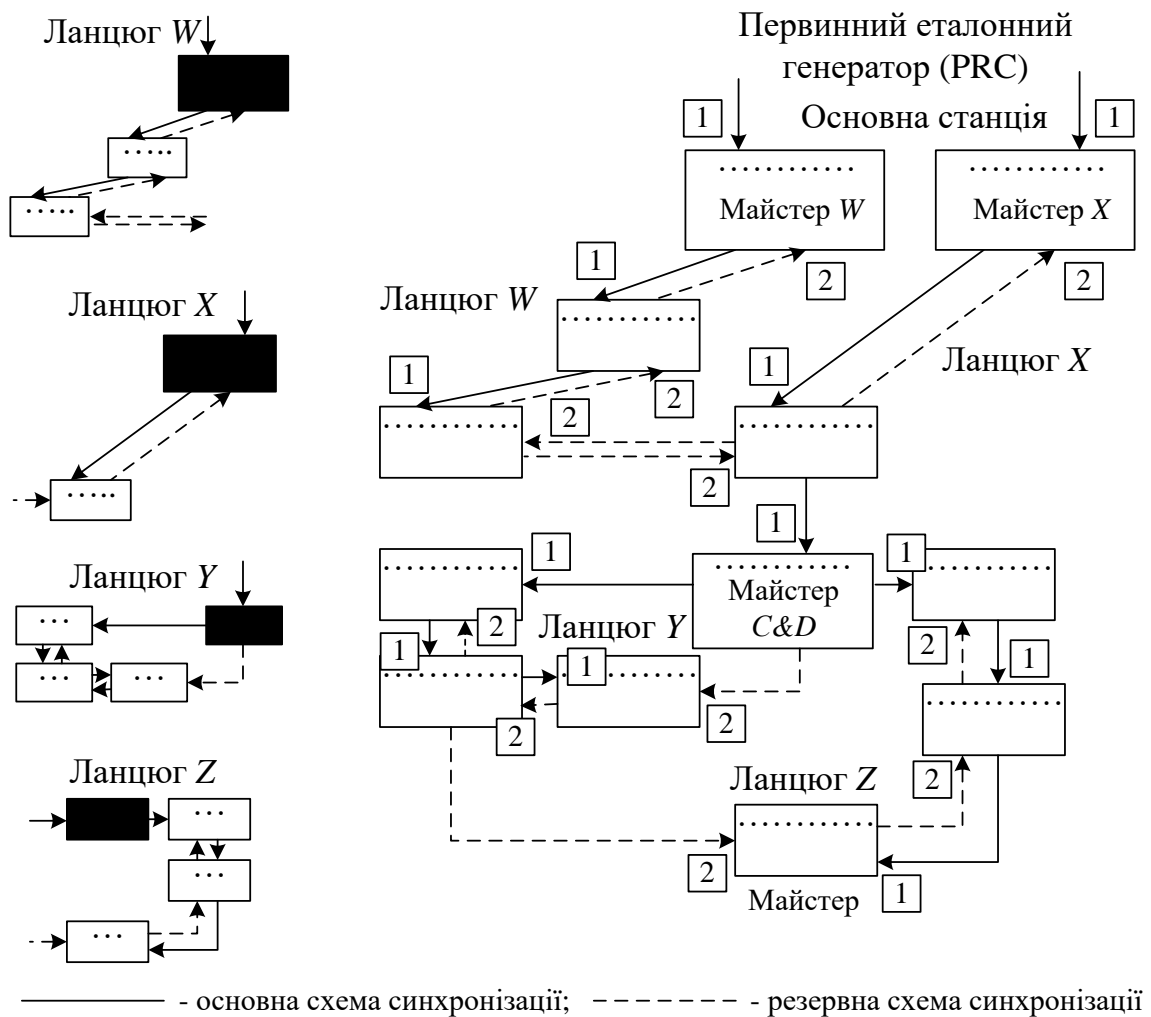


Рис. 8.16. Схема синхронізації чарункової мережі SDH

Контрольні запитання

1. Дайте визначення поняття “синхронізація” стосовно систем передачі.
2. Назвіть основні схеми розподілу сигналів синхронізації.
3. Для чого призначений регенератор? Які функції він виконує?
4. Охарактеризуйте основні методи синхронізації.
5. Які особливості синхронізації мереж SDH?

9. СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖАМИ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ TMN

9.1. Загальні принципи TMN

Функціонування будь-якої мережі електрозв'язку неможливе без її обслуговування на різних рівнях. Обслуговування мережі зводиться, у загальному випадку, до автоматичного, напівавтоматичного або ручного управління, тестування й збору інформації про проходження сигналів і виникаючі аварійні ситуації (моніторинг мережі).

Різноманіття мережного обладнання, виробленого різними виготівниками, а так само бажання користувачів одних мереж взаємодіяти з користувачами інших (з обладнанням іншого виготівника), викликає необхідність використання єдиних підходів при розробленні концепції організації системи управління мережами електрозв'язку.

Далі розглянемо особливості організації системи управління мережами електрозв'язку відповідно до рекомендації ІТУ-Т М.3010, де викладаються загальні принципи планування, функціонування й технічного обслуговування системи управління мережами TMN (Telecommunications Management Network).

Основним принципом TMN є забезпечення організаційної структури для одержання можливості взаємозв'язку різних типів операційних систем і апаратури електрозв'язку з використанням стандартних протоколів і інтерфейсів.

На рис. 9.1 зображений взаємозв'язок між TMN і мережею електрозв'язку. Операційні системи здійснюють обробку всієї інформації, необхідної для виконання функцій з керування. Робочі станції забезпечують інтерфейс користувача, за допомогою якого обслуговчий персонал взаємодіє з мережею управління. Мережа передачі даних призначена для зв'язку між мережними елементами, операційними системами й іншими компонентами TMN.

Система управління TMN може змінюватися від досить простого з'єднання між операційною системою й окремим пристроєм електрозв'язку до величезної мережі, що з'єднує

велику кількість операційних систем і апаратури електрозв'язку різних типів. Необхідно зазначити, що TMN принципово є самостійною системою, котра забезпечує інтерфейси з мережею електрозв'язку в різних точках для моніторингу й управління мережею. Однак дуже часто TMN використовує частину мережі електрозв'язку для забезпечення своїх з'єднань.



Рис. 9.1. Взаємозв'язок між системою управління й мережею зв'язку

Відповідно до міжнародної моделі система управління мережею електрозв'язку будується ієрархічно (рис. 9.2) і має такі рівні: мережних елементів; управління елементами; управління мережею; управління обслуговуванням; адміністративного управління.

Мережний рівень є найнижчим рівнем і являє собою саму мережу зв'язку, тобто об'єкт управління. Як мережні елементи можуть розглядатися комутаційні станції, системи передачі, мультиплексори, комплекти тестового обладнання й т.д. Кожний наступний рівень має більш високий ступінь узагальнення, ніж попередній.

Інформація про стан рівня надходить нагору, а зверху вниз йдуть керуючі впливи. Ступінь автоматизації управління може бути різним, і звичайно має місце сполучення автоматизованих і ручних процедур. Як правило, чим вищий рівень ієрархії управління, тим нижчий його ступінь автоматизації.

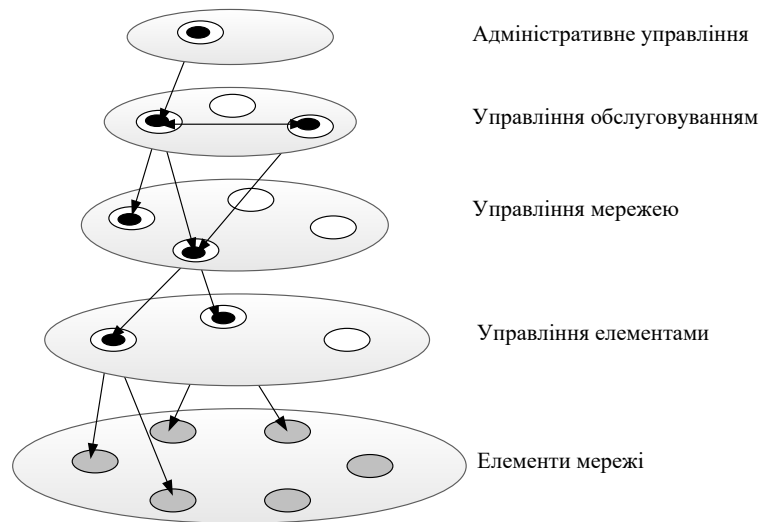


Рис. 9.2. Рівні управління мережею електрозв'язку

Рівень управління елементами охоплює контроль, відображення параметрів роботи, технічне обслуговування, тестування, конфігурування щодо окремих елементів або деяких їхніх підмножин.

Рівень мережного управління дозволяє охопити єдиним поглядом всю мережу, контролюючи підмножини мережних елементів у їхньому взаємозв'язку між собою й керуючи всіма мережними ресурсами.

Рівень управління обслуговуванням, на відміну від всіх нижчих рівнів, безпосередньо пов'язаних з мережею, тобто з технічними засобами, “звернений обличчям” до користувача. Тут приймаються рішення з надання й припинення послуг, здійснюється ведення відповідного планування й обліку й т.ін. Ключовим фактором тут є забезпечення якості обслуговування.

Рівень адміністративного управління забезпечує функціонування оператора мережі зв'язку. Тут вирішуються організаційні й фінансові питання, здійснюється взаємодія з операторами інших мереж зв'язку.

На сьогоднішній день розроблені системи управління реалізують функції рівнів не вище, ніж управління елементами або управління мережею, в окремих випадках – до управління обслуговуванням.

Всі функції, пов'язані з управлінням, можна розбити на дві частини: загальні й прикладні.

Загальні функції забезпечують підтримку прикладних функцій і включають, наприклад, переміщення інформації між елементами мережі зв'язку й системи управління, зберігання інформації, її відображення, сортування, пошук і т.ін.

Прикладні функції поділяються на п'ять категорій (рис. 9.3): управління конфігурацією; управління якістю роботи; управління усуненням несправностей; управління розрахунками; управління безпекою.

Управління конфігурацією забезпечує інвентаризацію мережних елементів (їхні типи, місцезнаходження, ідентифікатори й т.ін.); включення елементів у роботу, їхнє конфігурування й виведення з роботи; установлення й зміну фізичних з'єднань між елементами.

Управління якістю роботи має на меті контроль і підтримку на необхідному рівні основних характеристик мережі. Воно включає складання, обробку, реєстрацію, зберігання й відображення статистичних даних про роботу мережі та її елементів; виявлення тенденцій у їхній поведінці й попередження про можливі порушення в роботі.

Управління усуненням несправностей забезпечує можливості виявлення, визначення місця розташування несправностей у мережі, їхню реєстрацію; доведення відповідної інформації до обслуговчого персоналу; видачу рекомендацій з усунення несправностей.

Управління розрахунками здійснює контроль за ступенем використання мережних ресурсів і підтримує функції з нарахування оплати за це використання.

Управління безпекою необхідне для захисту мережі від несанкціонованого доступу. Воно може включати обмеження доступу за допомогою паролів, видачу сигналів тривоги при спробах несанкціонованого доступу, відключення небажаних користувачів або навіть криптографічний захист інформації.

Архітектура TMN повинна мати високий ступінь гнучкості, щоб задовольняти різні вимоги, які визначаються топологією самої мережі електрозв'язку (наприклад, фізичне розміщення елементів мережі і їхня кількість) й організацією управління (наприклад, ступінь централізації обслуговчого персоналу).



Рис. 9.3. Класифікація функцій мережного управління

9.2. Функціональна архітектура TMN

Функціональна архітектура TMN описується за допомогою функціональних блоків. Основними є такі функціональні блоки: мережного елемента NEF (Network Element Function), операційної системи OSF (Operations System Function), робочої станції WSF (Work Station Function), медіатора (проміжного пристрою сполучення) MF (Mediation Function) і Q-адаптера QAF (Q-Adapter Function).

NEF є моделлю довільного елемента мережі, що підлягає керуванню.

OSF забезпечує виконання функцій TMN з обробки, зберігання й пошуку керуючої інформації (виконує функції операційної системи).

Розглянуті вище функціональні блоки NEF і OSF є ядром TMN.

WSF організує людино-машинний інтерфейс між системою управління й людиною – оператором.

MF обробляє інформацію, що проходить між NEF і OSF, і може здійснювати проміжну обробку й зберігання даних, перетворення протоколів і т.ін.

QAF здійснює взаємодію з мережними елементами або операційними системами, що мають непередбачувані в TMN інтерфейси.

Відповідно до ієрархії визначаються функціональні блоки операційної системи OSF чотирьох рівнів: управління елементами (NE-OSF), управління мережею (N-OSF), управління обслуговуванням (S-OSF) і адміністративного управління (B-OSF). Ієрархія функціональних блоків OSF наведена на рис. 9.4.

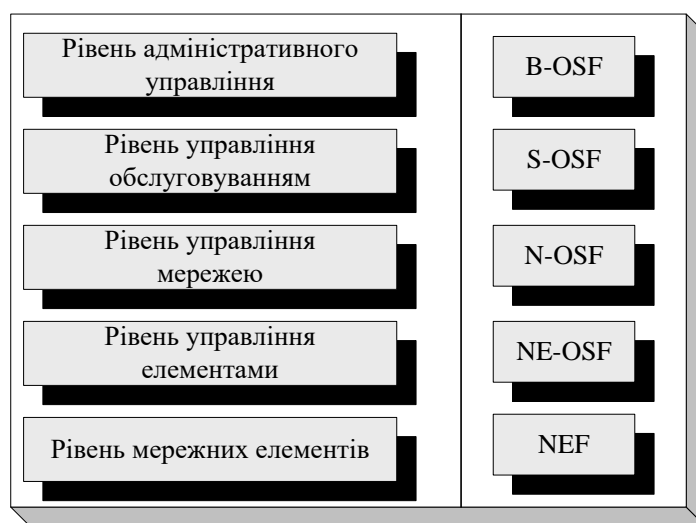


Рис. 9.4. Ієрархія функціональних блоків операційних систем OSF

Пари функціональних блоків, що обмінюються інформацією, розділені між собою опорними точками. Опорні точки поділяються на дві групи. Перша група включає точки усередині TMN, друга – поза нею. Точки першої групи поділяються на три класи:

- q – точки між блоками OSF, QAF, MF і NEF. Точки q забезпечують інформаційний обмін між блоками й поділяються на два типи:

- a)* q_x – точки між двома блоками MF або між MF та іншими блоками;

- б)* q_z – точки між двома блоками OSF або блоком OSF та іншими блоками;

- f – точки для підключення блоків WSF до OSF і/або до MF;

- x – точки між блоками OSF, що належать різним TMN.

Точки другої групи поділяються на два класи:

- g – точки між блоками WSF і користувачем;
- m – точки між блоками QAF і керованим об'єктом, що не належить TMN.

На рис. 9.5 показані типи й положення опорних точок між функціональними блоками TMN.

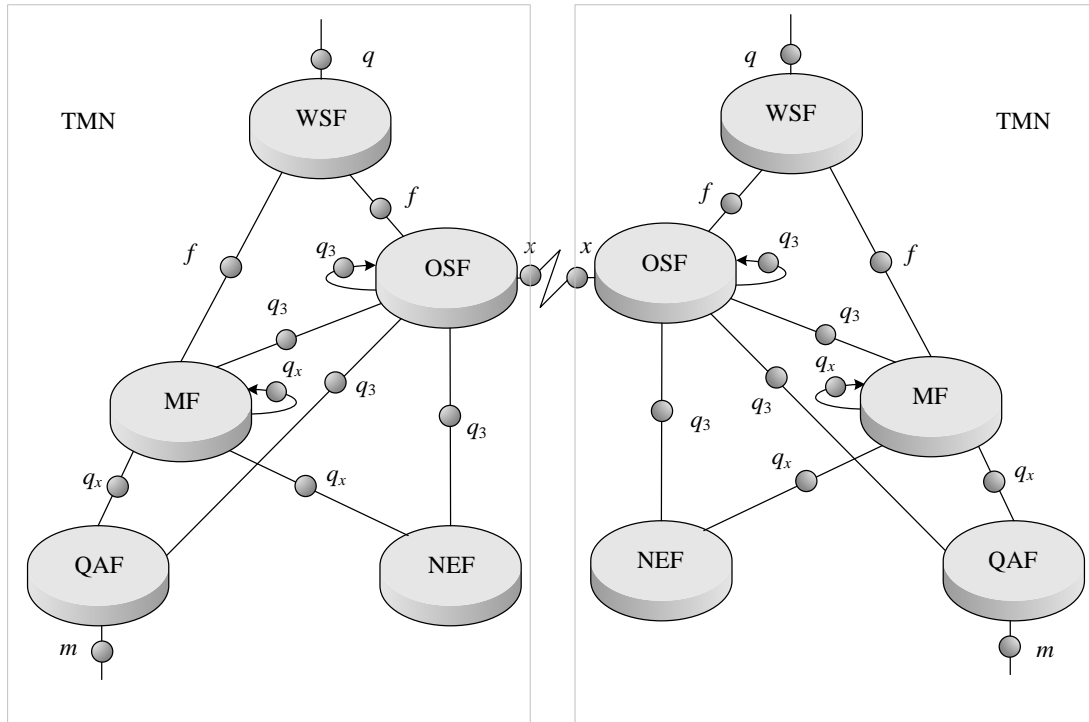


Рис. 9.5. Типи й положення опорних точок між функціональними блоками TMN

9.3. Інформаційна архітектура TMN

Інформаційна архітектура TMN вводить принципи управління, засновані на об'єктно-орієнтованому підході, що розглядає управління в термінах менеджер – агент – об'єкт (рис. 9.6). Менеджер, представляючи керуючу відкриту систему, передає команди управління й одержує повідомлення про їхнє виконання. Команди управління від менеджера приймаються агентом, що безпосередньо керує об'єктом. Повідомлення про виконання команд управління від об'єкта надходять до менеджера через агента.

Менеджери й агенти можуть взаємодіяти за принципом “багато з багатьма” у тому розумінні, що один менеджер може

брати участь в обміні інформації з декількома агентами, і один агент – з декількома менеджерами.



Рис. 9.6. Взаємодія між менеджером, агентом і керованими об'єктами

Взаємодія між менеджером і агентом відбувається на основі використання протоколу загальної інформації управління СМІР і сервісу загальної інформації управління СМІС, описаних у рекомендаціях ІТУ-Т Х.711 і Х.710. Однак спосіб взаємодії агентів з керованими об'єктами не є предметом стандартизації.

Керований об'єкт розглядається як деякі ресурси, над якими існує управління або які служать для підтримки певних функцій з керування.

Кожний керований об'єкт належить деякому класу об'єктів, що може бути підкласом іншого класу. Підклас успадковує всі властивості класу, з якого він виділений, і уточнює визначення класу додаванням нових властивостей до тих, що покладені в основу виділення вищого класу. Різні класи можуть бути уявлені у вигляді дерева, що відображає ієрархію наслідуваних властивостей. Наприклад, клас апаратур систем передачі поділяється на підкласи аналогових і цифрових систем; цифрові системи передачі можуть ділитися на плезіохронні й синхронні й т.д.

Керований об'єкт характеризується атрибутами, операціями управління, що можуть бути до нього застосовані, повідомленнями, які ним генеруються, поведінкою, що є реакцією на команди управління або на інші впливи.

9.4. Фізична архітектура TMN

Спрощена фізична архітектура TMN зображена на рис. 9.7. Вона містить компоненти, що є фізичною реалізацією згаданих вище функціональних блоків.

Крім того, схема включає мережі передачі даних і інтерфейси Q , F і X , що є фізичною реалізацією однойменних опорних точок (позначені такими ж, але малими літерами) і призначені для взаємодії між компонентами.

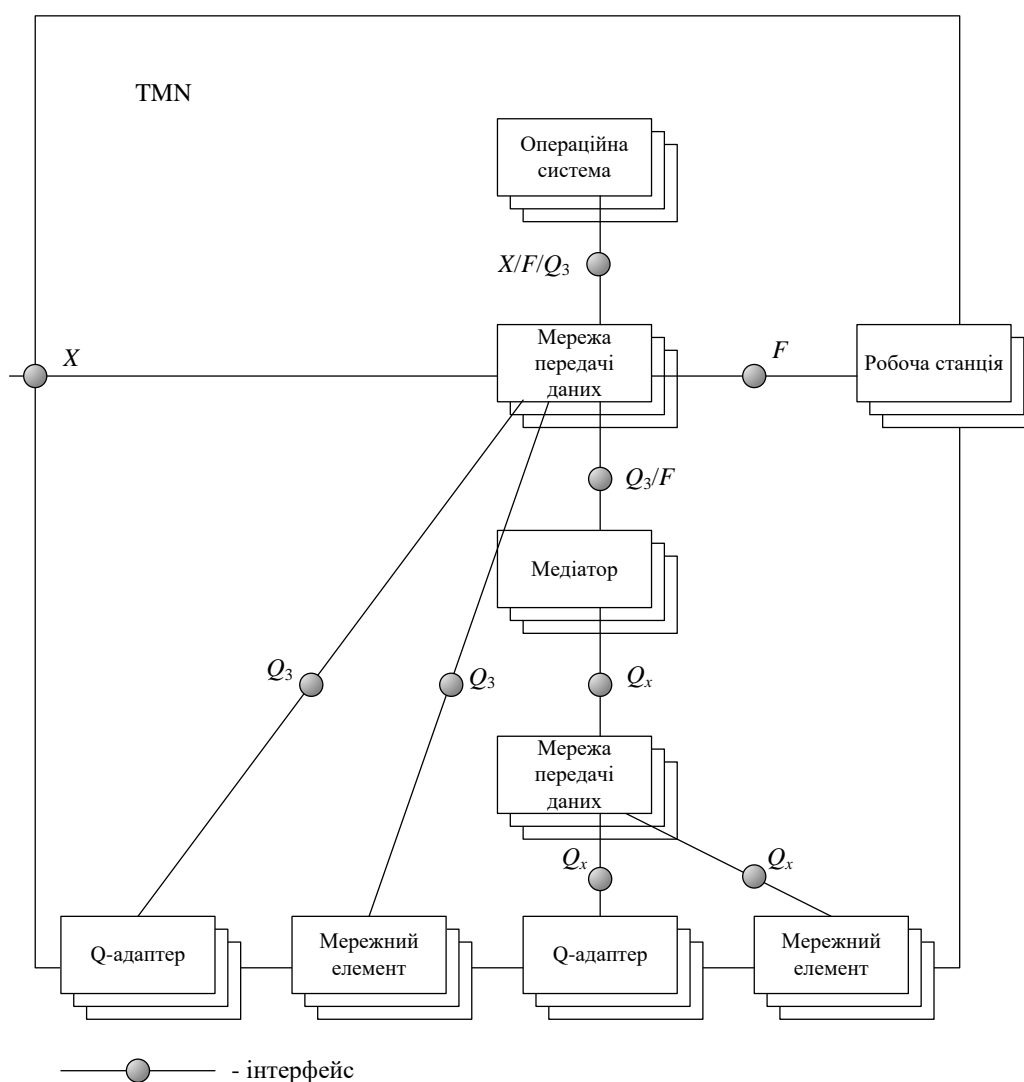


Рис. 9.7. Спрощена фізична архітектура TMN

Фізична реалізація компонентів TMN може охоплювати кілька функціональних блоків. Відповідні можливості наведені в табл. 9.1. Вибір назви фізичного компонента визначається його переважним використанням.

Можливості реалізації функціональних блоків фізичними компонентами TMN

Фізичні компоненти	Функціональні блоки				
	NEF	MF	QAF	OSF	WSF
Мережний елемент	О	Х	Х	Х	Х
Медіатор		О	Х	Х	Х
Q-адаптер			О		
Операційна система		Х	Х	О	Х
Робоча станція					О

Примітка. О – обов'язковий; Х – необов'язковий.

Медіатори використовуються для проміжної обробки й зберігання даних і перетворення протоколів. Вони не є необхідними компонентами, бо їхні функції можуть виконуватися безпосередньо в мережних елементах.

Інтерфейс F служить для зв'язку робочих станцій з операційними системами й медіаторами.

Інтерфейс X призначений для взаємодії між операційними системами різних систем TMN, що здійснюється через мережу передачі даних.

Інтерфейси Q забезпечують взаємодію мережних елементів, операційних систем, медіаторів і Q-адаптерів через мережу передачі даних. Інтерфейс Q₃, що відіграє центральну роль в TMN, служить для стику з мережею передачі даних операційних систем, медіаторів, Q-адаптерів і мережних елементів з вбудованими функціями медіатора. Інтерфейс Q_x використовується для підключення мережних елементів до медіатора.

Інтерфейси TMN є міжопераційними, тобто являють собою формально визначений набір протоколів, процедур, форматів повідомлень і семантики, що використовуються для передачі інформації управління в рамках об'єктно-орієнтованої парадигми. Найбільш проробленим інтерфейсом TMN на сьогоднішній день є Q₃, профілі протоколів якого визначені в рекомендаціях ITU-T Q.811 і Q.812. Під профілем розуміється визначений набір протоколів, передбачених для використання на кожному із семи рівнів моделі взаємозв'язку відкритих систем OSI.

Для передачі даних може використовуватися, наприклад, мережа з комутацією пакетів по протоколу X.25, локальна мережа типу Ethernet, загальні канали сигналізації системи ЗКС 7.

9.5. Практична реалізація TMN

Незважаючи на те, що розроблення й стандартизація основних принципів TMN почалися ще в середині 80-х років ХХ століття, ступінь їхньої практичної реалізації на мережах електрозв'язку поки ще невелика.

З одного боку, це можна пояснити складністю архітектури й інтерфейсів TMN, що є неминучою платою за їхню універсальність і гнучкість. З іншого боку, термін служби основних елементів мереж електрозв'язку становить кілька десятиліть. Тому на мережах працює багато обладнання, встановленого задовго до того, як почалося розроблення принципів TMN. Для взаємодії з такими мережними елементами в TMN передбачене використання спеціальних пристроїв сполучення – Q-адаптерів, однак їхнє повсюдне впровадження зажадало б значних витрат.

Найбільшою мірою принципи TMN реалізуються при створенні систем управління мережами зв'язку на основі таких технологій, як SDH, ATM, GSM. Інтерфейси TMN повинні передбачатися у всьому новому обладнанні. На жаль, на сьогоднішній день конкретна стандартизація обмежується тільки інтерфейсами TMN (і в першу чергу найважливішим з них – Q₃), хоча в перспективі вона повинна охопити й процеси обробки інформації в операційних системах і мережних елементах. У результаті системи управління, розроблені різними виробниками, часто виявляються несумісними.

Але незважаючи на всі труднощі й перешкоди на шляху TMN, сучасні тенденції розвитку телекомунікацій неминуче ведуть до її розвитку й більш широкого впровадження.

9.6. Особливості побудови систем управління мережами SDH

Багато розглянутих можливостей синхронної цифрової ієрархії можуть бути реалізовані лише за наявності досить

розвиненої системи управління. Тому фірми, які виробляють обладнання для мереж синхронної цифрової ієрархії, пропонують і свої системи управління, реалізовані як апаратно-програмні комплекси. Ці системи якнайповніше відповідають сучасним завданням контролю та управління мережею. У разі створення загальномережної системи управління, яка побудована відповідно до принципів TMN і охоплює всі елементи мережі (комутаційні станції, аналогові системи передавання, системи передавання плезіохронної цифрової ієрархії), система управління мережею синхронної цифрової ієрархії стає її підсистемою.

Фізичну основу системи управління мережею синхронної цифрової ієрархії становлять мікропроцесорні контрольні-керуючі пристрої, інтерфейси, програмне забезпечення, влаштовані в цикли канали передавання даних і службові канали.

Щоб зрозуміти, як утворюються влаштовані канали, потрібно детальніше розглянути структуру секційного заголовка в модулі STM-1.

Байти, що входять до складу заголовка регенераторної та мультиплексорної секцій (відповідно RSOH і MSOH), призначення яких стандартизоване й пов'язане з функціями контролю та управління, були розглянуті раніше (див. рис. 6.22).

Нагадаємо, що кожен байт у синхронному транспортному модулі відповідає швидкості передавання 64 кбіт/с. Тому канал, утворений байтами D1 – D3 заголовка SOH, має швидкість 192 кбіт/с, а канал, утворений байтами D4 – D12, – 576 кбіт/с.

У структурі секційного заголовка передбачено також байти, доступні для організації додаткових каналів, які можуть використовуватися для обслуговування елементів, що не входять до мережі синхронної цифрової ієрархії (порожні клітини на рис. 6.22). Отже, розгортання засобів синхронної цифрової ієрархії полегшує створення сучасної загальномережної системи управління.

У складі трактових заголовків POH, що входять у віртуальні контейнери, також передбачається місце для сигналів контролю трактів та індикації порушень у їхній роботі.

Наявність влаштованих каналів передавання даних дає змогу організувати зв'язок деякої групи мережних елементів з операційною системою через один з мережних елементів, який називається шлюзовим. Приклад схеми організації такої взаємодії

наведено на рис. 9.8. У разі розташування декількох мережних елементів у тому приміщенні, де знаходиться і шлюзовий елемент, можна організувати передавання керуючої інформації між цими елементами через локальну мережу (рис. 9.9).



Рис. 9.8. Схема організації керуючих зв'язків у підмережі SDN (товста лінія – тракт SDN; тонка – влаштований канал передавання даних)

Серед систем управління мережами синхронної цифрової ієрархії, розроблених провідними зарубіжними фірмами, можна виділити ITM-2000 (з підсистемою I-2000), 1300NX, EMOS, PHAMOS, TMS та ін.

Стандартизовано лише нижні апаратні рівні системи управління (формати заголовків, протоколи обміну службовими каналами та інтерфейсами). Верхні рівні системи (процедури та команди управління) не стандартизовані. Тому кожна фірма,

створюючи свою систему управління, розробляє ці рівні самостійно. Це призводить до відмінностей у рішеннях різних фірм та несумісності рівнів системи.



Рис. 9.9. Схема організації керуючих зв'язків через локальну мережу (товста лінія – тракт SDH; тонка – влаштований канал передавання даних)

Найбільш типові можливості різних систем управління і тенденції їх реалізації виявлені на основі аналізу й узагальнення даних, наведених у матеріалах фірм – розробників систем управління. Основний тип операційної системи – UNIX, перевагами якої є універсальність програм, орієнтація на діалоговий режим роботи, відкритість для розширення.

Всі системи забезпечені товариським інтерфейсом користувача. Загальним правилом є відображення мережі та її елементів, що обумовлює використання кольорових графічних дисплеїв з високим ступенем розрізнення. Широко використовується графічне операційне середовище Windows.

Загальновизнаним стандартом стало використання для підтримання основних функцій управління платформи OpenView. Користувачеві надається можливість багаторівневого доступу. Основними рівнями є карта місцевості, топологія мережі, мережний елемент, окремі пристрої, модулі та блоки мережного елемента.

Для контролю роботи окремих мережних елементів використовуються місцеві термінали, в ролі яких зазвичай використовуються IBM-сумісні персональні комп'ютери. Вони приєднуються до елементів за допомогою інтерфейсу *F*. Можливе також їх дистанційне приєднання з використанням інтерфейсу *Q*. Місцеві термінали дають змогу на місці виконувати, наприклад, функції встановлення, технічного обслуговування та експлуатації елемента, а також контролювати його робочі функції. З санкції системи управління мережею або в разі втрати зв'язку з центром управління з місцевого терміналу можуть здійснюватись і функції управління.

Найважливішими можливостями систем управління мережами синхронної цифрової ієрархії є управління конфігурацією, встановлення автоматичного резервування для секцій і трактів, вибір критеріїв перемикачів на резерв, призначення синхротрас, встановлення пріоритетів для джерел хронувальних сигналів.

Великі можливості надаються в керуванні усуненням пошкоджень. Стан елементів може відображатися кольором (зелений – нормальна робота; жовтий – несуттєві пошкодження; червоний – суттєві несправності). Крім того, повідомлення про несправності видаються на дисплей і фіксуються на папері за допомогою принтера; вони можуть супроводжуватись і спеціальними звуковими сигналами. Критерії отримання тих чи інших повідомлень встановлюються оператором і можуть змінюватись. Управління операціями відбувається дистанційно з єдиного центру. Час, потрібний для реалізації операцій, становить кілька секунд, а інколи – й долі секунди.

Контрольні запитання

1. Які рівні має система управління мережами TMN?
2. Назвіть функції мережного управління.
3. З чого складається функціональна архітектура TMN?
4. Як здійснюється взаємодія між менеджером, агентом і керованими об'єктами?
5. Для чого призначені інтерфейси TMN?
6. Як здійснюється передавання команд управління в системі SDN?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Андрэ Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM / Пер. с англ.; Под ред. А.М. Бродниковского, Р.Р. Убайдуллаева, А.В. Шмалько; Общ. ред. А.В. Шмалько. – М.: EXFO, 2001. – 252 с.
2. Бакланов И.Г. Технологии измерений первичной сети. Ч. 1. Системы E1, PDH, SDH. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 142 с.
3. Баркун М.А., Ходасевич О.Р. Цифровые системы синхронной коммутации. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 186 с.
4. Беллами Дж. Цифровая телефония / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 544 с.
5. Бирюков Н.Л., Стеглов В.К. Транспортные сети и системы электросвязи. Системы мультиплексирования: Учеб. для студентов вузов по специальности «Телекоммуникации» / Под ред. В.К. Стеглова. – К., 2003. – 352 с.
6. Бройдо В.Л. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. – СПб.: ИД Питер, 2002. – 688 с.
7. Гордиенко В.Н., Ксенофонтов С.Н., Кунегин С.В., Цыбулин М.К. Современные высокоскоростные цифровые телекоммуникационные системы. Ч. 3. Группообразование в синхронной цифровой иерархии: Учеб. пособие / МТУСИ. – М., 1999. – 76 с.
8. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Эко-Трендз, 1998. – 521 с.
9. Громаков Ю.А. Цифровые сотовые системы подвижной радиосвязи с кодовым разделением каналов. – М., 1996. – 49 с.
10. Кунегин С.В. Основы технологии АТМ: Учеб.-метод. пособие. – М., 1999. – 80 с.
11. Кунегин С.В. Системы передачи информации: Курс лекций. – М., 1997. – 317 с.
12. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2001. – 672 с.
13. Симонов М.В., Матемьянова Н.С. ШЦСИО: структура и эталонная модель протоколов: Учеб. пособие. – СПб.: СПб.ГУТ, 1999. – 120 с.

14. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.
15. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. – М.: Эко-Трендз, 1999. – 148 с.
16. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проектирование телекоммуникационных сетей. – К.: Техніка, 2002. – 792 с.
17. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекоммунікаційні мережі. – К.: Техніка, 2001. – 392 с.
18. Уайндер С. Справочник по технологиям и средствам связи / Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 429 с.
19. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 486 с.
20. Уолрэнд Дж. Телекоммуникационные и компьютерные сети. – М.: Постмаркет, 2001. – 480 с.