ЛЕКЦІЯ 8

Транспортна інфраструктура

первинні (SDH, DWDM, OTN) та накладені (overlay) мережі

Навчальна дисципліна

«Глобальні мережі»

Державний університет «Житомирська політехніка»
Кафедра комп'ютерної інженерії та кібербезпеки · 2026

Що було й що буде сьогодні

Пригадуємо ключове з попередніх лекцій та плануємо лекцію 8

← Лекції 5-7: що знаємо

- T1 (1,544 Мбіт/с), E1 (2,048 Мбіт/с)
- HDLC, PPP (RFC 1661), PAP/CHAP
- QoS: DSCP, LLQ, WRED
- MLPPP (RFC 1990): агрегація каналів
- MPLS VPN, EtherChannel, ECMP
- Metro Ethernet: QinQ, PBB, ERPS

Лекція 8: що вивчимо →

1. Первинні мережі — концепція
2. PDH: історична основа (E1/T1)
3. SDH (ITU-T G.707): STM-1…256
4. Топології SDH та захист 50 мс
5. DWDM: 40-80 хвиль в одному волокні
6. OTN (G.709): цифровий wrapper
7. Overlay vs Underlay — фундамент
8. GRE, IPsec, VXLAN, Geneve
9. NFV та багаторівнева модель

Первинні мережі — фундамент телекомунікацій

Транспортні мережі: PDH → SDH → DWDM → OTN — еволюція за 50 років

Що таке первинна мережа

Primary network (transport network) — **нижній рівень телекомунікаційної інфраструктури,** що забезпечує передачу даних між великими вузлами мережі.

Головна функція: формування високошвидкісних каналів зв'язку.

Хто користується:

- Мережі передачі даних IP / MPLS
- Мережі рухомого зв'язку (2G / 3G / 4G / 5G)
- Мережі кабельного телебачення
- Корпоративні leased lines

Первинна мережа оперує **цифровими потоками** та **оптичними сигналами** на фізичному та канальному рівнях OSI.

Еволюція первинних мереж

1970-ті — **Аналогові системи**
телефонія на аналогових каналах

1980-ті — **PDH**
плезіохронна цифрова ієрархія

1990-ті — **SDH / SONET**
синхронна ієрархія, ADM, кільцевий захист 50 мс

2000-ті — **DWDM**
оптичне мультиплексування 40-80 хвиль/волокно

2010-ті+ — **OTN + DWDM**
digital wrapper, 100-800 Гбіт/с на канал

PDH — плезіохронна цифрова ієрархія

Plesiochronous Digital Hierarchy — перша масова цифрова технологія (1970-ті)

Європейська ієрархія (E)

основа — телефонний канал 64 кбіт/с (PCM 8 кГц × 8 біт)

Рівень	Швидкість	Каналів	Мультиплексування
E1	2,048 Мбіт/с	32×64 кбіт/с	базовий рівень
E2	8,448 Мбіт/с	4 × E1	128 каналів
E3	34,368 Мбіт/с	4 × E2	512 каналів
E4	139,264 Мбіт/с	4 × E3	2048 каналів

Північноамериканська (T / DS)

Bell System (США / Канада / Японія)

Рівень	Швидкість	Каналів	Мультиплексування
T1 (DS1)	1,544 Мбіт/с	24×64 кбіт/с	базовий рівень
T2 (DS2)	6,312 Мбіт/с	4 × T1	96 каналів
T3 (DS3)	44,736 Мбіт/с	7 × T2	672 канали
T4 (DS4)	274,176 Мбіт/с	6 × T3	4032 канали

⚠ Головна проблема PDH

Немає **прямого доступу** до компонентних потоків нижчого порядку. *Щоб вилучити один E1 з E3 —* **треба ПОВНІСТЮ демультиплексувати** E3 → 4×E2 → 4×E1, витягнути потрібний, і мультиплексувати назад.

→ *Багато обладнання, енергоємно, немає механізмів автоматичного захисту.* **Ці обмеження стали причиною розробки SDH.**

SDH — синхронна цифрова ієрархія

Synchronous Digital Hierarchy (ITU-T G.707/G.708/G.709) — синхронізовані від єдиного джерела

Ключова ідея SDH

Всі елементи мережі **СИНХРОНІЗОВАНІ** від **єдиного джерела тактової частоти.** Це дозволяє **прямий Add/Drop** будь-якого компонентного потоку без повної демультиплексації.

Базовий модуль: STM-1 = 155,52 Мбіт/с

Структура кадру STM-1:

- матриця **9 рядків × 270 стовпців** (байтів)
- тривалість кадру **125 мкс** (= 8000 кадрів/с)
- Section OverHead (SOH) — RSOH + MSOH
- 261 стовпець — payload area

Аналог у США: *SONET (Synchronous Optical Network)*

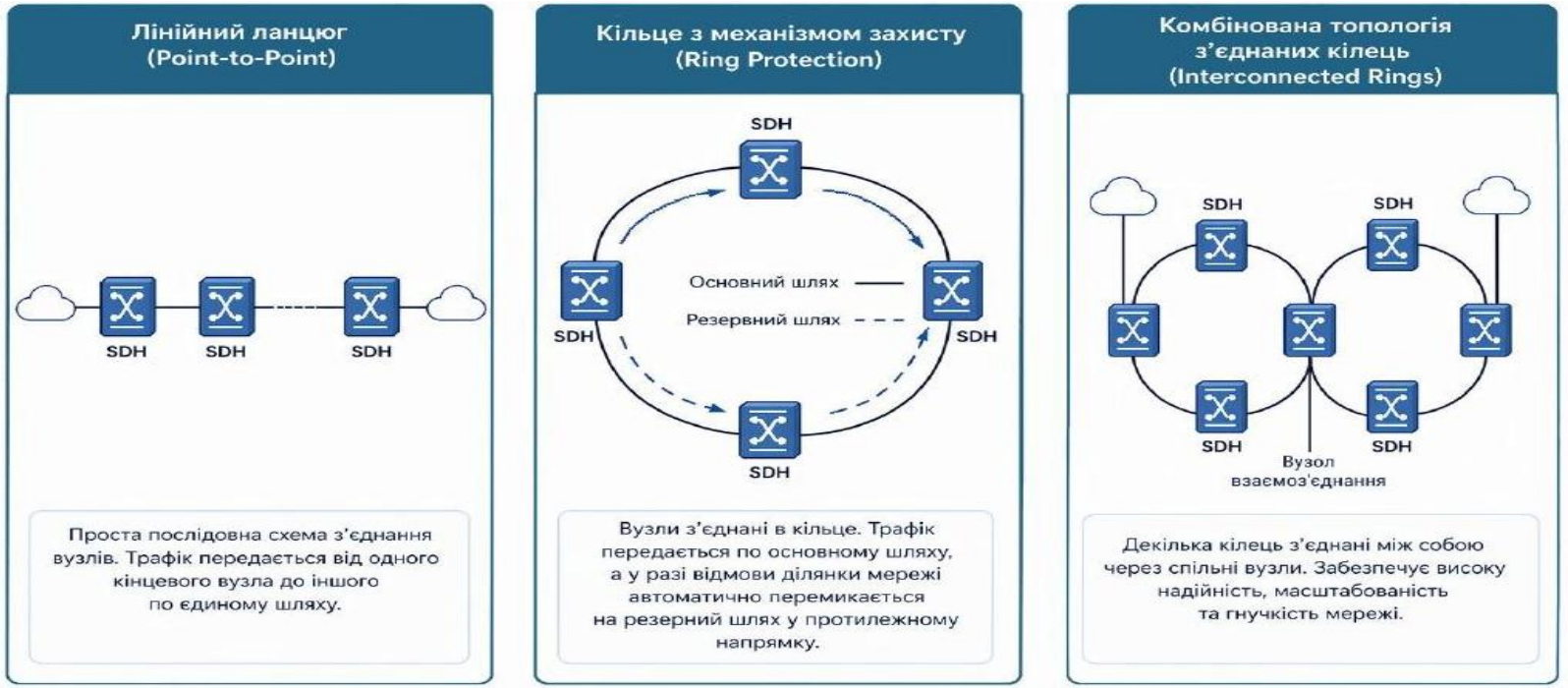
Ієрархія SDH vs SONET

Рівень SDH	Рівень SONET	Мбіт/с	Каналів E1
STM-1	OC-3 / STS-3	155,52	63
STM-4	OC-12 / STS-12	622,08	252
STM-16	OC-48 / STS-48	2 488,32	1 008
STM-64	OC-192	9 953,28	4 032
STM-256	OC-768	39 813,12	16 128

★ ***STM-64 і STM-256 практично не набули поширення — на цих швидкостях ефективніший DWDM***

Топології SDH та кільцевий захист

Point-to-Point · Кільце (Ring Protection) · Interconnected Rings



Мережеві елементи SDH

- **TM** — Terminal Multiplexer · **ADM** — Add-Drop Multiplexer
- **DXC** — Digital Cross-Connect (комутатор віртуальних контейнерів)
- **REG** — Regenerator (макс. відстань 40-120 км)

★ Захист кільця < 50 мс · ITU-T G.841

- **UPSR / USHR** — Unidirectional Path-Switched Ring з механізмом SNCP
- **MS-SPRing** — Multiplex Section Shared Protection Ring (двонаправлене)

→ *50 мс — стандарт «carrier grade», еталон для всіх WAN-технологій*

DWDM — щільне хвильове мультиплексування

Dense Wavelength Division Multiplexing — 40-80 хвиль в одному волокні · ITU-T G.694.1 · Рис. 2.3

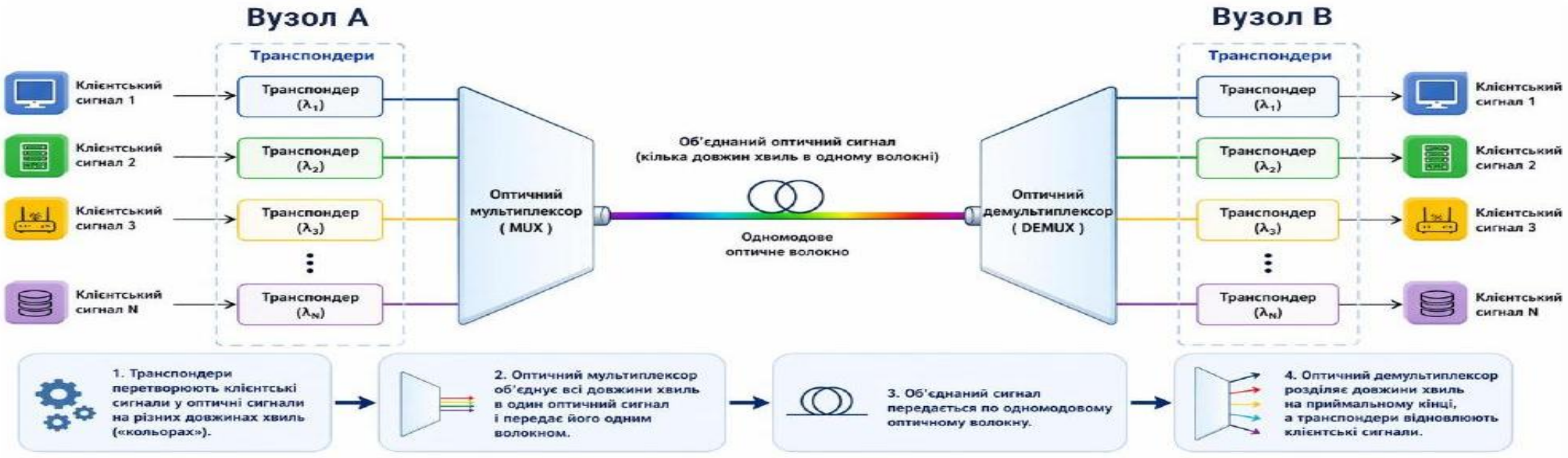


Рисунок 2.3 – Принцип роботи системи DWDM

Сітка частот G.694.1

C-band (1530-1565 нм) + L-band (1565-1625 нм); інтервали 100/50/25/12,5 ГГц

★ *до 80 каналів у C-band*

Швидкість на канал

Когерентні транспондери 100/200/400/800 Гбіт/с (DP-QPSK, DP-16QAM)

★ *десятки Тбіт/с на волокно*

Оптичне підсилення EDFA

Erbium-Doped Fiber Amplifier; підсилення БЕЗ електричної регенерації

★ *80-120 км між EDFA, 2000-3000 км без регенерації*

OTN — оптична транспортна мережа

Optical Transport Network — ITU-T G.709 — «digital wrapper» для DWDM

Що таке OTN

«Цифрова обгортка» (digital wrapper) для DWDM: додає до оптичних каналів **стандартизовані заголовки** для моніторингу, FEC та управління.

Поєднує переваги SDH (заголовки, захист, моніторинг) + DWDM (пропускна здатність, оптичне підсилення).

Ключова властивість: *Forward Error Correction (FEC) — виправлення помилок на льоту*

Ієрархія OTN (ITU-T G.709)

Рівень	Швидкість	Транспортує
OTU1	~2,7 Гбіт/с	STM-16 / 1GbE
OTU2	~10,7 Гбіт/с	STM-64 / 10GbE
OTU3	~43 Гбіт/с	STM-256 / 40GbE
OTU4	~112 Гбіт/с	100GbE

Порівняння технологій SDH vs DWDM

Параметр	SDH	DWDM
Принцип	TDM (за часом)	WDM (за довжиною хвилі)
Макс. швидкість каналу	~ 10 Гбіт/с (STM-64)	400-800 Гбіт/с на канал
Макс. ємність волокна	~ 10 Гбіт/с	десятки Тбіт/с
Підсилення	електрична регенерація	оптичне (EDFA)
Гнучкість	фіксовані швидкості	будь-який формат

Overlay vs Underlay — фундаментальна концепція

Один із найважливіших архітектурних принципів сучасних телекомунікацій

UNDERLAY

базова (фізична) мережа

Що це:

Фізична або логічна мережева інфраструктура, яка забезпечує **базову IP-зв'язність** між пристроями.

Приклади:

- Мережа DWDM/OTN у ядрі оператора
- IP/MPLS-магістраль провайдера
- Публічний Інтернет
- Локальна Ethernet-мережа у ЦОД

Робить: *маршрутизує IP-пакети між двома точками; знає про фізичну топологію*

OVERLAY

накладена (логічна) мережа

Що це:

Логічна мережа, побудована ПОВЕРХ underlay за допомогою механізмів **тунелювання та інкапсуляції.**

Приклади:

- VPN через Інтернет (GRE, IPsec)
- VXLAN у центрах обробки даних
- MPLS L3VPN поверх магістралі оператора
- SD-WAN тунелі поверх broadband

Робить: *додає логічну структуру: ізоляцію, безпеку, свою адресацію — незалежно від underlay*

Протоколи тунелювання — 5 основних

GRE · IPsec · VXLAN · NVGRE · Geneve — від найстарішого до найновішого

Параметр	GRE	IPsec	VXLAN	NVGRE	Geneve
Стандарт	RFC 2784	RFC 4301	RFC 7348	RFC 7637	RFC 8926
Рік	2000	2005	2014	2015	2020
Рівень	L3	L3	L2 over L3	L2 over L3	L2 over L3
Транспорт	IP (protocol 47)	IP (50/51)	UDP:4789	GRE	UDP:6081
Ід. мережі	Key (32 біт)	SPI (32 біт)	VNI (24 біт)	VSID (24 біт)	VNI (24 біт)
Шифрування	Ні	Так (ESP)	Ні	Ні	Ні (зовн.)
Розширюваність	обмежена	ні	ні	ні	TLV-опції
Розробник	Cisco	IETF (open)	IETF (open)	Microsoft	IETF (open)
Застосування	WAN VPN	Secure VPN	ЦОД overlay	ЦОД overlay	ЦОД overlay

→ Практичне правило вибору

- **WAN VPN без шифрування** → GRE · **з шифруванням** → IPsec · **ЦОД / хмара** → VXLAN (сьогодні) або Geneve (майбутнє)

GRE — Generic Routing Encapsulation

RFC 2784 · Cisco · найпростіший і найстаріший протокол тунелювання L3

Концепція та властивості

GRE інкапсулює **пакети будь-якого мережевого протоколу** (IPv4, IPv6, IPX, AppleTalk…) у пакети IP.

Розмір заголовка:

- Мінімум **4 байти**
- До **16 байтів** з опціями (checksum, key, sequence #)

Ключові властивості:

✓ Мультипротокольність — інкапсулює будь-що
✓ Простий у налаштуванні
✓ Підтримує маршрутизаційні протоколи через тунель
✗ **БЕЗ шифрування**
✗ **БЕЗ автентифікації**

→ **Часто комбінується з IPsec:** *«GRE over IPsec» — стандартна практика для WAN VPN*

Структура GRE-інкапсуляції

Оригінальний пакет:



↓ *GRE encapsulation*

Після інкапсуляції:

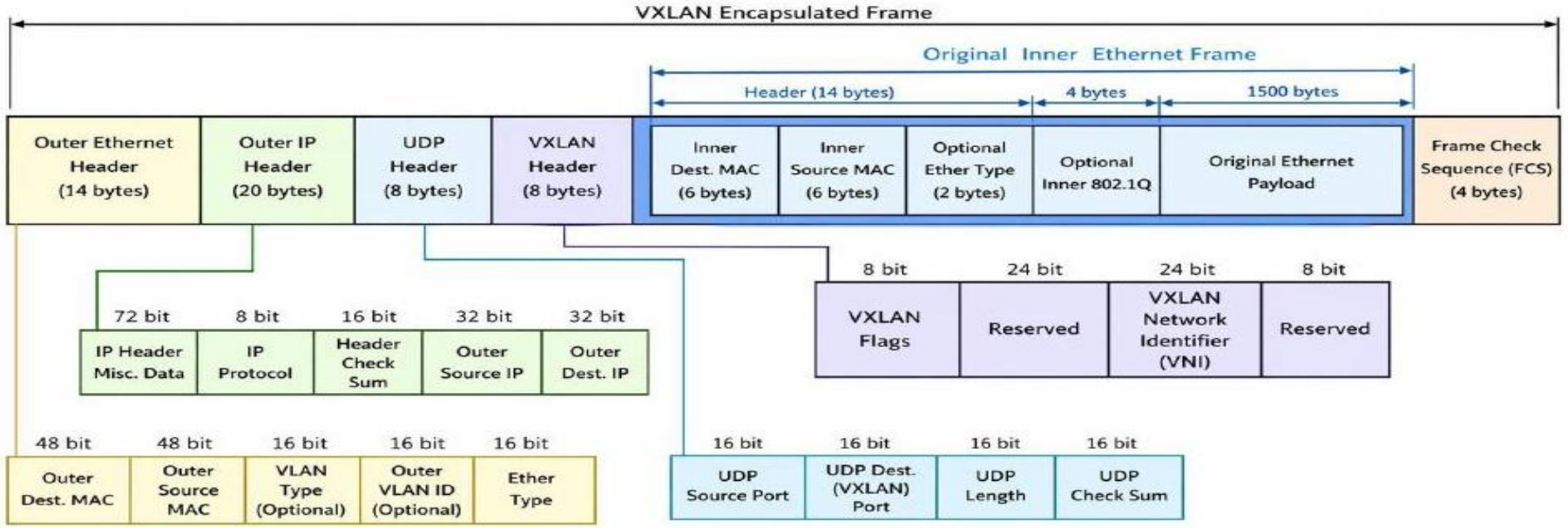


Приклад конфігурації GRE у Cisco IOS

```
R_1(config)#
  interface Tunnel 0
  ip address 10.1.1.1 255.255.255.252
  tunnel source 200.1.1.1
  tunnel destination 200.1.2.1
  tunnel mode gre ip
```

VXLAN — Virtual Extensible LAN

RFC 7348 · стандарт для віртуалізації мереж у ЦОД



L2 over L3

Інкапсулює Ethernet-кадри у UDP/IP · порт UDP 4789. Дозволяє розтягнути L2 через L3 маршрутизовану мережу.

VNI · 24-бітний ідентифікатор

VXLAN Network Identifier: до 16 млн ізольованих мереж (проти 4096 VLAN у 802.1Q). Ключове для мультитенантних хмар.

VTEP · кінцеві точки

VXLAN Tunnel Endpoint — на комутаторах верхнього рівня (ToR) або у гіпервізорах. Виконують інкапсуляцію/декапсуляцію.

Наступні покоління: NVGRE та Geneve

Альтернативи та еволюція VXLAN

NVGRE

Network Virtualization using GRE · RFC 7637 · 2015

Розробник: Microsoft (для Hyper-V)

Ідея:

Той самий принцип, що VXLAN, але замість UDP-інкапсуляції — GRE.

Ключові відмінності від VXLAN:

- Транспорт: **GRE** замість UDP:4789
- ID мережі: **VSID** (Virtual Subnet ID) — 24 біти = 16 млн
- Використовує **GRE Key** поле для VSID

Статус сьогодні:

Мало поширений. VXLAN отримав ширшу підтримку в індустрії (від Cisco, VMware, Arista, Juniper), NVGRE залишився в основному в Microsoft-екосистемі.

Geneve

Generic Network Virtualization Encapsulation · RFC 8926 · 2020

Розробник: IETF (уніфікований стандарт)

Ідея:

Об'єднати переваги VXLAN та NVGRE + додати **розширюваність.**

Ключові особливості:

- Транспорт: **UDP:6081** (як VXLAN)
- ID мережі: **VNI** — 24 біти
- **TLV-опції** (Type-Length-Value) — заголовок **змінної довжини** з підтримкою розширень

Що дають TLV-опції:

передавати додаткові метадані разом із тунельованими кадрами (наприклад, ідентифікатор клієнта, security tags, telemetry).

Статус сьогодні: Поступово стає переважним у нових розгортаннях, зокрема ***VMware NSX-T.***

NFV — віртуалізація мережевих функцій

Network Functions Virtualization — стандарт ETSI NFV ISG

Основна ідея NFV

Реалізувати мережеві функції — *маршрутизацію, комутацію, firewall, балансувальник, WAN-оптимізацію* — у вигляді **програмного забезпечення на стандартних серверах** замість спеціалізованих апаратних пристроїв.

Що дає:

✓ Гнучкість: розгорнути новий firewall — це deploy VM, не купівля пристрою

✓ Швидкість: масштабування — це клонування VM

✓ Вартість: стандартні x86-сервери замість пропрієтарного заліза

✓ Автоматизація: MANO (Management and Orchestration) керує всім життєвим циклом

→ **Використовує overlay-мережі** для з'єднання віртуальних мережевих функцій (VNF)

Архітектура NFV (ETSI NFV ISG)

NFVI — **Infrastructure**

Фізичні + віртуальні обчислювальні, мережеві, сховищні ресурси. Плюс — гіпервізор.

VNF — **Virtual Network Functions**

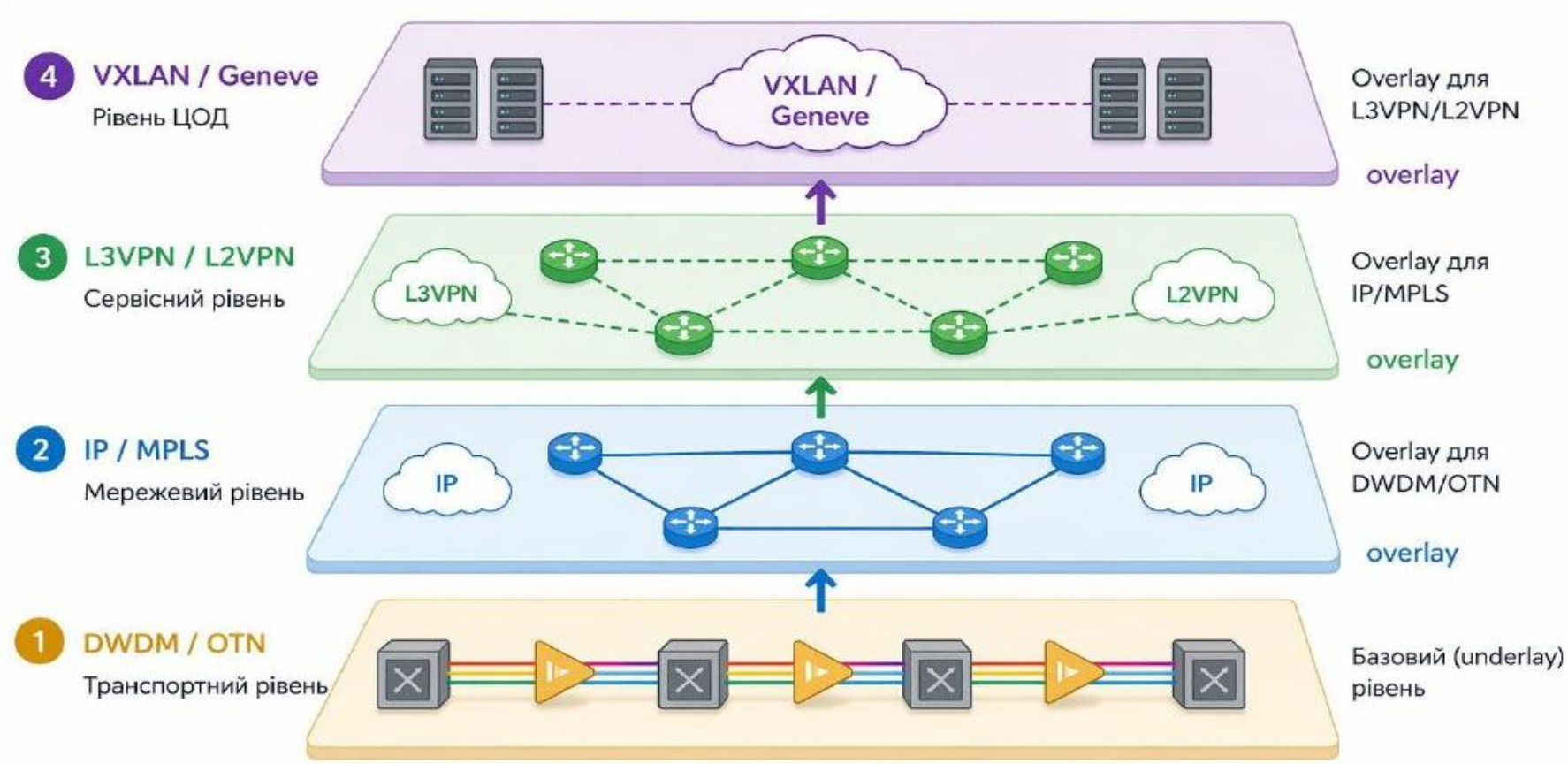
Конкретні мережеві сервіси у вигляді VM або контейнерів: віртуальний firewall, LB, роутер, WAN-optimizer.

MANO — **Management & Orchestration**

Автоматизоване розгортання, масштабування, керування VNF. Три компоненти: NFVO, VNFM, VIM.

Багаторівнева модель overlay/underlay

Реальна мережа має 4 рівні абстракції — кожен overlay для нижчого й underlay для вищого



Ключова думка: *кожен рівень (крім найнижчого) є overlay для нижчого й underlay для вищого. Це — фундамент сучасних мереж.*

Практика: як пакет проходить всі рівні

Сценарій: VM у ЦОД Києва пінгує VM у ЦОД Львова — що реально відбувається

1 Гостьова VM у ЦОД Києва

ping 10.0.2.5 → ICMP-пакет → Ethernet-кадр у vSwitch гіпервізора

2 VXLAN encapsulation у VTEP гіпервізора

Ethernet-кадр загорнуто в UDP:4789 з VNI=100200; додано зовнішній IP (source: сервер у Києві, dest: сервер у Львові)

3 MPLS L3VPN у мережі провайдера

IP-пакет входить у PE-маршрутизатор провайдера; отримує MPLS-мітки (outer LSP + inner VPN label); іде по MPLS-магістралі

4 DWDM/OTN у ядрі — оптична магістраль

MPLS-пакет інкапсулюється в OTN-кадр (наприклад, OTU4 = 100 Гбіт/с), передається на певній довжині хвилі λ через оптичне волокно

5 Розкапсуляція у зворотньому порядку

На тому боці: OTN→MPLS→IP→VXLAN декапсуляція → Ethernet-кадр приходить до VM у ЦОД Львова

Підсумок лекції

01

Первинні мережі

PDH (E1/T1) → SDH (STM-1..256, ITU-T G.707) → DWDM/OTN

02

SDH: синхронізація + ADM

STM-1 = 155,52 Мбіт/с; кільцевий захист < 50 мс (G.841)

03

DWDM: 40-80 хвиль/волокно

C-band, EDFA-підсилювачі, 100-800 Гбіт/с на канал, 2000-3000 км без регенерації

04

Overlay vs Underlay

Underlay — фізична зв'язність; Overlay — логічні тунелі, незалежні від фізики

05

5 протоколів тунелювання

GRE, IPsec, VXLAN (RFC 7348, VNI 24 біт), NVGRE, Geneve (TLV-опції)

06

NFV — віртуалізація функцій

мережеві функції як ПЗ на серверах; overlay-мережі для VNF; MANO-оркестрація



Ваші запитання

Обговорення матеріалу лекції

Дякую за увагу!