

## ЛЕКЦІЯ 7. КОМУТАЦІЯ КАНАЛІВ І КОМУТАЦІЯ ПАКЕТІВ. ЧАСТИНА 2

### Порівняння способів комутації

| Порівняння комутації каналів і комутації пакетів                   |   |
|--|---|
| Комутація каналів  | Комутація пакетів   |
| Гарантована пропускна здатність (смуга) для взаємодіючих абонентів | Пропускна здатність мережі для абонентів невідома, затримки передачі носять випадковий характер |
| Мережа може відмовити абонентові у встановленні з'єднання          | Мережа завжди готова прийняти дані від абонента   |
| Трафік реального часу передається без затримок                     | Ресурси мережі використовуються ефективно при передачі пульсуючого трафіка                      |
| Адреса використовується тільки на етапі встановлення з'єднання     | Адреса передається з кожним пакетом   |

### Постійна й динамічна комутація

Як мережі з комутацією пакетів, так і мережі з комутацією каналів можна розділити на два класи:

- мережі з динамічною комутацією ;
- мережі з постійною комутацією.

У мережах з динамічною комутацією:

- дозволяється встановлювати з'єднання з ініціативи користувача мережі;
- комутація виконується тільки на час сеансу зв'язки, а потім ( з ініціативи одного з користувачів) розривається;
- у загальному випадку користувач мережі може з'єднатися з будь-яким іншим користувачем мережі;
- час з'єднання між парою користувачів при динамічній комутації становить від декількох секунд до декількох годин і завершується після виконання певної роботи — передачі файлу, перегляду сторінки тексту або зображення й т.п.

Прикладами мереж, що підтримують режим динамічної комутації, є телефонні мережі загального користування, локальні мережі, мережі TCP/IP.

Мережа, що працює в режимі постійної комутації:

- дозволяє парі користувачів замовити з'єднання на тривалий період часу;
- з'єднання встановлюється не користувачами, а персоналом, що обслуговують мережа;
- період, на який устанавлюється постійна комутація, становить звичайно кілька місяців;
- режим постійної ( permanent ) комутації в мережах з комутацією каналів часто називається сервісом виділених ( dedicated ) або орендованих ( leased ) каналів;
- у тому випадку, коли постійне з'єднання через мережу комутаторів устанавлюється за допомогою автоматичних процедур, ініційованих обслуговуючим персоналом, його часто називають напівпостійним (semi-permanent) з'єднанням, на відміну від режиму ручного конфігурування кожного комутатора.

Найбільш популярними мережами, що працюють у режимі постійної комутації, сьогодні є мережі технології SDH, на основі яких будуються виділені канали зв'язку із пропускнуою здатністю в трохи гигабіт у секунду.

Деякі типи мереж підтримують обоє режиму роботи. Наприклад, мережі X.25 і АТМ можуть надавати користувачеві можливість динамічно зв'язатися з будь-яким іншим користувачем мережі й у той же час відправляти дані по постійному з'єднанню певному абонентові.

#### Пропускна здатність мереж з комутацією пакетів

Одним з відмінностей методу комутації пакетів від методу комутації каналів є невизначеність пропускнуої здатності з'єднання між двома абонентами. У випадку комутації каналів після утвору складеного каналу ; пропускна здатність мережі при передачі даних між кінцевими вузлами відома — це пропускна здатність - каналу. Дані після затримки, пов'язаної із установами каналу, починають передаватися на максимальній для каналу швидкості. Час передачі повідомлення в мережі з комутацією каналів  $T_{к.к.}$  дорівнює сумі затримки поширення сигналу по лінії зв'язку й затримки передачі повідомлення. Затримка поширення сигналу залежить від швидкості поширення електромагнітних хвиль у конкретному фізичному середовищі, яке коливається від 0,6 до 0,9 швидкості світла у вакуумі. Час передачі повідомлення рівно  $V/C$ , де  $V$  — обсяг повідомлення в бітах, а  $C$  — пропускна здатність - каналу в бітах у секунду.

У мережі з комутацією пакетів картина зовсім інша.

Процедура встановлення з'єднання в цих мережах, якщо вона використовується, займає приблизно таке ж час, як і в мережах з комутацією каналів, тому будемо порівнювати тільки час передачі даних.

Передбачається, що по мережі передається повідомлення того ж обсягу, що й повідомлення, передане однак воно розділене на пакети, кожний з яких постачений заголовком. Час передачі повідомлення в мережі з комутацією пакетів позначене на малюнку  $T_{к.п.}$ . При передачі цього розбитого на пакети повідомлення по мережі з комутацією пакетів виникають додаткові затримки. По-перше, це затримки в джерелі передачі, яке, крім передачі властиво повідомлення, витрачає додатковий час на передачу заголовків  $t_{п.з.}$ , до того ж додаються затримки  $t_{инт.}$ , викликані інтервалами між передачею кожного наступного пакета (цей час іде на формування чергового пакета стеком протоколів).

По-друге, додатковий час витрачається в кожному комутаторі. Тут затримки складаються із часу буферизації - пакета  $t_{б.п.}$  ( комутатор не може почати передачу пакета, не прийнявши його повністю у свій буфер) і часу комутації  $t_{к.}$ . Час буферизації дорівнює часу приймання пакета з бітовою швидкістю протоколу. Час комутації складається із часу очікування пакета в черзі й часу переміщення пакета у вихідний порт. Якщо час переміщення пакета фіксоване й, як правило, невелике ( від декількох мікросекунд до декількох десятків мікросекунд), то час очікування пакета в черзі коливається в дуже широких межах і заздалегідь невідомо, тому що залежить від поточного завантаження мережі.

Проведемо грубу оцінку затримки при передачі даних у мережах з комутацією пакетів у порівнянні з мережами з комутацією каналів на найпростішому прикладі. Нехай тестове повідомлення, яке потрібно передати в обох видах мереж, має обсяг 200 Кбайт. Відправник перебуває від одержувача на відстані 5000 км. Пропускна здатність ліній зв'язку становить 2 Мбіт/с.

Час передачі даних по мережі з комутацією каналів складається із часу поширення сигналу, яке для відстані 5000 км можна оцінити приблизно в 25 мс (ухвалюючи швидкість поширення сигналу рівної  $2/3$  швидкості світла), і часу передачі повідомлення, яке при пропускній здатності 2 Мбіт/с і довжині повідомлення 200 Кбайт рівно приблизно 800 мс. При розрахунках коректне значення ДО (210), рівне 1024, округлялося до 1000, аналогічне значення М (220), рівне 1048576, округлялося до 1000000. Таким чином, передача даних оцінюється в 825 мс.

Ясно, що при передачі цього повідомлення по мережі з комутацією пакетів, що володіє такою ж сумарною довжиною й пропускною здатністю - каналів, що пролягають від відправника до одержувача, час поширення сигналу й час передачі даних будуть такими ж — 825 мс. Однак через затримки в проміжних вузлах загальний час передачі даних збільшиться. Давайте оцінимо, на скільки зросте цей час. Будемо вважати, що шлях від відправника до одержувача пролягає через 10 комутаторів. Нехай вихідне повідомлення розбивається на пакети в 1 Кбайт, усього 200 пакетів. Спочатку оцінимо затримку, яка виникає у вихідному вузлі. Припустимо, що частка службової інформації, розміщеної в заголовках пакетів, стосовно загального обсягу повідомлення становить 10%. Отже, додаткова затримка, пов'язана з передачею заголовків - пакетів, становить 10% від часу передачі цілого повідомлення, тобто 80 мс. Якщо прийняти інтервал між відправленням пакетів рівним 1 мс, то додаткові втрати за рахунок інтервалів складуть 200 мс. Таким чином, у вихідному вузлі через пакетування повідомлення при передачі виникла додаткова затримка в 280 мс.

Кожний з 10 комутаторів вносить затримку комутації, яка може становити від часток до тисяч мілісекунд. У даному прикладі будемо вважати, що на комутацію в середньому витрачається 20 мс. Крім того, при проходженні повідомлень через комутатор виникає затримка буферизації пакета. Ця затримка при величині пакета 1 Кбайт і пропускної здатності лінії 2 Мбіт/с рівна 4 мс. Загальна затримка, внесена 10 комутаторами, становить приблизно 240 мс. У результаті додаткова затримка, створена мережею з комутацією пакетів, склала 520 мс. Враховуючи, що вся передача даних у мережі з комутацією каналів зайняла 825 мс, цю додаткову затримку можна вважати істотною.

Хоча наведений розрахунок носить дуже приблизний характер, він пояснює, чому процес передачі для певної пари абонентів у мережі з комутацією пакетів є більш повільним, чому в мережі з комутацією каналів.

Невизначена пропускна здатність - мережі з комутацією пакетів — це плата за її загальну ефективність при деякому обмеженні інтересів окремих абонентів. Аналогічно, у

мультипрограмній операційній системі час виконання додатка передбачити неможливо, тому що воно залежить від кількості інших додатків, з якими даний додаток ділить процесор.

На ефективність роботи мережі впливають розміри пакетів, які передає мережа. Занадто більші розміри пакетів наближають мережа з комутацією пакетів до мережі з комутацією каналів, тому ефективність мережі падає. Крім того, при великому розмірі пакетів збільшується час буферизації на кожному комутаторі. Занадто малі пакети помітно збільшують частку службової інформації, тому що кожний пакет містить заголовок фіксованої довжини, а кількість пакетів, на які розбиваються повідомлення, при зменшенні розміру пакета буде різко рости. Існує деяка "золота середина", коли забезпечується максимальна ефективність роботи мережі, однак це співвідношення важке визначити точно, тому що воно залежить від багатьох факторів, у тому числі мінливих у процесі роботи мережі. Тому розроблювачі протоколів для мереж з комутацією пакетів вибирають межі, у яких може перебувати розмір пакета, а точніше його поле даних, тому що заголовок, як правило, має фіксовану довжину. Звичайно нижня межа поля даних вибирається рівним нулю, що дає можливість передавати службові пакети без користувацьких даних, а верхня межа не перевищує 4 Кбайт. Додатка при передачі даних намагаються зайняти максимальний розмір поля даних, щоб швидше виконати обмін, а невеликі пакети звичайно використовуються для коротких службових повідомлень, що містять, приміром, підтвердження доставки пакета.

При виборі розміру пакета необхідно також урахувати інтенсивність бітових помилок каналу. На ненадійних каналах необхідно зменшувати розміри пакетів, тому що це скорочує обсяг повторно переданих даних при викривленнях пакетів.

Ethernet — приклад стандартної технології комутації пакетів

Розглянемо, яким образом описані вище загальні підходи до вирішення проблем побудови мереж втілена в найбільш популярній мережній технології — Ethernet. (Помітимо, що ми не будемо зараз докладно розглядати саму технологію — відкладемо це важливе питання до наступного курсу, а сьогодні зупинимося лише на деяких принципових моментах базових концепцій, що ілюструють ряд уже розглянутих.)

Мережна технологія — це погоджений набір стандартних протоколів і програмно-апаратних засобів (наприклад, мережних адаптерів, драйверів, кабелів і рознімів), достатній для побудови обчислювальної мережі.

Епітет "достатній" підкреслює та обставину, що мова йде про мінімальний набір засобів, за допомогою яких можна побудувати працездатну мережу. Цю мережу можна вдосконалити, наприклад, за рахунок виділення в ній подсетей, що відразу зажадає крім протоколів стандарту Ethernet застосування протоколу IP, а також спеціальних комунікаційних пристроїв — маршрутизаторів. Удосконалена мережа буде, швидше за все, більш надійною й швидкодіючою, але за рахунок надбудов над засобами технології Ethernet, яка склала базис мережі.

Термін " мережна технологія " найчастіше використовується в описаному вище вузькому змісті, але іноді застосовується і його розширене тлумачення як будь-якого набору засобів і

правил для побудови мережі, наприклад "технологія наскрізної маршрутизації", "технологія створення захищеного каналу", "технологія Ір-Мереж".

Протоколи, на основі яких будується мережа певної технології (у вузькому змісті), створювалися спеціально для спільної роботи, тому від розроблювача мережі не потрібно додаткових зусиль по організації їх взаємодії. Іноді мережні технології називають базовими технологіями, маючи у виді, що на їхній основі будується базис будь-якої мережі. Прикладами базових мережних технологій можуть служити поряд з Ethernet такі відомі технології локальних мереж як Token Ring і FDDI, або ж технології територіальних мереж X.25 і frame relay. Для одержання працездатної мережі в цьому випадку досить придбати програмні й апаратні засоби, що ставляться до однієї базової технології — мережні адаптери із драйверами, концентратори, комутатори, кабельну систему й т.п., — і з'єднати їх відповідно до вимог стандарту на дану технологію.

Отже, для мережної технології - Ethernet характерні:

- комутація пакетів ;
- типова топологія - "загальна шина" ;
- плоска числова адресація ;
- поділюване передавальне середовище.

Основний принцип, покладений в основу Ethernet, — випадковий метод доступу до поділюваного середовища передачі даних. У якості такого середовища може використовуватися товстий або тонкий коаксіальний кабель, кручена пара, оптоволокно або радіохвилі ( до речі, першою мережею, побудованою на принципі випадкового доступу до поділюваного середовища, була радіомережа Aloha Гавайського університету).

У стандарті Ethernet строго зафіксована топологія електричних зв'язків. Комп'ютери підключаються до поділюваного середовища відповідно до типової структури "загальна шина". За допомогою поділюваної в часі шини будь-які два комп'ютери можуть обмінюватися даними. Керування доступом до лінії зв'язку здійснюється спеціальними контролерами — мережними адаптерами - Ethernet. Кожний комп'ютер, а точніше, кожний мережний адаптер, має унікальну адресу. Передача даних відбувається зі швидкістю 10 Мбіт/с. Ця величина є пропускною здатністю мережі Ethernet.

Суть випадкового методу доступу полягає в наступному. Комп'ютер у мережі Ethernet може передавати дані по мережі, тільки якщо мережа вільна, тобто якщо ніякий інший комп'ютер у цей момент не займається обміном. Тому важливою частиною технології Ethernet є процедура визначення доступності середовища.

Після того як комп'ютер переконався, що мережа вільна, він починає передачу й при цьому "захоплює" середовище. Час монопольного використання поділюваного середовища одним вузлом обмежується часом передачі одного кадру. Кадр — це одиниця даних, якими обмінюються комп'ютери в мережі Ethernet. Кадр має фіксований формат і поряд з полем даних містить різну службову інформацію, наприклад адресу одержувача й адресу відправника.

Мережа Ethernet улаштована так, що при влученні кадра в поділюване середовище передачі даних усі мережні адаптери починають одночасно ухвалювати цей кадр. Усі вони аналізують адресу призначення, що розташовується в одному з початкових полів кадра, і, якщо ця адреса збігається з їхнім власним, кадр міститься у внутрішній буфер мережного адаптера. У такий спосіб комп'ютер-адресат одержує призначені йому дані.

Може виникнути ситуація, коли кілька комп'ютерів одночасно вирішують, що мережа вільна, і починають передавати інформацію. Така ситуація, називана колізією, перешкоджає правильній передачі даних по мережі. У стандарті Ethernet передбачений алгоритм виявлення й коректної обробки колізій. Імовірність виникнення колізії залежить від інтенсивності мережного трафіка.

Після виявлення колізії - мережні адаптери, які намагалися передати свої кадри, припиняють передачу й після паузи випадкової тривалості намагаються знову одержати доступ до середовища й передати той кадр, який викликав колізію.

#### Основні гідності технології Ethernet

1. Головною гідністю мереж Ethernet, завдяки якому вони стали такими популярними, є їхня економічність. Для побудови мережі досить мати по одному мережному адаптеру для кожного комп'ютера плюс один фізичний сегмент коаксіального кабелю потрібної довжини.

2. Крім того, у мережах Ethernet реалізовані досить прості алгоритми доступу до середовища, адресації й передачі даних. Простота логіки роботи мережі веде до спрощення й, відповідно, зниженню вартості мережних адаптерів і їх драйверів. По тій же причині адаптери мережі Ethernet мають високу надійність.

3. І, нарешті, ще однією чудовою властивістю мереж Ethernet є їхня гарна розширюваність, тобто можливість підключення нових вузлів.

Інші базові мережні технології, такі як Token Ring і FDDI, хоча й мають індивідуальні риси, у той же час мають багато загального з Ethernet. У першу чергу, це застосування регулярних фіксованих топологій ("ієрархічна зірка" і "кільце"), а також поділюваних середовищ передачі даних. Істотні відмінності однієї технології від іншої пов'язані з особливостями використовуваного методу доступу до поділюваного середовища. Так, відмінності технології Ethernet від технології Token Ring багато в чому визначаються специфікою закладених у них методів поділу середовища — випадкового алгоритму доступу в Ethernet і методу доступу шляхом передачі маркера в Token Ring.

#### Дейтаграмна передача

У мережах з комутацією пакетів сьогодні застосовується два класи механізмів передачі пакетів:

- дейтаграмна передача;
- віртуальні канали.

Прикладами мереж, що реалізують дейтаграмний механізм передачі, є мережі Ethernet, IP і IPX. За допомогою віртуальних каналів передають дані мережі X.25, frame relay і ATM. Спочатку ми розглянемо базові принципи дейтаграмного підходу.

Дейтаграмний спосіб передачі даних заснований на тому, що всі передані пакети обробляються незалежно друг від друга, пакет за пакетом. Приналежність пакета до певного потоку між двома кінцевими вузлами й двома додатками, що працюють на цих вузлах, ніяк не враховується.

Вибір наступного вузла — наприклад, комутатора Ethernet або маршрутизатора IP/IPX — відбувається тільки на підставі адреси вузла призначення, що втримується в заголовку пакета. Розв'язок про те, якому вузлу передати пришедший пакет, ухвалюється на основі таблиці, що містить набір адрес призначення й адресну інформацію, що однозначно визначає наступний (транзитний або кінцевий) вузол. Такі таблиці мають різні назви — наприклад, для мереж Ethernet вони звичайно називаються таблицею просування (forwarding table), а для мережних протоколів, таких як IP і IPX, — таблицями маршрутизації (routing table). Далі для простоти будемо користуватися терміном "таблиця маршрутизації" у якості узагальненого назви такого роду таблиць, використовуваних для дейтаграмний передачі на підставі тільки адреси призначення кінцевого вузла.

У таблиці маршрутизації для того самого адреси призначення може втримуватися кілька записів, що вказують, відповідно, на різні адреси наступного маршрутизатора. Такий підхід використовується для підвищення продуктивності й надійності мережі. У прикладі пакети, що надходять у маршрутизатор R1 для вузла призначення з адресою N2, A2, з метою балансу навантаження розподіляються між двома наступними маршрутизаторами — R2 і R3, що знижує навантаження на кожний з них, а виходить, зменшує черги й прискорює доставку. Деяка "розмитість" шляхів проходження пакетів з тим самим адресою призначення через мережу є прямим наслідком принципу незалежної обробки кожного пакета, властивого дейтаграмним протоколам. Пакети, що впливають по тому самому адресі призначення, можуть добиратися уводити, увести до ладу нього різними шляхами й внаслідок зміни стану мережі, наприклад відмови проміжних маршрутизаторів.

Така особливість дейтаграмного механізму як розмитість шляхів проходження трафіка через мережу також у деяких випадках є недоліком. Наприклад, якщо пакетам певної сесії між двома кінцевими вузлами мережі необхідно забезпечити задану якість обслуговування. Сучасні методи підтримки Qos працюють ефективніше, коли трафік, якому потрібно забезпечити гарантії обслуговування, завжди проходить через ті самі проміжні вузли.

#### Віртуальні канали в мережах з комутацією пакетів

Механізм віртуальних каналів ( virtual circuit або virtual channel ) створює в мережі стійкі шляхи проходження трафіка через мережу з комутацією пакетів. Цей механізм ураховує існування в мережі потоків даних.

Якщо метою є прокладка для всіх пакетів потоку єдиного шляху через мережу, то необхідним (але не завжди єдиним) ознакою такого потоку повинне бути наявність для всіх його пакетів загальних крапок входу й виходу з мережі. Саме для передачі таких потоків у мережі створюються віртуальні канали. Розглянемо фрагмент мережі, у якій прокладено два віртуальні

канали. Перший проходить від кінцевого вузла з адресою N1, A1 до кінцевого вузла з адресою N2, A2 через проміжні комутатори мережі R1, R3, R7 і R4. Другий забезпечує просування даних по шляху N3, A3 — R5 — R7 — R4 — N2, A2. Між двома кінцевими вузлами може бути прокладено кілька віртуальних каналів, що як повністю збігаються відносно шляху проходження через транзитні вузли, що так і відрізняються.

Мережа тільки забезпечує можливість передачі трафіка уздовж віртуального каналу, а які саме потоки будуть передаватися по цих каналах, вирішують самі кінцеві вузли. Вузол може використовувати той самий віртуальний канал для передачі всіх потоків, які мають загальні з даним віртуальним каналом кінцеві крапки, або ж тільки частини з них. Наприклад, для потоку реального часу можна використовувати один віртуальний канал, а для трафіка електронної пошти — іншої. В останньому випадку різні віртуальні канали будуть висувати різні вимоги до якості обслуговування, і задовольнити їх буде простіше, чим у тому випадку, коли по одному віртуальному каналу передається трафік з різними вимогами до параметрів Qos.

Важливою особливістю мереж з віртуальними каналами є використання локальних адрес пакетів при ухваленні рішення про передачу. Замість досить довгої адреси вузла призначення (його довжина повинна дозволяти унікально ідентифікувати всі вузли й підсети в мережі, наприклад технологія ATM оперує адресами довжиною в 20 байт) застосовується локальна, тобто мінлива від вузла до вузла, мітка, якої позначаються всі пакети, переміщувані по певному віртуальному каналу. Ця мітка в різних технологіях називається по-різному: у технології X.25 — номер логічного каналу (Logical Channel number, LCN), у технології frame relay — ідентифікатор з'єднання рівня каналу даних (Data Link Connection Identifier, DLCI), у технології ATM — ідентифікатор віртуального каналу (Virtual Channel Identifier, VCI). Однак призначення її скрізь однакове — проміжний вузол, називаний у цих технологіях комутатором, читає значення мітки із заголовка пришедшого пакета й переглядає свою таблицю комутації, у якій вказується, на який вихідний порт потрібно передати пакет. Таблиця комутації містить запису тільки про минаючих через даний комутатор віртуальних каналах, а не про всі наявні в мережі вузли (або підсетях, якщо застосовується ієрархічний спосіб адресації). Звичайно у великій мережі кількість прокладених через вузол віртуальних каналів суттєво менше кількості вузлів і підсетей, тому по розмірах таблиця комутації набагато менше таблиці маршрутизації, а, отже, перегляд займає набагато менше часу й не вимагає від комутатора великої обчислювальної потужності.

Ідентифікатор віртуального каналу (саме така назва мітки буде використовуватися далі) також набагато коротше адреси кінцевого вузла ( по тій же причині), тому й надмірність заголовка пакета, який тепер не містить довгої адреси, а переносить по мережі тільки ідентифікатор, суттєво менше.