ЛЕКЦІЯ 4

Архітектура міських мереж Metro Ethernet

Подвійне тегування (QinQ, PBB)

Навчальна дисципліна

«Глобальні мережі»

Державний університет «Житомирська політехніка»
Кафедра кібербезпеки та захисту інформації

Що було й що буде сьогодні

Пригадуємо ключове з лекції 3 та плануємо лекцію 4

← Лекція 3: що знаємо

- Carrier Ethernet — операторський Ethernet
- 5 атрибутів MEF: SLA, масштабованість, надійність
- UNI · NNI · EVC — інтерфейси й з'єднання
- E-Line, E-LAN, E-Tree — 3 послуги MEF
- EtherChannel: IEEE 802.1AX, до 8 портів
- LACP vs PAgP; MCEC (vPC / VSS)

Лекція 4: що вивчимо →

1. Трирівнева архітектура Metro Ethernet
2. Транспортні технології (Native, EoS, EoMPLS)
3. Проблема 4094 VLAN
4. QinQ: подвійне тегування 802.1ad
5. Структура фрейму: S-tag + C-tag
6. Режими QinQ: Port-based та Selective
7. PBB (802.1ah) — MAC-in-MAC
8. Захист кільцевих топологій: ERPS та RPR

Трирівнева архітектура Metro Ethernet

Доступ · Агрегація · Ядро — ієрархічна модель побудови міських мереж

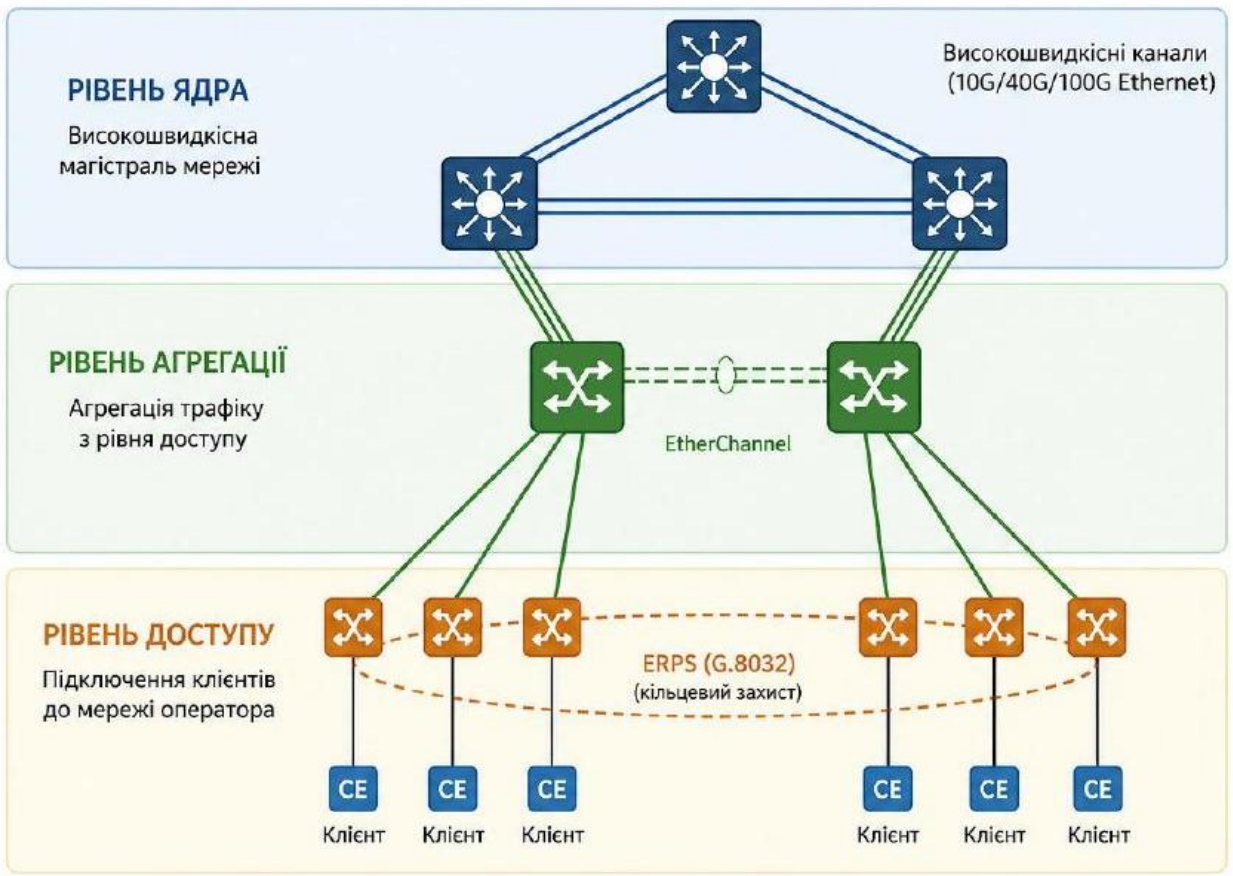


Рисунок 5.5 – Трирівнева архітектура Metro Ethernet: доступ, агрегація, ядро

Ядро (Core)

Високошвидкісний транспорт між вузлами агрегації

- 10G / 40G / 100G Ethernet канали
- Мінімальна обробка — просто передача
- Оперує S-VLAN або B-VID (у PBB)
- Повнозв'язна топологія

Агрегація (Aggregation)

Об'єднання трафіку від рівня доступу

- Агрегація EVC, міжвузловий OAM
- Складна QoS-обробка
- EtherChannel між комутаторами
- Selective QinQ (за потреби)

Доступ (Access)

Підключення клієнтського обладнання CE через UNI

- 10 Мбіт/с — 10 Гбіт/с
- Класифікація клієнтського трафіку
- Додавання S-VLAN тегів (QinQ)
- Bandwidth profiles, базова QoS

Транспортні технології Metro Ethernet

Еволюція від простого Ethernet до масштабованого EoMPLS

Native Ethernet

простий і дешевий

Ethernet-фрейми напряму через мережу L2-комутаторів

✓ **Плюси:** простота, низька вартість

✗ **Мінуси:** обмежена масштабованість; STP повільний

Застосування:
невеликі мережі, доступ

Ethernet over SONET/SDH (EoS)

перехідне рішення

транспорт Ethernet-фреймів через існуючу SDH/SONET-інфраструктуру

✓ **Плюси:** використання наявного TDM-обладнання; надійність SDH

✗ **Мінуси:** складність, дорого; TDM-специфіка

Застосування:
MSPP-платформи (Cisco ONS 15454), E/G/ML-Series карти

Ethernet over MPLS (EoMPLS)

сучасний стандарт

інкапсуляція Ethernet у MPLS для транспорту у ядрі

✓ **Плюси:** L2/L3 VPN, QoS через MPLS TE, FRR < 50 мс

✗ **Мінуси:** складна інженерія, потрібне MPLS-обладнання

Застосування:
VPWS (E-Line), VPLS/EVPN (E-LAN), EVPN — сучасний варіант

Проблема: 4094 VLAN — це катастрофічно мало

Обмеження стандарту IEEE 802.1Q, яке не дозволяє масштабувати операторську мережу

VLAN ID у 802.1Q

4094

унікальних VLAN

12 бітів у полі VID · $2^{12} = 4096$

(значення 0 та 4095 зарезервовані)

⚠ **недостатньо для оператора**
з тисячами клієнтів

Реальний сценарій оператора

Оператор має **10 000 клієнтів.** Кожен клієнт має власну VLAN-структуру: наприклад, VLAN 10 для голосу, VLAN 20 для відео, VLAN 30 для даних.

Проблема 1: оператор не може обслуговувати більше 4094 клієнтів в одному Ethernet-домені. Це неприйнятно.

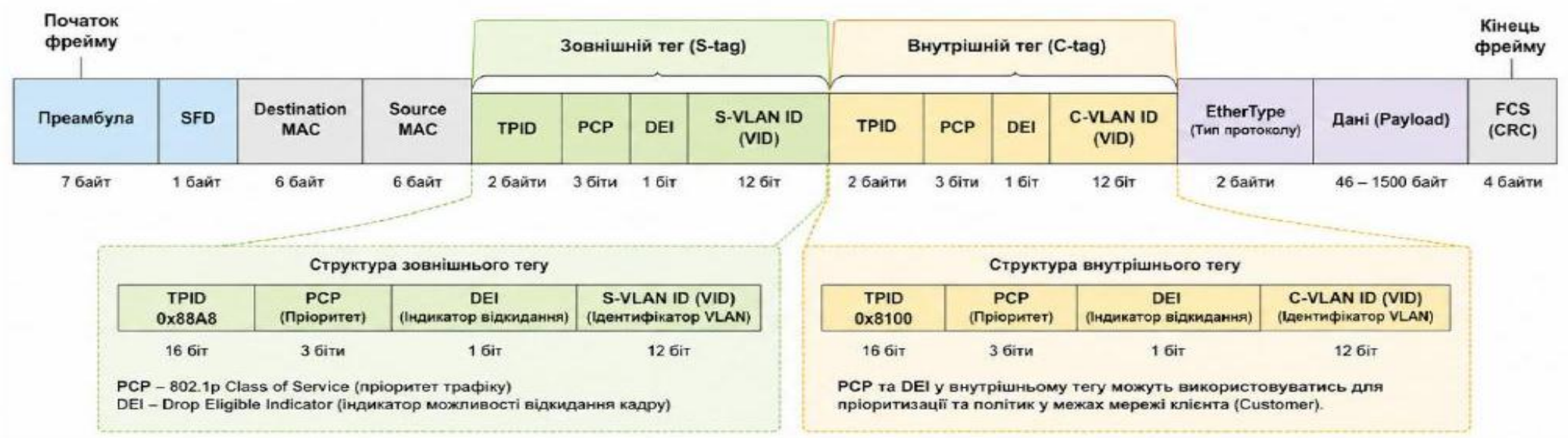
Проблема 2: VLAN-номери клієнтів *перетинаються.* Клієнт А використовує VLAN 10, клієнт Б — теж VLAN 10. Як їх ізолювати?

☑ Рішення: QinQ — ієрархія VLAN з подвійним тегуванням

до 4094 × 4094 ≈ 16,8 млн унікальних комбінацій — розглянемо на наступному слайді

QinQ — подвійне тегування 802.1ad

«802.1Q всередині 802.1Q» · S-tag (оператор) + C-tag (клієнт)



S-tag (зовнішній)

EtherType 0x88A8 · VID оператора

додається на UNI оператором

C-tag (внутрішній)

EtherType 0x8100 · VID клієнта

оригінальний тег клієнта

Простір ID

4094 × 4094 ≈ 16,8 млн

комбінацій S-VID + C-VID

Розмір фрейму

+8 байтів (два теги 4+4)

до 1526 байтів — потрібен baby giant/jumbo

Режими обробки QinQ на межі UNI

Port-based vs Selective — як призначається S-VLAN ID

Port-based QinQ

basic QinQ · простіший варіант

Принцип:

усі фрейми з порту UNI отримують **однаковий S-VLAN ID** незалежно від їх C-VLAN

Конфігурація:

S-VLAN просто прив'язується до порту — примітивно і швидко

Сценарій застосування:

один фізичний порт UNI = один клієнт; УСІ VLAN клієнта транспортуються через мережу оператора під одним S-VLAN

Приклад:

клієнт А отримує порт з S-VLAN 100; всі його C-VLAN (10, 20, 30…) ідуть під S-VLAN 100

Selective QinQ

VLAN-based QinQ · гнучкіший варіант

Принцип:

S-VLAN ID призначається на основі значення **C-VLAN ID** вхідного фрейму

Конфігурація:

правила відображення C-VLAN → S-VLAN; складніше, ніж port-based

Сценарій застосування:

один фізичний порт UNI розподіляється на кілька сервісів; трафік клієнта розділяється на різні S-VLAN за типом послуги

Приклад:

C-VLAN 10–20 → S-VLAN 100 (Інтернет)
C-VLAN 30–40 → S-VLAN 200 (голос VoIP)

Порівняння: звичайний VLAN vs QinQ

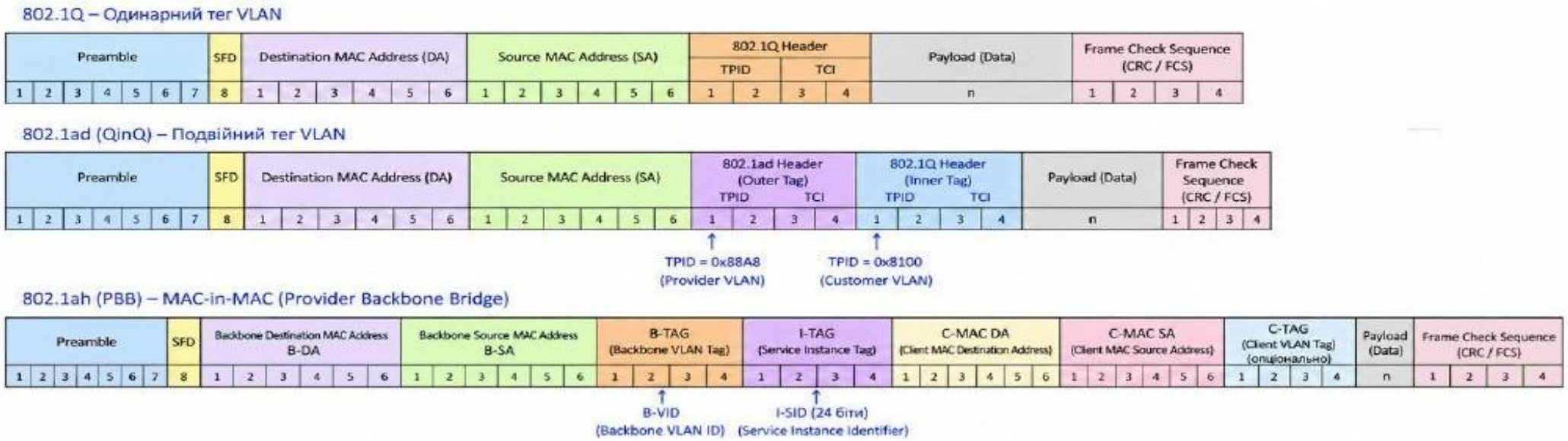
Таблиця 5.1 — 802.1Q vs 802.1ad

Критерій	Звичайний VLAN (802.1Q)	QinQ (802.1ad)
Кількість тегів	один (C-tag)	два (S-tag + C-tag)
EtherType тегу	0x8100	Зовн. 0x88A8, внутр. 0x8100
Простір VLAN ID	4094	4094 × 4094 ≈ 16,8 млн
Призначення	сегментація LAN	ізоляція клієнтів оператора
Прозорість для клієнта	клієнт бачить VLAN оператора	клієнт повністю ізольований
Збільшення розміру фрейму	+4 байти	+8 байтів (два теги)
Масштабованість	обмежена (4094)	висока (мільйони)
Сфера застосування	корпоративні LAN	операторські MAN / WAN

→ **Головна ідея: QinQ** *= той самий VLAN-механізм, але з подвоєною ієрархією тегування — і зростанням масштабу у 4000 разів*

PBB (802.1ah) — MAC-in-MAC інкапсуляція

Provider Backbone Bridging — наступний рівень масштабування після QinQ



⚠ Проблема QinQ

У великих мережах **MAC-таблиці** магістральних комутаторів стають **надзвичайно великими:**

мають вивчати MAC-адреси *усіх клієнтських пристроїв* з усіх VLAN. Пам'ять комутатора вичерпується.

☑ Рішення PBB (802.1ah)

Інкапсуляція *«MAC-in-MAC»:*

весь клієнтський Ethernet-фрейм (з MAC клієнта) інкапсулюється у новий фрейм із **MAC-адресами магістралі** (B-MAC).

→ *Магістральні комутатори бачать лише B-MAC граничних BEB — не тисячі клієнтських MAC.*

🎯 Нові ідентифікатори PBB

B-VID (Backbone VLAN ID)

→ *12 біт · магістральні VLAN*

I-SID (Service Instance ID)

→ **24 біти** · ***до 16 млн сервісів!***

Еволюція масштабованості: 802.1Q → 802.1ad → 802.1ah

Три покоління VLAN stacking для різних масштабів мереж

IEEE 802.1Q
Одинарний VLAN

4 094

VLAN

Один тег C-VLAN. Стандарт LAN.

Масштаб:
Корпоративні мережі

IEEE 802.1ad
QinQ — подвійне тегування

≈ 16,8 млн

комбінацій

S-tag + C-tag. Ізоляція клієнтів на межі UNI.

Масштаб:
Оператори середнього масштабу

IEEE 802.1ah
PBB — MAC-in-MAC

≈ 16 млн

сервісів (I-SID)

Інкапсуляція клієнтських фреймів у магістральні.

Масштаб:
Великі оператори та ЦОД

ERPS (G.8032) — кільцевий захист для Ethernet

Ethernet Ring Protection Switching — стандарт ITU-T; заміна STP у кільцях

Час перемикання

< 50

мілісекунд

порівняно з STP (30–50 сек)

Як працює ERPS

1. У кільці визначається спеціальний канал **RPL** (Ring Protection Link) — він **заблокований** у нормальному режимі — це запобігає петлі
2. Для координації вузлів кільця використовується протокол **R-APS** (Ring Automatic Protection Switching)
3. При відмові каналу — ERPS **деблокує RPL** і переключає трафік на резервний шлях за менш ніж 50 мс

Стандарт	Тип топології	Клас	Порівняння
ITU-T G.8032	кільцева (одиночна або взаємопов'язана)	carrier grade	≈ 1000× швидший за STP

★ **50 мс — це стандарт «carrier grade»:** *без нього Ethernet-мережа не може вважатися повноцінним замінником SDH/SONET у транспорті операторів*

RPR (IEEE 802.17) — Resilient Packet Ring

Технологія для кільцевих топологій із ефективним використанням смуги

Ключова особливість: Spatial Reuse

«Просторове перевикористання смуги»

Фрейми, адресовані вузлу в кільці, **видаляються** з кільця цим вузлом — вивільняючи смугу для інших сегментів.

Порівняння з SDH UPSR: у SDH трафік проходить через ВСЕ кільце навіть якщо призначення — сусідній вузол. У RPR — тільки до потрібного вузла.

→ *Ефективніше використання смуги; кожен сегмент кільця може нести інший трафік одночасно*

Швидке відновлення (< 50 мс)

Два механізми захисту від відмов

1. **Wrapping** *(«обмотування»)*

у точці відмови трафік **автоматично перенаправляється** на зворотне кільце

2. **Steering** *(«керування напрямом»)*

на **вхідному вузлі** вибирається оптимальний напрям (за годинниковою чи проти)

Практичний контекст

- Кільцеві топології — типові для міських мереж *завдяки існуючій топології волоконно-оптичних кабелів у місті*
- **Реалізація Cisco:** ML-Series карти платформи ONS 15454 підтримують RPR-топологію
- Використовується для побудови **стійких Ethernet-кілець** поверх SONET-інфраструктури
- *Сьогодні поступається місцем ERPS (простіший) і MPLS (масштабованіший)*

Порівняння протоколів захисту від петель

STP · RSTP · MSTP · ERPS · RPR — де що використовувати

Технологія	Стандарт	Час перемикання	Топологія	Сфера
STP	IEEE 802.1D	30 – 50 сек	будь-яка	класична LAN (застаріла)
RSTP	IEEE 802.1w	кілька секунд	будь-яка	сучасна LAN
MSTP	IEEE 802.1s	кілька секунд	з множ. VLAN	оператор + QinQ
ERPS	**ITU-T G.8032**	**< 50 мс**	**кільце**	**Carrier Ethernet (де-факто)**
RPR	IEEE 802.17	< 50 мс	кільце	Metro поверх SDH (легасі)
EtherChannel	IEEE 802.1AX	мс (failover)	point-to-point	агрегація каналів

Практичні рекомендації

- **Кільце Metro Ethernet:** ERPS (G.8032) · **Мережа з QinQ і множинними VLAN:** MSTP · **Точка-точка з дублюванням:** EtherChannel (LACP)
- **STP** у сучасних операторських мережах **не використовується** через занадто повільну конвергенцію

Типовий стек технологій операторської Metro Ethernet

Як усе, що ми розглянули, вписується в цілісну картину

Рівень доступу

UNI · підключення клієнта

- 802.1Q (клієнтські VLAN)
- 802.1ad QinQ (S-tag операт.)
- ERPS для кільцевого захисту

Рівень агрегації

об'єднання трафіку від доступу

- EtherChannel (LACP 802.1AX)
- Selective QinQ
- MSTP для управління VLAN

Рівень ядра (core)

магістральний транспорт

- EoMPLS (VPWS, VPLS, EVPN)
- PBB (802.1ah, MAC-in-MAC)
- FRR для швидкого відновлення

→ **Metro Ethernet** інтегрує технології **QinQ, EtherChannel, ERPS, MPLS та RPR** *у цілісну операторську архітектуру*

Підсумок лекції

01 **3-рівнева архітектура Metro Ethernet**
Доступ · Агрегація · Ядро — ієрархія для масштабованості

02 **Транспортні технології**
Native Ethernet · EoS (SDH) · EoMPLS (сучасний варіант)

03 **Проблема 4094 VLAN**
12 біт VID катастрофічно мало для оператора з тисячами клієнтів

04 **QinQ (802.1ad)**
S-tag + C-tag; 16,8 млн комбінацій; TPID 0x88A8; порт-based і selective

05 **PBB (802.1ah) — MAC-in-MAC**
інкапсуляція; B-VID + I-SID (24 біти → 16 млн сервісів)

06 **Захист кільцевих топологій**
ERPS (G.8032, < 50 мс, де-факто стандарт); RPR (802.17, spatial reuse)

База для лаб. робіт: *№2, №5, №6*

→ **Наступна лекція:** *послідовні канали WAN, HDLC та PPP*



Ваші запитання

Обговорення матеріалу лекції

Дякую за увагу!