

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікаційних систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Телекомунікаційні системи та мережі»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Транспортні мережі на основі технології MPLS, принципи,
перспективи розвитку»**

Виконав:

студент ІV курсу, групи ТС-72

Маслак Михайло Олексійович _____

Керівник:

Доцент кафедри ТС, доцент

Носков Вячеслав Іванович _____

Рецензент:

Незалежний експерт з телекомунікацій, к.т.н.

Вахрушев Володимир Платонович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Маслаку Михайлу Олексійовичу

1. Тема роботи «Транспортні мережі на основі технології MPLS, принципи, перспективи розвитку», керівник роботи Носков Вячеслав Іванович, доцент, затверджені наказом по університету від «14» квітня 2021 р. № 1007-с.

2. Термін подання студентом роботи 9 червня 2021 року.

3. Вихідні дані до роботи: Інформаційні матеріали щодо транспортних мереж на основі технології MPLS. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.

4. Зміст роботи

Обґрунтувати актуальність теми. Розглянути та проаналізувати концептуальні підходи щодо побудови транспортних мереж на основі технології MPLS. Розглянути технічні принципи функціонування мереж MPLS: структура міток, стек міток та їх інкапсуляція, процедура розповсюдження міток, створення тунелів та каналів за принципом PWE. Визначити вимоги до транспортних мереж і на їх основі зазначити напрямки адаптації технології MPLS для досягнення відповідності цим вимогам. Розглянути та проаналізувати основні технічні принципи транспортних мереж MPLS TP та їх відмінності від принципів MPLS. Розглянути питання моніторингу та керування мережами MPLS TP. Визначити напрямок подальшого розвитку мереж MPLS TP на основі концепції ASON.

Розглянути транспортні мережі GMPLS: основні відмінності та принцип комутації в мережі.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (презентація, перелік слайдів): 1) Тема дипломної роботи; 2) Актуальність теми; 3) Мета, об'єкт та предмет дослідження; 4) Технічні принципи MPLS; 5) Вимоги до транспортних мереж; 6) Архітектура мережі MPLS TP; 7) Емуляція каналів в мережі MPLS TP; 8) Особливості мереж GMPLS; 9) Висновки; 10) Дякую за увагу.

6. Дата видачі завдання 15 квітня 2021 року

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1 | Транспортна мережа як складова частина телекомунікаційної системи. Функції та місце транспортної мережі в телекомунікаційній системі. Вимоги, що пред'являються до транспортних мереж | 19.04.2021 | Вик. |
| 2 | Історія виникнення транспортних мереж на основі технології MPLS. Основні поняття та ідеї технології MPLS. Елементи архітектури (структура міток, стек міток та їх інкапсуляція, процедура розповсюдження міток, маршрут комутований за мітками). Адаптація MPLS до вимог транспортних мереж. Мережі MPLS TP, принципи організації магістральних каналів в мережі, тунелі та побудова каналів за принципом PWE. Основні відмінності MPLS TP від MPLS. Моніторинг та керування мережею MPLS TP. Подальший розвиток транспортних мереж, перехід до технології GMPLS. | 23.05.2021 | Вик. |
| 3 | Обладнання транспортних мереж MPLS TP від провідних виробників. Основні можливості та технічні характеристики. | 28.05.2021 | Вик. |
| 4 | Вступ, Висновки | 04.06.2021 | Вик. |
| 5 | Чистовий варіант дипломної роботи, плакати | 08.06.2021 | Вик. |

Студент

Михайло МАСЛАК

Керівник

Вячеслав НОСКОВ

АНОТАЦІЯ

Текстова частина дипломної роботи: 79 с., 23 рис., 3 табл., 36 джерел з переліком посилань.

Мета роботи – дослідження транспортних мереж на основі технології MPLS. Аналіз напрямків адаптації технології MPLS для досягнення відповідності вимогам транспортних мереж.

У даній роботі розглядається транспортна мережа як невід’ємна частина телекомунікаційної системи, аналізуються технічні принципи функціонування мереж MPLS, проводиться огляд основних технічних принципів транспортних мереж MPLS TP та їх відмінностей від принципів MPLS, аналізується питання моніторингу і керування мережами MPLS TP та питання щодо напрямку подальшого розвитку мереж MPLS TP, зокрема, переходу до технології GMPLS.

ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА, БАГАТОПРОТОКОЛЬНА КОМУТАЦІЯ ЗА МІТКАМИ, СТЕК МІТОК, FEC, LSP, LSR, LER, MPLS, MPLS-TP, GMPLS, NGN, OAM, PWE3, SLA

ABSTRACT

The purpose of the work is to study transport networks based on MPLS technology. Analysis of directions of MPLS technology adaptation to achieve compliance with the requirements of transport networks.

This paper considers transport network as an integral part of telecommunication system, analyzes technical principles of MPLS networks operation, reviews main technical principles of MPLS TP transport networks and their differences from MPLS principles, analyzes the issue of monitoring and management of MPLS TP networks and the direction of further development of MPLS TP networks, in particular, the transition to GMPLS technology.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 13 |
| 1 ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ | 15 |
| 1.1 Функції та місце транспортної мережі в телекомунікаційній системі | 16 |
| 1.1.1 Поняття транспортної телекомунікаційної – первинної мережі зв’язку 17 | |
| 1.1.2 Сучасне трактування транспортних мереж | 19 |
| 1.1.3 Моделі транспортних мереж | 21 |
| 1.1.4 Функціональна архітектура транспортних мереж | 22 |
| 1.2 Вимоги, що пред’являються до транспортних мереж | 22 |
| 1.2.1 Транспортні мережі в умовах переходу до NGN | 23 |
| 1.2.2 Мережа операторського класу | 24 |
| 1.3 Висновки до розділу 1 | 25 |
| 2 ТРАНСПОРТНІ МЕРЕЖІ, ПОБУДОВАНІ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ MPLS . | 27 |
| 2.1 Історія виникнення MPLS | 28 |
| 2.2 Основні поняття та ідеї технології MPLS | 31 |
| 2.3 Елементи архітектури | 33 |
| 2.3.1 Структура міток..... | 33 |
| 2.3.2 Стек міток та їх інкапсуляція | 35 |
| 2.3.3 Процедура розповсюдження міток..... | 37 |
| 2.3.4 Маршрут комутований за мітками | 40 |
| 2.4 Адаптація MPLS до вимог транспортних мереж. Мережі MPLS TP | 42 |
| 2.4.1 Історія створення пакетної транспортної мережі MPLS-TP | 44 |
| 2.4.2 Огляд MPLS-TP | 45 |
| 2.5 Організація тунелів в мережі MPLS та організація в них каналів за принципом PW (Pseudo wires) | 47 |
| 2.5.1 Pseudo-Wire Emulation Edge to Edge (PWE3) | 49 |

| | |
|--|----|
| 2.6 Основні відмінності MPLS-TP від MPLS | 52 |
| 2.7 OAM-функціональність | 54 |
| 2.7.1 MPLS-TP OAM | 55 |
| 2.7.1.1 Інструменти ІТУ-Т OAM G.8113.1 | 58 |
| 2.7.1.2 Інструменти ІЕТF OAM G.8113.2..... | 59 |
| 2.8 Моніторинг та керування мережею MPLS-TP | 61 |
| 2.9 Подальший розвиток транспортних мереж, перехід до GMPLS..... | 62 |
| 2.10 Висновки до розділу 2 | 65 |
| 3 ОБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ MPLS-TP | 67 |
| 3.1 Cisco CPT – Carrier Packet Transport..... | 67 |
| 3.1.1 CPT600/200/50 | 68 |
| 3.1.2 Cisco ASR 9000v | 70 |
| 3.2 Raisecom ITN221..... | 71 |
| 3.3 ZTE ZXCTN 6000 | 72 |
| 3.4 Висновки до розділу 3 | 73 |
| ВИСНОВКИ..... | 74 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ | 76 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

| | |
|--------|--|
| AC | Attachment Circuit – пристрій підключення |
| ACh | Associated Channel – асоційований канал |
| ARIS | Aggregate Route-Based IP Switching – агрегована IP-комутація на основі маршрутів |
| ATM | Asynchronous Transfer Mode – асинхронний спосіб передачі даних |
| B-DA | Backbone Destination Address – магістральна адреса отримувача |
| BFD | Bidirectional Forwarding Detection – мережевий протокол для виявлення помилок з'єднання між двома маршрутизаторами шляхом передачі посилання з обох сторін |
| BGP | Border Gateway Protocol – протокол граничного шлюзу |
| BOF | Birds of a Feather – неформальне зібрання на конференціях |
| B-SA | Backbone Source Address – магістральна адреса відправника |
| B-VID | Backbone VLAN Identifier – магістральний ідентифікатор VLAN |
| CAPEX | Capital Expenditure – капітальні вкладення |
| CC | Continuity Check – перевірка неперервності |
| CE | Customer Edge – клієнтський край |
| CFM | Connectivity Fault Management – надає функції спостереження, пошуку та усунення несправностей в мережах Ethernet |
| CPT | Carrier Packet Transport – операторський пакетний транспорт |
| CR-LDP | Constraint-based Routing LDP – протокол LDP з урахуванням обмежуючих умов |
| CSR | Cell Switching Router – маршрутизатор з комутацією комірок |
| CV | Connectivity Verification – перевірка можливості підключення |
| DLCI | Data Link Connection Identifier – ідентифікатор з'єднання |

| | |
|--------|---|
| EANTC | European Advanced Networking Test Center – Європейський центр тестування передових мережевих технологій |
| ER-LSP | Explicitly routed LSP – LSP з явно заданим маршрутом |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute – Європейський інститут телекомунікаційних стандартів |
| FCAPS | Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security – управління несправностями, конфігурацією, обліком, продуктивністю, безпекою |
| FDM | Frequency-Division Multiplexing – частотне мультиплексування |
| FEC | Forwarding Equivalence Class – клас еквівалентності пересилання |
| FM | Fault Management – управління несправностями |
| FR | Frame Relay – ретрансляція кадрів |
| FSC | Fiber-Switch Capable – можливість комутації оптоволокна |
| G-Ach | Generic Associated Channel – загальний асоційований канал |
| GAL | G-Ach Alert Label – попереджувальна етикетка G-Ach |
| GMPLS | Generalized Multi-Protocol Label Switching – узагальнена багатопроTOCOLьна комутація за мітками |
| GRE | Generic Route Encapsulation – загальна інкапсуляція маршрутів |
| IANA | Internet Assigned Numbers Authority – адміністрація адресного простору Інтернет |
| IBM | International Business Machines Corporation – один з найбільших провайдерів глобальних інформаційних мереж |
| ICMP | Internet Control Message Protocol – міжмережевий протокол керуючих повідомлень |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки |
| IETF | Internet Engineering Task Force – Інженерна рада Інтернету |
| IP | Internet Protocol – інтернет протокол |

| | |
|---------|--|
| IPTV | Internet Protocol Television – цифрове інтерактивне телебачення в мережах передачі даних за протоколом IP |
| IPX | Internetwork Packet Exchange – міжмережвий обмін пакетами |
| IS-IS | Intermediate System to Intermediate System – протокол маршрутизації проміжних систем |
| ITU-T | International Telecommunication Union-Telecommunication sector – Міжнародний союз електрозв'язку-Телекомунікаційний сектор |
| IWF | Internetworking Function – функції мережевої взаємодії |
| LDP | Labels Distribution Protocol – протокол розподілу міток |
| LER | Label Edge Router – пограничні пристрої LSR в технології MPLS |
| LLC | Logical Link Control – управління логічним з'єднанням |
| LMP | Link-Management Protocol – протокол управління з'єднанням |
| LSC | Lambda Switch Capable – комутація по довжині хвилі |
| LSP | Label Switched Path – комутований по мітках тракт |
| LSR | Label Switching Router – маршрутизатор комутації по мітках |
| MAC | Media Access Control – керування доступом до середовища |
| MEG | Maintenance Entity Group – група об'єктів обслуговування |
| MEP | Maintenance End Point – кінцева точка обслуговування |
| MEP ID | Maintenance End Point-Identifier – ідентифікатор кінцевої точки обслуговування |
| MIP | Maintenance Intermediate Point – проміжні точки управління |
| MPLS | Multi-Protocol Label Switching – багатопроTOCOLьна комутації за мітками |
| MPLS-TE | MPLS-Traffic Engineering |
| MPLS-TP | MPLS-Transport Profile |
| NE | Network Elements – мережеві елементи |
| NG SDH | Next-Generation SDH |
| NGN | Next Generation Network – мережа наступного покоління |

| | |
|--------|--|
| NMS | Network Management System – система управління мережею |
| NOC | Network Operation Centre – центр експлуатації мережі |
| NSP | Network Service Provider – провайдер мережевих послуг |
| OAM | Operations, Administration and Maintenance – операції, адміністрування і підтримка |
| OpEx | Operating Expenses – операційні витрати |
| OSI | Open System Interconnection – взаємодія відкритих систем |
| OSPF | Open Shortest Path First – протокол динамічної маршрутизації |
| OTN | Optical Transport Network – оптична транспортна мережа |
| OXC | Optical Cross-Connect – оптичне крос-з'єднання |
| PBB-TE | Provider Backbone Bridge-Traffic Engineering – магістральні мости провайдера з можливістю оптимізації та управління трафіком |
| PBT | Provider Backbone Transport – операторський транспорт в опорній мережі |
| PDH | Plesiochronous Digital Hierarchy – плезіохронна цифрова ієрархія |
| PDU | Protocol Data Unit – блок даних протоколу |
| PE | Provider Edge – провайдерський край |
| PM | Perfomance Management – управління ефективністю |
| PPP | Point-to-Point Protocol – протокол точка-точка |
| PSC | Packet-Switch Capable – можливість пакетної комутації |
| PSN | Packet-switched networks – мережі з комутацією пакетів |
| PW | Pseudo Wire – псевдопровід |
| PWE3 | Pseudo-Wire Emulation Edge to Edge – наскрізна псевдопроводова емуляція трафіку |
| QoE | Quality of Experience – якість користувацького досвіду |
| QoS | Quality of Service – якість обслуговування |
| RFC | Request for Comments – запит коментарів |

| | |
|---------|---|
| RSVP | Resource ReSerVation Protocol – протокол резервування мережевих ресурсів |
| RSVP-TE | RSVP-Traffic Engineering |
| RTT | Real Time Traffic – трафік реального часу |
| SDH | Synchronous Digital Hierarchy – синхронна цифрова ієрархія |
| SDM | Space Division Multiplexing – просторове мультиплексування |
| SFP | Small Form-factor Pluggable – промисловий стандарт модульних компактних приймачів (трансиверів) |
| SLA | Service-level Agreement – угода про рівень послуг |
| SNA | Systems Network Architecture – системна мережева архітектура |
| SONET | Synchronous Optical Networking – синхронні оптичні мережі |
| STP | Spanning Tree Protocol – протокол кістякового дерева |
| TCP | Transmission Control Protocol – протокол управління передачею |
| TDM | Time Division Multiplexing – часове мультиплексування |
| TMN | Telecommunication Management Network – мережа управління телекомунікаціями |
| T-MPLS | Transport MPLS |
| UDP | User Datagram Protocol – протокол дейтаграм користувача |
| VCCV | Virtual Circuit Connectivity Verification – перевірка можливості підключення віртуальних ланцюгів |
| VLAN | Virtual Local Area Network – віртуальна локальна комп'ютерна мережа |
| VoIP | Voice over IP – голос через IP |
| VPI/VCI | Virtual Path Identifier/Virtual Circuit Identifier |
| VPN | Virtual Private Network – віртуальна приватна мережа |
| АРП | Асинхронний режим передачі |
| БСП | Багатоканальні системи передачі |
| ГІС | Глобальне інформаційне суспільство |
| ТТС | Телекомунікаційні транспортні системи |

ВСТУП

Мережі наступного покоління будуть передавати трафік переважно в пакетному форматі. У зв'язку з цим відбувається еволюція існуючих транспортних мереж, заснованих на мультиплексуванні із часовим поділом (TDM), та визначаються нові архітектури, оптимізовані для передачі пакетів. Функція транспортної мережі полягає в прозорому транспортуванні усіх видів телекомунікаційного трафіку від користувача однієї мережі до користувача іншої мережі, а також у транспортуванні трафіку інформаційних послуг. Традиційні транспортні мережі на базі технології SDH надають канали із постійною швидкістю і рядом швидкостей PDH ієрархії, які не відповідають прийнятому ряду в системах пакетної передачі, наприклад, Ethernet. Такі канали не пристосовані до передачі пакетного трафіку, який має вибуховий характер, тому ефективність їх використання буде дуже низькою. Модернізація мереж SDH до наступного покоління (NG SDH) підвищила ефективність використання каналів за рахунок віртуальної конкатенації віртуальних контейнерів із можливістю керування перепускною здатністю створеного за рахунок конкатенації каналу. Однак, у мережі NG SDH майже не має механізмів забезпечення потрібної якості обслуговування (QoS) пакетного трафіку, що відображає різні види сервісів. На сьогодні найбільш придатними для передачі пакетного трафіку є технології, що базуються на стеку протоколів TCP/IP. Це, насамперед, технологія MPLS, яка забезпечує швидку комутацію пакетів, управління трафіком та забезпечує потрібну диференційовану якість обслуговування. Технологія MPLS найбільш підходить до використання у транспортних мережах. Однак, внаслідок надлишковості для транспортних мереж функцій та неповній відповідності експлуатаційним правилам, що вже склалися, технологія MPLS потребувала адаптації до вимог транспортних мереж. Роботою по адаптації MPLS займається об'єднана група фахівців MCE-T та IETF. У результаті з'явилася технологія MPLS TP (Transport Profile). Технологія MPLS TP активно впроваджується у транспортних мережах багатьох операторів зв'язку і

забезпечує емуляцію каналів для будь-якого сервісу в будь-якому форматі представлення. Тому знання цієї технології є дуже актуальними як у теперішній час, так і у найближчому майбутньому.

1 ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

У першому десятилітті ХХІ ст. в повсякденну життєдіяльність людства розпочалося стрімке проникнення технологій інформатизації. Світове товариство вступило в нову еру свого розвитку, названу глобальним інформаційним суспільством (ГІС). Відмінною рисою ГІС є насамперед те, що в ньому знання та інформація набувають ролі зовнішніх виробничих факторів, стають матеріальною основою існування суспільства.

По суті наразі людство переживає третю революцію. Якщо в першій – сільськогосподарській – центральною дійовою особою був землевласник і головним ресурсом – земля, в другій – індустріальній – власник капіталу та головним ресурсом капітал, то в третій – інформаційній – пануючою соціальною групою стає власник інформації, а головним ресурсом – знання, інформація [1].

Нині відбувається формування цілих галузей, які спеціалізуються на використанні високих технологій, до яких в першу чергу відноситься виробництво «інформаційних продуктів» (у тому числі програмних) та ефективний їх розподіл у середовищі інфокомунікацій.

Телекомунікаційні мережі все більше відповідають терміну «глобальні» і вже майже не залишилося комп'ютерів (а також інших «розумних пристроїв»: смартфонів, ноутбуків, комунікаторів, навігаторів та ін.), які не є елементами глобальної телекомунікаційної мережі.

Традиційні послуги зв'язку на сучасному етапі розвитку інфокомунікацій перестають бути локомотивом розвитку галузі та складають відсоткову меншість за прибутковістю і популярністю серед абонентів. Послуги фіксованого доступу замінюються мобільними, а передача голосу – передачею відеоконтенту. Стрімко зростають швидкості доступу й обсяги переданої інформації, як і вимоги до якості переданої інформації. Виникає велика кількість послуг, реалізація яких відбувається у реальному часі і вимагає від операторів нових архітектурних рішень [2].

Для окремих користувачів та їх пристроїв важливе листування електронною поштою, інші – є файловими серверами, треті – беруть участь в аудіо- та відео конференціях, четверті – завантажують карти місцевості із великою роздільною здатністю, п'яті – отримують FULL HD відео-контент. Це вказує на величезну неоднорідність інформації, яка передається, по об'ємах, призначенню, терміновості, часу, завадостійкості, вимогам до безпеки передачі та ін [3].

Зсув оператора в сторону відомої «бітової» труби змушує оператора переосмислити свою роль, коригувати стратегію і планувати розвиток відповідно до ринкових потреб.

Сучасні рішення в області транспортних технологій мають на меті задоволення потреби операторів фіксованого та стільникового зв'язку в інтеграції своїх різноманітних мереж (для передачі голосу, відео, трафіку сигналізації і даних) в єдину магістраль. Отже, оператор повинен вирішити проблему зниження витрат на побудову та експлуатацію цих магістралей, а також підготуватися до розгортання складних інфокомунікаційних мереж та мереж наступного покоління.

Найважливіші механізми, які використовуються при побудові транспортних мереж, орієнтовані на інтелектуальне управління потоками трафіку, забезпечення вимог SLA і QoS та подальший розвиток, а також на інтелектуальне управління всіма ресурсами транспортних мереж.

Динамічне підключення центрів обробки даних і високопродуктивних локальних мереж по всьому світу до транспортних мереж постійно підвищує вимоги до надійності та автоматизації процесу підключення [2].

1.1 Функції та місце транспортної мережі в телекомунікаційній системі

На сьогоднішній день транспортні мережі є основою для усіх телекомунікаційних систем, що реалізують функції транспортування чи комутації даних як на невеликі, так і на міжконтинентальні відстані.

Телекомунікаційні системи, в свою чергу, пройшли ряд технічних революційних перетворень. До їх числа можна віднести сьогоденну

трансформацію традиційних мереж загального користування з комутацією каналів у конвергентні мережі наступного покоління, а саме мережі NGN (Next Generation Network).

Мережі наступного покоління розвиваються на підґрунті технологій пакетного передавання інформації і вони є конвергентними мережами. Зазначені мережі орієнтовані на надання користувачам великої кількості взаємодоповнюючих, з урахуванням необхідної якості, послуг [4].

1.1.1 Поняття транспортної телекомунікаційної – первинної мережі зв'язку

Мережі електрозв'язку призначені доставляти інформацію в пункти, які територіально рознесені в межах району, міста, області, республіки, країни, континенту. По мережах інформація передається відповідно сигналами електрозв'язку. Пункти передавання і приймання інформації, які з'єднуються лініями зв'язку, називають вузлами мереж. Можна побачити, що схема магістральних (міжміських) ліній електрозв'язку України (рис. 1.1) в загальному схожа до інших транспортних схем – шосейних чи залізничних.

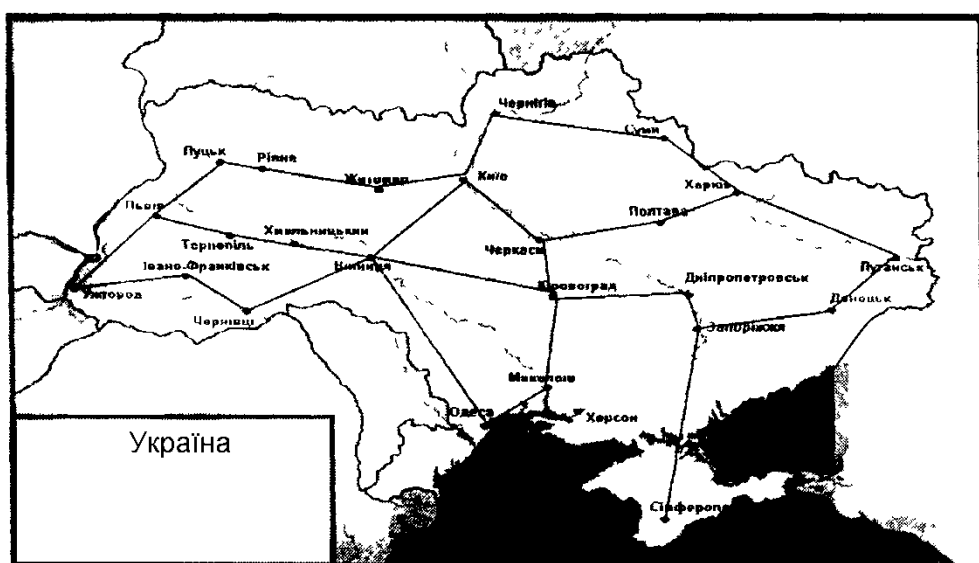


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення міжміської транспортної мережі

Поняття «транспортна мережа», в основу якого покладено функціональний принцип, відповідає звичному прийнятому терміну первинна мережа – сукупність фізичних мереж (середовищ передавання), типових каналів, трактів і ліній передавання, що з'єднують між собою вузли та кінцеві пристрої, або ж, інакше кажучи, сукупність технічних та програмних засобів зв'язку, які забезпечують передавання та розподіл інформації [5].

Головна функція первинної мережі зв'язку полягає у передачі – транспортуванні інформації між пунктами. Наприклад, це може бути інформація телефонних абонентів, користувачів Internet, програми телебачення (TV), сигнали взаємодії між комутаційними станціями (КС), інформація урахування вартості послуг – тарифікації, виділені сигнали синхронізації та ін.

При переході до функціональних положень опису і класифікації мереж та багатоканальних систем передачі (БСП), прийнятим ІТУ-Т, для мереж такого виду ввели термін «телекомунікаційні транспортні» по зазначеним вище прикладам із перевезеннями вантажів іншими транспортними мережами. У найзагальнішому вигляді таку ТТС можна представити моделлю у вигляді набору входів та виходів (рис. 1.2), подібно до розкладу руху поїздів, автобусів, літаків і кораблів, де входи – це пункти відправлення, а виходи – пункти прийому.

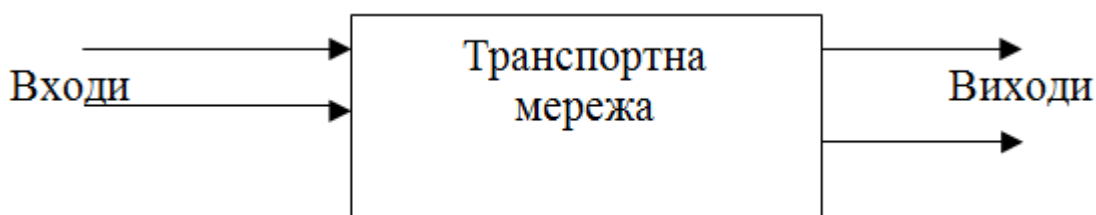


Рисунок 1.2 – Узагальнена модель транспортної мережі

Інформація, яка представлена в сигналах електров'язку на входах ТТС, в залежності від допустимого рівня зниження якості, більш-менш достовірно (або із заданою вірогідністю) відтворюється на відповідних виходах. Основний принцип цифрової транспортної (первинної) мережі можна сформулювати як «закон біт-точності», а саме: вид, кількість і послідовність цифрових сигналів на виході

мають точно відповідати їхньому виду, кількості та послідовності на вході. Інакше кажучи: який біт отримали, такий і передали [5].

1.1.2 Сучасне трактування транспортних мереж

Сьогодні поняття «транспортна мережа» дещо відрізняється від звичного поняття «первинна мережа» і є набагато ширшим. Транспортна мережа є розвитком первинної мережі при переході від комутації каналів до комутації пакетів відповідно.

Якщо у первинній мережі головна функція зводилася до утворення стандартного аналогового або цифрового каналу між двома точками мережі, то транспортна мережа формує канал передачі даних між двома точками підключення користувачів NGN.

Не зважаючи на схожість принципів роботи транспортної мережі і первинної мережі, NGN привносить свою специфіку: замість типового каналу первинної мережі використовується канал передачі даних, який може бути встановлений на основі технології «віртуального каналу», які можуть бути симетричними та асиметричними.

Як відомо, фундамент мультисервісної мережі становить універсальна транспортна мережа, яка реалізує функції транспортного рівня й рівня управління комутацією, маршрутизацією й передачею інформації. Транспортний рівень мультисервісної мережі будується із використанням сучасних технологій IP, ATM, MPLS, які забезпечують гарантовану якість передачі інформації.

Топологія транспортного рівня мультисервісної мережі визначається: 1) топологією первинної мережі; 2) прогнозованими обсягами трафіку по різних напрямках; 3) функціональним призначенням вузлів мережі.

До складу транспортної мережі можуть входити:

- транзитні вузли, які виконують функції комутації та переносу;

- кінцеві (граничні) вузли, що забезпечують доступ абонентів до мережі;
- контролери сигналізації, що виконують функції обробки інформації сигналізації, управління викликами та з'єднаннями;
- шлюзи, що дають змогу здійснювати підключення до традиційних мереж зв'язку (телекомунікаційних мереж, мереж передачі даних) [3].

З позицій класичної семирівневої моделі OSI (Open System Interconnection) транспортна мережа працює переважно на двох нижніх рівнях:

- фізичний – передача біт групових даних по середовищу передачі (направляючій системі);
- канальний – мультиплексування, кодування, узгодження із направляючою системою.

У сучасних транспортних мережах, які в якості транспортної технології використовують Ethernet, та мають розгалужену конфігурацію із багатьма вузлами комутації, з'єднаними майже по принципу кожен з кожним, використовується частково і рівень 3 (мережевий). У транспортних мережах його прийнято називати рівнем 2,5.

Функції транспортної мережі поділяються на дві групи:

- основні (транспортні) – прозора передача цифрових даних із одного пункту в інший (МСЕ-Т G.803, G.805, G.806);
- допоміжні, які забезпечують функціонування безпосередньо транспортної мережі – системи управління, синхронізації, енергозабезпечення, діагностики, резервування.

Прикладами транспортних функцій можуть служити:

- організація лінійного тракту і його адаптація із відповідним передавальним середовищем;
- мультиплексування – для досягнення необхідної пропускної здатності;
- перемикання, включаючи супровід з'єднань, конфігурацію та реконфігурацію мережі.

1.1.3 Моделі транспортних мереж

Принципи побудови транспортних мереж визначені сектором телекомунікацій Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ-Т) у серії рекомендацій:

- G.803 – транспортна мережа SDH;
- G.805 – загальна функціональна архітектура транспортних мереж;
- I.326 – функціональна архітектура транспортної мережі на основі АТМ;
- G.872 – оптична транспортна мережа OTN.

У цих рекомендаціях запропоновано розглядати транспортні мережі у вигляді багаторівневих моделей (рис. 1.3).

| SDH | | АТМ | | Оптична мережа | | |
|-----------------|---|------------------------|---|-----------------------|------------------------------------|------------|
| Рівень каналів | Цифрові канали E1, E3, E4 | Рівні АТМ | Віртуальні канали | Рівень каналів | | |
| Рівні трактів | Тракти віртуальних контейнерів VC-12 | | Віртуальні тракти | Рівні трактів | Інші електричні тракти | Тракти SDH |
| | Тракти віртуальних контейнерів VC-3, VC-4 | Цифрова секція (тракт) | Оптичні транспортні системи | | | |
| Фізичний рівень | Секції мультиплексування та регенерації | Фізичний рівень | Секції мультиплексування та регенерації | Рівні оптичної мережі | Секції оптичного мультиплексування | |
| | Фізичне середовище | | Фізичне середовище | | Оптична ретрансляція | |
| | | | Оптоволоконна лінія | | | |

Рисунок 1.3 – Моделі транспортних мереж

Кожен рівень зазвичай представлений окремою службою електрозв'язку, що надає послуги іншій службі, розташованій вище. У структурах моделей визначені функціональні рівні: фізичний, трактів і каналів [1].

1.1.4 Функціональна архітектура транспортних мереж

Узагальнена функціональна архітектура транспортних мереж (ITU-T G.805) має ієрархічну структуру і передбачає декомпозицію мережі на деяку кількість рівнів, кожний з яких виконує одну або кілька функцій, пов'язаних зі спільним завданням транспортування клієнтського трафіку (рис. 1.4).

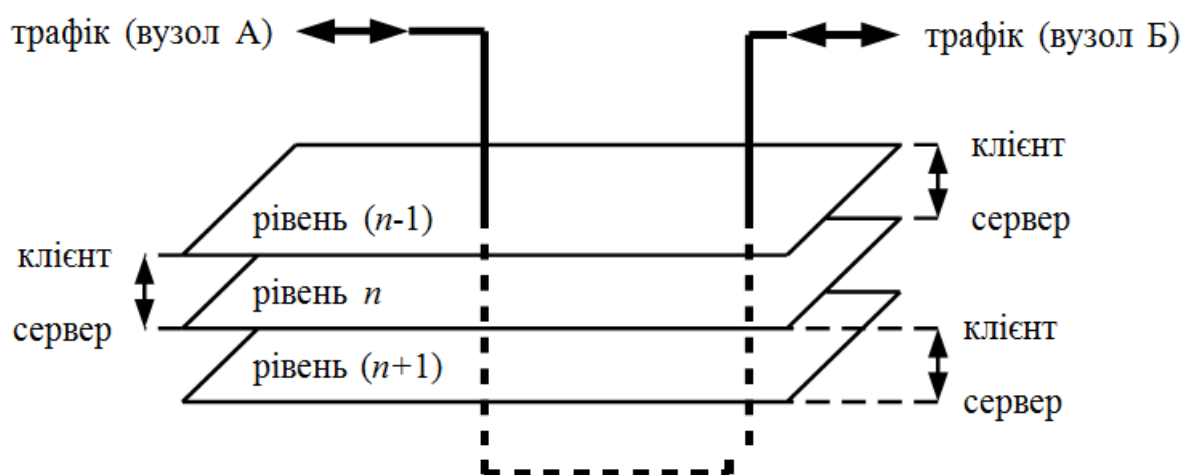


Рисунок 1.4 – Багаторівнева модель транспортної мережі

Модель транспортної мережі будується у вигляді стеку шляхом нашаровування мережних транспортних рівнів. Кожен такий рівень забезпечує транспорт для верхнього стосовно нього рівня і називається «сервером». Вищий рівень, який забезпечується транспортом, називається «клієнтом». Обидва зазначених рівні зв'язані між собою відношенням «клієнт-сервер» [7].

1.2 Вимоги, що пред'являються до транспортних мереж

Перехід до технологій нового покоління 4G/5G обумовлює зростаючі вимоги сучасних користувачів Інтернету, пов'язані зі збільшенням смуги пропускання (ШСД), безпекою, стабільністю зв'язку, якістю обслуговування (Quality of Service, QoS) і віртуальними приватними мережами (Virtual Private Network, VPN).

Провідні провайдери NSP (Network Service Provider) прагнуть організувати свій сервіс так, щоб на базі однієї опорної мережі можна було б надавати комплекс різних послуг, таких, наприклад, як ШСД, IP–телефонія, інтерактивні ігри, потокове відео (IPTV), електронна торгівля, вебінари, відео-конференції, електронна медицина та ін [8].

1.2.1 Транспортні мережі в умовах переходу до NGN

У даний час у сфері телекомунікацій відбуваються фундаментальні зміни, в основі яких лежить поділ транспортних функцій та функцій надання послуг.

Пакетні технології із асинхронним режимом передачі АРП (IP, Ethernet, MPLS) сьогодні значно «потіснили» традиційні мережі із синхронним режимом передачі СРП (ПЦД, СЦД) не тільки на ділянці доступу і міських мережах, а й на магістральних напрямках.

Сучасні пакетні мережі орієнтуються на передачу усіх видів трафіку (мовлення, дані та відео – «Triple Play»). Це дозволяє операторам розширити спектр послуг, що надаються.

Відбуваються радикальні зміни структури ринку, інвестиційної та технічної політики операторів, а також пріоритетів діяльності органів стандартизації (МСЕ-Т, ETSI, IEEE, IETF та ін.)

Новий статус накладає на пакетні транспортні технології додаткові вимоги, оскільки, вийшовши на магістральний рівень, ці технології повинні забезпечити якість передачі на рівні мереж попереднього покоління.

Сукупність цих вимог формує популярне сьогодні поняття «рівня мереж операторського класу». Цьому рівню повинна відповідати будь-яка транспортна технологія, що претендує на лідируючі позиції в телекомунікаційних мережах.

Основна тенденція стандартизації МСЕ: доведення перспективних технологій пакетної передачі (Ethernet і MPLS) до рівня мереж «операторського класу» [9].

1.2.2 Мережа операторського класу

Під операторським класом розуміється система, апаратний або програмний компонент, який є надзвичайно надійним, добре протестованим та перевіреним у своїх можливостях. Варто зазначити, що не існує офіційного позначення або галузевого стандарту для того, щоб регулювати продукт або послугу під рівень «операторського класу». Однак серед лідерів технологічного простору існує загальна думка про те, який поріг повинна подолати технологія, щоб заслужити це звання.

Існує п'ять основних атрибутів операторського класу:

- висока доступність/зручність обслуговування;
- якість обслуговування (Quality of Service, QoS)/якість користувацького досвіду (Quality of Experience, QoE);
- продуктивність та ефективність;
- масштабованість;
- безпека.

Найбільш важливою характеристикою послуги операторського класу є надійність «п'ять дев'яток» або навіть «шість дев'яток». Це означає, що максимальний час незапланованого простою мережі може становити всього кілька хвилин на рік. Це також поєднується із відмовостійким дизайном та швидким резервуванням (менше 50 мілісекунд для реагування на збої). При належному резервування деякі мережі можуть із повною впевненістю стверджувати, що їх час безвідмовної роботи складає 100%. Якщо один компонент виходить з ладу, відбувається стихійне лихо або атака, мережа повинна бути досить міцною, щоб протистояти цьому. У разі відмови, вузли та інші компоненти повинні автоматично перезапускатися, відновлюватися і переналаштовуватися у режимі самовідновлення.

Другою особливістю мереж операторського класу є якість обслуговування. Технологія передачі голосу і відео повинна мати якомога менше затримок та/або

якомога більше резервування для запобігання джиттера або інших артефактів, які в кращому випадку відволікають, а в гіршому – роблять спілкування неможливим. Термін «якість обслуговування» також використовується для позначення алгоритмів, що забезпечують пріоритет пакетів VoIP над пакетами, що не відносяться до трафіку реального часу (RTT), тому іноді замість нього використовується термін «якість користувацького досвіду» [10].

Але що дійсно відрізняє «операторський клас» від «споживчого класу» під час обговорення продуктів та мереж, так це продуктивність. Очікується, що технології операторського класу працюватимуть на значно вищому рівні, ніж ті, які широко доступні на споживчих ринках. Для корпоративних мереж це означає використання провідного в галузі обладнання і поєднання цих інструментів із новітніми та кращими мережевими стратегіями (тобто прямим підключенням до Інтернету), які дозволяють мережевим інфраструктурам масштабуватися без перебоїв та простоїв у роботі мережі [11].

Мережі операторського класу повинні бути масштабованими. Це може відноситися до окремого компоненту, який іноді, але не завжди, працює на найвищому рівні; це може відноситися до певного місця, де розміщується обладнання для балансування навантаження; або це може відноситися до додавання цілих серверних ферм на іншому кінці країни або світу для розширення можливостей бізнесу, а також для додавання надмірності.

Останнім компонентом інфраструктури операторського класу є безпека. Як і у випадку із надійністю мережі, дані та послуги повинні бути захищені від DoS-атак, зломів, крадіжок та вірусів.

1.3 Висновки до розділу 1

У даному розділі було розглянуто поняття транспортної мережі як складової телекомунікаційної системи. Проведено аналіз функцій та місця транспортної мережі в телекомунікаційній системі. Також було здійснено детальний аналіз вимог, що пред'являються до транспортних мереж.

У наш час транспортні мережі є фундаментом для усіх телекомунікаційних систем, які можуть виконувати функції передачі або комутації даних як на невеликі, так і на міжконтинентальні відстані.

Функції транспортної мережі в загальному класифікуються на: основні (або їх ще називають – транспортні – які передбачають прозору передачу цифрових даних з одного пункту в інший) та допоміжні (які забезпечують функціонування безпосередньо транспортної мережі).

На сьогоднішій день досить популярним є поняття «рівень мереж операторського класу». Безпосередньо під «операторським класом» мається на увазі система, програмний чи апаратний компонент, який є добре протестованим та перевіреном у власних можливостях. Найважливішою характеристикою послуги операторського класу є надійність «п'ять дев'яток» або навіть «шість дев'яток». При даному показнику, максимальний час незапланованого простою мережі в основному становить кілька хвилин на рік.

2 ТРАНСПОРТНІ МЕРЕЖІ, ПОБУДОВАНІ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ MPLS

Бурхливий розвиток Інтернету, що супроводжується зростанням попиту на все більш різноманітні і надійні послуги, змушує Інтернет-провайдерів постійно модернізувати свої мережі. У середині 90-х років у якості основи такої модернізації ряд компаній вибрали модель IP-over-ATM, яка дозволила їм підвищити продуктивність мереж та здійснювати моделювання трафіку [12]. Більш того, економічно вигідним виявилось мультиплексування трафіку Інтернет разом з іншими типами трафіку, що передаються по ATM-магістралях.

Сучасний вигляд всесвітньої мережі зв'язку формується під впливом деяких факторів. Одним з них є загальний економічний спад початку 2000-их років, зокрема, позбавлення від нереальних комерційних планів у галузі. Другий фактор протоколу-обранця – широко розрекламована конвергенція цифрових мереж зв'язку (телефонія, відео, передача даних) і вихід на сцену протоколу IP в якості протоколу-обранця. Та, нарешті, глобалізація та дерегулювання (скорочення обсягу втручання держави в економіку) з'єдналися на рівні ігрового поля та підсилили конкурентний тиск.

Економічний спад та надлишкова пропускна здатність базових мереж змусили провайдерів послуг та операторів зв'язку серйозно проаналізувати окупність затрат на мережеві ресурси. Оскільки фактична пропускна здатність стала, по суті, товаром, увага галузі зосередилась на наданні додаткових послуг, які необхідні користувачу. У результаті прийняття нових технологій можливості провайдера об'єднати непорівнянні існуючі мережі стають ключовими в прибутковому розгортанні всіх служб: старих та нових.

Корпоративний ринок показав такий же відгук на спад – збільшення ефективності за рахунок застосування нових технологій, які роблять такі поліпшення можливими.

Тому технологія MPLS дуже приваблива для провайдерів зв'язку. З її допомогою можна обробляти безліч служб, як традиційних, так і нових у межах

однієї мережі. Вона дозволяє надавати великий об'єм додатків і послуг через мережу провайдера послуг, таким чином, скорочуючи вимоги до обладнання, що розташовується на території користувача. Інтеграція та об'єднання – лозунг сучасного корпоративного середовища.

Очевидно, що перехід до MPLS йде повним ходом. Кожен великий оператор зв'язку в розвинених країнах світу розгорнув або планує розгорнути магістральні мережі MPLS. Традиційні служби, такі як ретрансляція кадрів та АТМ, можуть транспортуватися по мережі MPLS, така конвергенція мереж часто залишається прозорою для підприємства кінцевого користувача. Рух вперед до новітніх недорогих служб, таких як Ethernet, додатково сприяє просуванню.

Крім мереж великих операторів, MPLS знаходить також свій шлях у великих корпоративних мережах організацій, таких як підприємства роздрібною торгівлі, інвестиційні компанії, урядові органи та збройні сили, організації охорони здоров'я, промислові підприємства [13].

2.1 Історія виникнення MPLS

З середини 90-х років деякі Інтернет-провайдери почали модернізувати свої мережі, переходячи від побудови ядра на основі маршрутизаторів до багатошарової моделі із передачею IP-трафіку через мережу АТМ. Причиною такого переходу стало вибухове зростання обсягу послуг та пов'язані з ним потреби в більшій смузді пропускання, передбачуваних показниках продуктивності та інжинірингу трафіку. Архітектура IP-over-АТМ змогла вирішити ці завдання в першу чергу завдяки тому, що спиралася на застосований в мережах АТМ алгоритм комутації із використанням міток.

Модель IP-over-АТМ базувалася на функціональних можливостях АТМ. На магістралі мережі застосовувалися високошвидкісні АТМ-комутатори, а область застосування IP-маршрутизації обмежувалася периферією мережі. Останнє було пов'язане із тим, що в даній моделі традиційні програмні маршрутизатори розглядалися як основна перешкода на шляху збільшення продуктивності мереж.

Однак у міру подальшого зростання мереж і появи апаратури, розробленої спеціально для магістралей Інтернет, подальший розвиток у рамках моделі IP-over-ATM перестав бути єдино можливим. Подолавши свого часу обмеження традиційної маршрутизації, вона досягла наступного рубежу і тут зіткнулася вже зі своїми власними межами масштабованості.

На тлі триваючої міграції Інтернет-провайдерів до моделі IP-over-ATM почав проявлятися цілий ряд тенденцій, що впливають на розвиток нових технологій для ядра Інтернет. Широкі кола суспільства стали усвідомлювати виняткову роль Інтернету в справі побудови основ нової глобальної економіки. Зникли останні сумніви в тому, що ринок обладнання для Інтернету досить великий, щоб виправдати розробку апаратури спеціально для магістральних з'єднань. Протокол IP швидко зайняв панівні позиції, відтіснивши в сторону IPX, AppleTalk, OSI і SNA.

Усвідомлення факту неминучості «IP-конвергенції» відкрило ринкову нішу для інвестицій в нові технології і стимулювало молодих розробників вступити в суперництво із пануючими виробниками мережевої апаратури. Щоб досягти успіху, їм потрібно було запропонувати рішення, що поєднує продуктивність ATM-комутаторів із керуючими функціями IP-маршрутизаторів та виключити необхідність складного узгодження двох типів мереж, що мається на увазі в моделі IP-over-ATM.

До кінця 90-х років відразу кілька виробників запропонували рішення для багаторівневої комутації. Це, зокрема, IP Switching (Ipsilon/Nokia), Tag Switching (Cisco Systems), Aggregate Route-Based IP Switching – ARIS (IBM), IP Navigator (Cascade/Ascend/Lucent Technologies), Cell Switching Router – CSR (Toshiba) [13]. Етапи еволюції технологій до технології MPLS зображені на рис. 2.1.

Хоча між різними розробками в області багаторівневої комутації було багато спільного, в них використовувалися два принципово різних підходи до призначення та розподілу міток при встановленні LSP-маршрутів:

- модель «від даних»;

- модель «від управління».

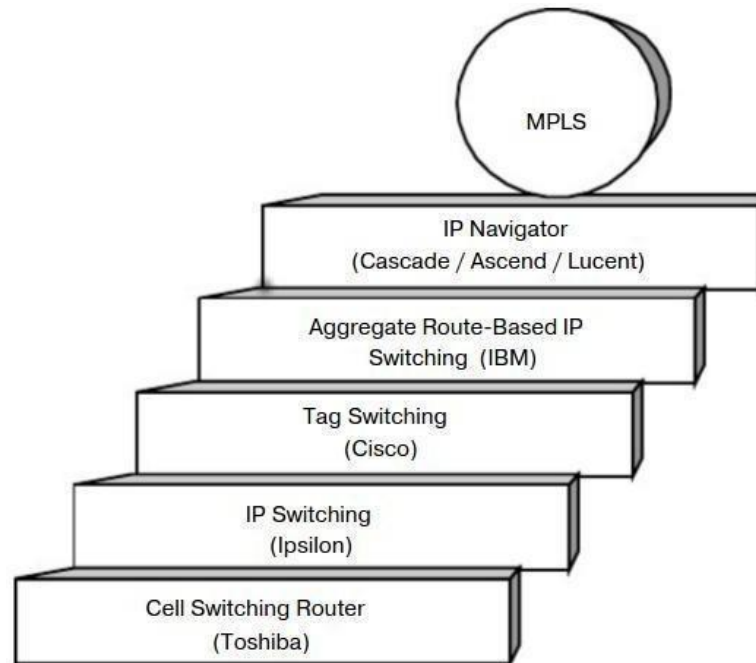


Рисунок 2.1 – Етапи еволюції технологій до технології MPLS

У моделі «від даних», реалізованої, наприклад, у технологіях IP Switching (Ipsilon) та CSR (Toshiba), призначення міток відбувається при надходженні пакетів даних від користувача. Модель використовує поняття потоку – послідовності пакетів, що мають однакові IP-адреси і номери портів джерела та одержувача. Багаторівневий комутатор може призначити мітку або відразу ж при отриманні першого пакету потоку, або дочекавшись отримання заданого порогового числа пакетів.

При використанні моделі «від даних» обсяг службового трафіку, необхідного для обміну мітками, прямо пропорційний кількості потоків трафіку, наявність більшого числа відносно короткоживучих потоків може створювати високе навантаження на мережу. Загалом, ця модель не володіє достатнім ступенем масштабованості для застосування в ядрі Інтернет, де одночасно присутня величезна кількість окремих потоків. Тому розробники технології MPLS і не взяли її на озброєння, а зробили ставку на іншу модель призначення міток [14].

У моделі «від управління» призначення та розподіл міток відбувається при надходженні відповідної керуючої інформації. Зокрема, мітки створюються при обробці повідомлень протоколів маршрутизації, протоколів управління (таких, як RSVP) або в результаті статичної конфігурації. Серед схем, які працюють за таким принципом, слід згадати Tag Switching (Cisco Systems), IP Navigator (Ascend/Lucent) і ARIS (IBM). Ця ж концепція лягла в основу стандарту MPLS.

Після публікації першої серії проектів стандартів Tag Switching 9-13 грудня 1996 року в Сан-Дієго, Каліфорнії, відбувалася рекордна за всю історію IETF по відвідуваності сесія BOF, на якій Cisco Systems, IBM і Toshiba провели презентації своїх технологій.

У квітні 1997 року в Мемфісі, Теннісі, відбулося перше засідання робочої групи MPLS WG. Сама назва Multiprotocol Label Switching була прийнята, в першу чергу, з тієї причини, що назви IP Switching та Tag Switching асоціювалися з продуктами, котрі випускаються конкретними компаніями, і був потрібний нейтральний термін [15].

2.2 Основні поняття та ідеї технології MPLS

MPLS можна розглядати як множину технологій, котрі, працюючи спільно, забезпечують доставку пакетів від відправника до одержувача в контрольований, ефективний і передбачуваний спосіб. У MPLS для пересилання пакетів використовуються комутовані по мітках тракти LSP, які були організовані за допомогою протоколів маршрутизації та сигналізації рівня 3 відповідно.

Наведемо базові поняття в мережах MPLS:

- FEC (Forwarding Equivalence Class) – клас еквівалентності пересилання – група IP-пакетів, що просуваються в одній і тій же манері (наприклад, по тому самому маршруту, із тим самим обслуговуванням);
- Label – мітка – короткий, фізично безперервний ідентифікатор фіксованої довжини, призначений для ідентифікації FEC-класу;

- Label swapping – заміна міток – парадигма, що спрощує просування даних за допомогою міток, які ідентифікують класи пакетів даних, коли вони при просуванні не відрізняються;

- LER (Label Edge Router) – прикордонний вузол мережі MPLS, який з'єднує домен MPLS із вузлом, що знаходиться поза цим доменом;

- Loop detection – виявлення закільцьованих маршрутів – метод, який дозволяє виявити, що пакет пройшов через вузол більше одного разу;

- Loop prevention – попередження створення закільцьованих маршрутів – метод виявлення та усунення закільцьованих маршрутів;

- LSP (Label Switched Path) – комутований по мітках тракт – шлях, що проходить через один або декілька LSR-маршрутизаторів на одному ієрархічному рівні, по якому впливають пакети конкретного FEC-класу;

- ER-LSP – (explicitly routed LSP) – LSP з явно заданим маршрутом – тракт LSP, який організований у спосіб, відмінний від традиційної маршрутизації пакетів;

- LSR – (Label Switching Router) – маршрутизатор комутації по мітках – маршрутизатор, здатний пересилати пакети за технологією MPLS;

- MPLS domain – домен MPLS – сукупність вузлів MPLS, між якими існують безперервні LSP;

- MPLS egress node – вихідний вузол мережі MPLS – останній MPLS-вузол у LSP, що направляє вихідний пакет до адресату, який знаходиться поза MPLS-мережею;

- MPLS ingress node – вхідний вузол мережі MPLS – перший MPLS-вузол у LSP, що приймає вихідний пакет і поміщає в нього мітку MPLS.

Базова ідея MPLS полягає у заміні маршрутизації пакетів по IP-адресам і метрикам комутацією пакетів по мітках. Кожен IP-пакет забезпечується міткою, яка несе в собі інформацію про наступний вузол мережі. Дана мітка додається попереду заголовку IP-пакету. У маршрутизаторі MPLS мітка асоціюється із портом на який необхідно комутувати пакет. Маршрутизатори обмінюються

таблицями міток за допомогою протоколу LDP (Labels Distribution Protocol). Це необхідно для того, щоб кожен маршрутизатор знав перелік вхідних міток на кожному із портів.

2.3 Елементи архітектури

У мережах MPLS пакетам даних присвоюються так звані «мітки» (Label). Вони використовуються у якості своєрідної адреси вузла, якому призначений конкретний пакет даних. При цьому зміст самого пакета не має значення, і дані передаються відповідно до мітки.

Основна перевага міток полягає в тому, що вони комутуються швидше, ніж маршрутизуються пакети в стандартних IP-мережах.

Слід зазначити, що прототипи сучасних міток MPLS використовувалися і в більш ранніх технологіях, таких, наприклад, як FR (Frame Relay) та ATM (Asynchronous Transfer Mode). У технології FR використовуються мітки зі змінним розміром, а в ATM мітки мають фіксований обсяг. Однак сама мітка трансформується в процесі передачі. Аналогічний механізм задіяний в MPLS, де мітка змінюється після кожного транзитного шлюзу [8].

2.3.1 Структура міток

Мітка являє собою короткий ідентифікатор фіксованої довжини, що використовується на локальній ділянці мережі. Мітка призначена для визначення класу еквівалентного обслуговування пакета при його пересиланні по мережі. На сьогоднішній день стандартом визначено формат 32-бітної мітки, що розташовується між заголовками канального і мережевого рівня [16]. На рис. 2.2 показаний класичний формат мітки MPLS, визначений регламентом RFC.

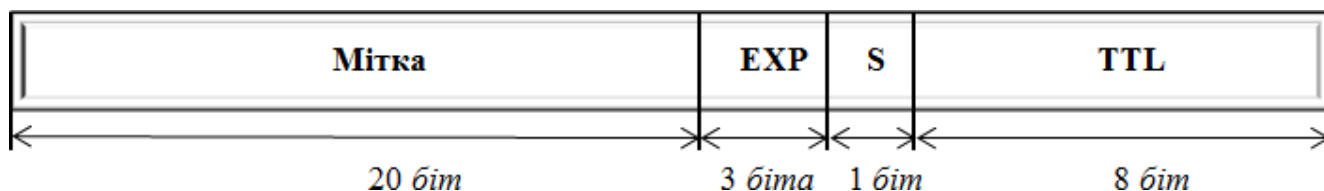


Рисунок 2.2 – Класичний формат мітки MPLS, визначений регламентом RFC

Чотири поля мітки займають загальний обсяг 32 біти. Перше поле – «Мітка» (Label Value), розміром 20 біт, визначає шлях комутації по мітках.

Друге поле – «Experimental» (EXP), яке займає 3 біти, спочатку було зарезервоване для розвитку технології. Також це поле можна використовувати для вказівки класу трафіку, необхідного для забезпечення рівня QoS.

Третє поле – «Set field» (S), розміром 1 біт, визначає ієрархію стеку міток MPLS. У заголовку останньої мітки біт $S = 1$, а у всіх інших біт $S = 0$.

Останнє поле – «Time to Live» (TTL), що займає 8 біт, використовується для визначення кількості діючих транзитних маршрутизаторів. Інформація цього поля дозволяє вибракувати із пакету закільцьовані або пошкоджені посилки [8].

Мітка повинна бути унікальною лише в межах з'єднання між кожною парою логічно сусідніх LSR. Тому одне і те ж її значення може використовуватися LSR для зв'язку із різними сусідніми маршрутизаторами, якщо тільки є можливість визначити, від якого з них прийшов пакет з даної міткою. Іншими словами, у з'єднаннях «точка-точка» допускається застосовувати один набір міток на інтерфейс, а для середовищ із множинним доступом необхідний один набір міток на модуль або весь пристрій. У реальних умовах загроза вичерпання простору міток дуже мало ймовірна.

Мітка може бути поміщена в пакет різними способами – вписуватися між заголовками рівня 2 і рівня 3 або поміщатися у вільне та доступне поле заголовка одного із цих рівнів.

2.3.2 Стек міток та їх інкапсуляція

Для забезпечення структурування потоків архітектура MPLS може створювати в пакеті не одну мітку, а цілий стек. Кожна мітка стеку має свою зону дії. Специфікація кодування стеку міток MPLS визначена документом RFC 3032 «MPLS Label Stack Encoding», який був опублікований в 2001 році.

На рис. 2.3 показано, як виглядає дворівневий стек MPLS-міток.

При цьому розрізняють верхні і нижні мітки:

- нижня мітка буде оброблятися самою останньою по шляху проходження пакету;
- верхня мітка обробляється найпершою по шляху проходження пакету.

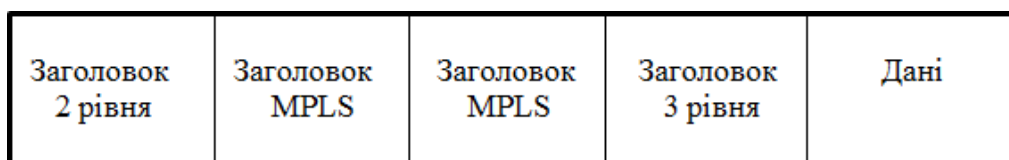


Рисунок 2.3 – Дворівневий стек міток MPLS

Стек міток розміщується між заголовками мережевого і канального рівнів (відповідно L2 та L3). Операції додавання чи вилучення мітки визначені як операції на стеці (push/pop). Ці операції можуть використовуватися для злиття і розгалуження інформаційних потоків. Стек складається із довільного числа елементів, кожен з яких має довжину 32 біти. Результат комутації задає лише верхня мітка стеку, а нижні ж передаються прозоро до операції вилучення верхньої. Такий підхід дозволяє створювати ієрархію потоків у мережі MPLS та організувати тунельні передачі.

У тих випадках, коли MPLS забезпечує пересилання IP-пакетів мережевого рівня і коли технологія рівня ланки даних не підтримує власне поле міток, MPLS-заголовок повинен інкапсулюватися між заголовками рівня ланки даних та мережевого рівня [12]. Механізм інкапсуляції переносить один або більше протоколів верхніх рівнів всередині корисного навантаження дейтаграми

інкапсульованого протоколу. Прийнята модель інкапсуляції проілюстрована на рис. 2.4.

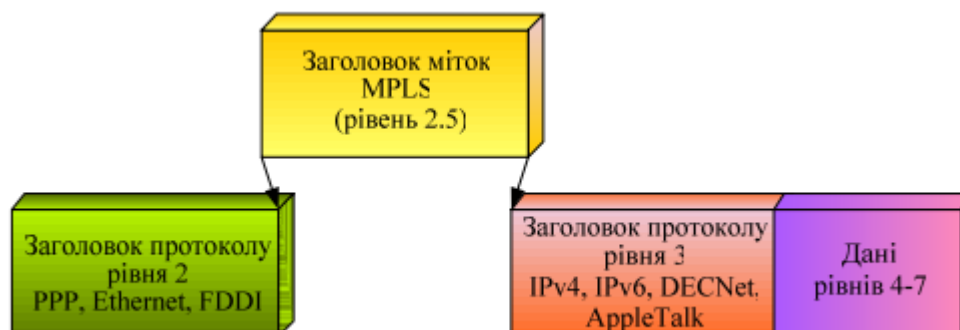


Рисунок 2.4 – Інкапсуляція MPLS міток

Записи стеку міток розташовуються після заголовку рівня передачі даних (канального рівня), але до заголовків мережевого рівня. У кадрі протоколу передачі даних (рис. 2.5, а), наприклад протоколу PPP (Point-to-Point Protocol – протокол точка-точка), стек міток розташовується між IP-заголовком та заголовком рівня передачі даних.

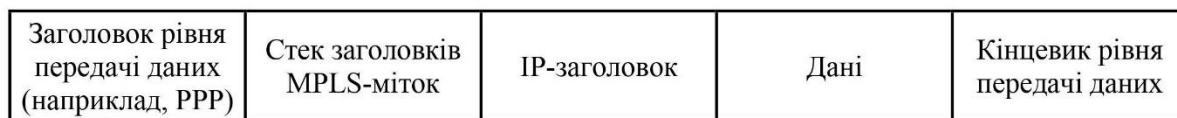
У кадрі мережі стандарту IEEE 802 (рис. 2.5, б) стек міток розташовується між IP-заголовком та заголовком рівня LLC (Logical Link Control – управління логічним з'єднанням).

Якщо архітектура MPLS використовується поверх орієнтованої на з'єднання мережевої служби, то можливе застосування іншого підходу, який ілюструються рис. 2.5, (в, г).

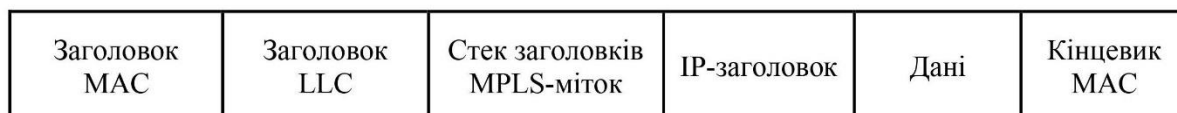
У комірках ATM верхня мітка поміщається в поле VPI/VCI у заголовку комірки ATM. Верхня мітка залишається на вершині стеку, що вставляється між заголовком комірки та IP-заголовком. Поміщення значення мітки в заголовок ATM-комірки спрощує роботу ATM-комутатора, якому, як і раніше досить переглянути тільки заголовок комірки.

Подібним чином значення самої верхньої мітки може бути вміщено в поле DLCI або в заголовку кадру FR (рис. 2.5, г). Але необхідно звернути увагу на те, що в обох випадках поле TTL залишається невидимим для комутатора і

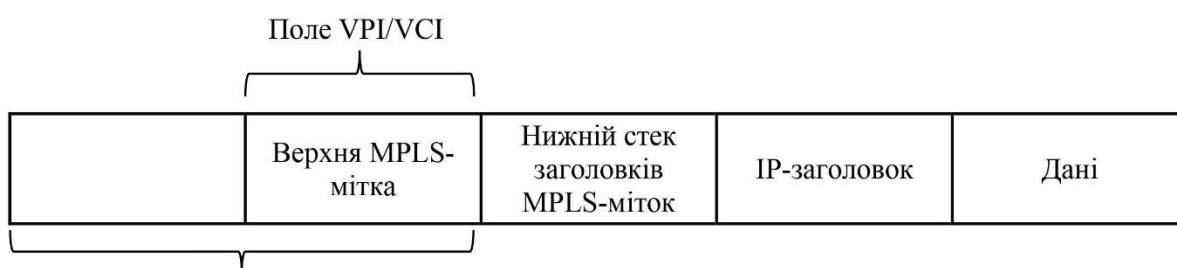
зменшується на одиницю в міру проходження через транзитні вузли до точки призначення [16].



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.5 – а) Стек заголовків міток MPLS в протоколі PPP; б) стек заголовків міток в кадрі мережі стандарту 802.x; в) стек заголовків міток MPLS в поле VPI/VCI; г) стек заголовків міток MPLS в поле DLCI

2.3.3 Процедура розповсюдження міток

Архітектура MPLS [RFC3031] дозволяє LSR поширювати інформацію про зв'язування міток із класом FEC у відповідь на явний запит з боку іншого LSR.

Цей процес називається низхідним поширенням міток за запитом. Можна також поширювати інформацію про зв'язування міток маршрутизаторів LSR, які її явно не запитували. У [RFC3031] такий метод називається незапрошеним низхідним поширенням.

Обидва методи розповсюдження міток можуть одночасно використовуватися в одній мережі. Однак для будь-якої конкретної сесії LDP кожен LSR повинен знати використовуваний партнером метод розповсюдження міток, щоб уникнути ситуацій, коли один партнер використовує Downstream Unsolicited, припускаючи, що інший робить так само.

Поведінка на початковому етапі організації LSP визначається вибором незалежного або узгодженого режиму управління LSP. LSR може підтримувати обидва типи управління.

При незалежному управлінні LSP кожен LSR може анонсувати відображення міток своїм сусідам у будь-який бажаний момент. Наприклад, при роботі в режимі Downstream-on-Demand із незалежним управлінням LSR може негайно відповісти на запит про відображення міток без очікування такого відображення від наступного інтервалу маршрутизації (next hop). При незалежному управлінні в режимі Downstream Unsolicited маршрутизатор LSR може анонсувати відображення міток для FEC своїм сусідам, як тільки він буде готовий до комутації по мітках для даного FEC. У результаті використання незалежного режиму висхідні мітки можуть бути анонсовані раніше прийому низхідних.

При узгодженому управлінні LSP маршрутизатор LSR може ініціювати передачу відображення міток тільки тих класів FEC, для яких він має відображення на клас FEC для наступного інтервалу або для яких даних LSR є вихідним. Для кожного класу FEC, по відношенню до якого LSR не є вихідним та немає відображення для наступного інтервалу, LSR повинен дочекатися прийому мітки від низхідного LSR перш, ніж відобразити FEC і передавати відповідні мітки висхідним LSR. Маршрутизатор LSR може бути вихідним для деяких FEC і не бути таким для інших класів.

Архітектура MPLS [RFC3031] вводить поняття режиму утримання міток. Утриманням називають підтримку LSR прив'язок міток для FEC, отриманих від сусіда, який не є наступним інтервалом для даного FEC.

У режимі анонсування Downstream Unsolicited анонси відображення міток для всіх маршрутів можуть бути отримані від усіх партнерських LSR. При використанні консервативного утримання міток, анонсовані прив'язки міток утримуються тільки в тих випадках, коли вони будуть застосовуватися для пересилання пакетів. При роботі в режимі Downstream-on-Demand маршрутизатор LSR буде запитувати відображення міток тільки у маршрутизаторів LSR наступного інтервалу у відповідності із його таблицею маршрутизації. Оскільки режим Downstream-on-Demand використовується перш за все для збереження міток, з цим режимом зазвичай застосовується консервативне утримання міток.

Основна перевага консервативного режиму утримання полягає в тому, що виділяються і підтримуються лише мітки, реально необхідні для пересилання даних. Недоліком консервативного режиму є те, що при зміні наступного інтервалу для даного одержувача потрібно спочатку отримати нову мітку від наступного інтервалу і тільки потім буде можлива пересилка помічених пакетів.

При ліберальному утриманні кожне відображення міток, отримане від партнерського LSR, зберігається (утримується), незалежно від того, чи є цей LSR наступним інтервалом для анонсованого відображення. У режимі анонсування Downstream-on-Demand з ліберальним утриманням міток LSR може запитувати відображення міток для всіх відомих префіксів від всіх партнерських LSR. Відзначимо, що режим Downstream-on-Demand зазвичай використовується пристроями LSR типу комутаторів ATM, для яких рекомендується застосовувати консервативне утримання.

Основною перевагою ліберального утримання міток є можливість більш швидкої зміни маршрутів, оскільки мітки для них вже є. Основним недоліком є підтримка та поширення непотрібних міток.

Кожен інтерфейс LSR налаштовується для роботи в режимі анонсування Downstream Unsolicited або Downstream-on-Demand. Маршрутизатори LSR

обмінюються інформацією про режими анонсування в процесі ініціалізації. Основною відмінністю між низхідним анонсуванням за запитами і без запитів є те, який з LSR бере на себе відповідальність за ініціювання запиту та анонсування відображень [17].

2.3.4 Маршрут комутований за мітками

Трафік одного FEC перетинає домен MPLS по LSP. Для визначення топології та поточного стану домену потрібен протокол маршрутизації, що дозволяє кожному FEC призначати конкретний LSP. Протокол маршрутизації повинен бути здатним збирати і використовувати інформацію для підтримки вимог до якості обслуговування даного FEC. Окремі маршрутизатори повинні знати про LSP даного FEC, повинні призначати LSP для вхідної мітки. А також повинні обмінюватися цією міткою із усіма іншими маршрутизаторами, які можуть послати їм пакети даного FEC.

Таким чином, шлях слідування пакету в мережі MPLS визначається тим FEC, який встановлений для цього потоку в усіх LER. Такий шлях отримав назву шляху комутації по мітках (Label Switched Path, LSP) та ідентифікується послідовністю LSR, розташованих на шляху прямування пакету від одержувача до відправника. Мітки в LSP призначаються за допомогою протоколів розподілу міток (LDP, RSVP). LSP можна класифікувати наступним чином:

- між двома граничними LER домену MPLS проходить один маршрут;
- один вихідний LER, кілька вхідних маршрутизаторів. Призначений одному FEC трафік може надходити від різних джерел через різні вхідні LER. Прикладом такої ситуації є корпоративна Інтернет-мережа, розташована в одному регіоні, але з доступом до домену MPLS по засобам декількох вхідних LER. У такій ситуації через домен MPLS проходить кілька маршрутів, можливо, із загальними кінцевими ретрансляційними ділянками;

- кілька вихідних маршрутизаторів для трафіку цільової розсилки. У рекомендації RFC 3031 стверджується, що найчастіше пакету присвоюється FEC на основі (частково або повністю) адреси одержувача мережевого рівня. У іншому випадку для FEC будуть потрібні маршрути до декількох різних вихідних маршрутизаторів. Однак, швидше за все, існує кілька мереж, у які трафік може бути доставлений через один вихідний LSR;

- у рекомендації RFC 3031 групова розсилка згадується як предмет подальших досліджень.

LSP організовується або перед передачею даних, або при виявленні певного потоку даних.

Технологія MPLS підтримує два варіанти створення LSP:

- послідовна маршрутизація по транзитним ділянкам маршруту (hop-by-hop routing). Кожен LSR самостійно вибирає наступну ділянку маршруту для даного FEC. Пакет, що належить одному FEC, проходить шлях від вхідного до вихідного LER через безліч транзитних LSR, утворюючи віртуальний тракт або шлях комутації по мітках, і ідентифікується послідовністю міток у LSR. Схожий метод застосовується в даний час у IP-мережах. LSR використовує протоколи маршрутизації OSPF, IS-IS;

- явна маршрутизація – подібна до методу маршрутизації з боку відправника. Вхідний LSR (тобто LSR, з якого потік даних надходить у мережу MPLS) вказує ланцюг вузлів, через які проходить ER-LSP. Такий тракт може виявитися не оптимальним. Для забезпечення заданої якості обслуговування трафіку даних уздовж тракту можуть резервуватися ресурси. Такий підхід полегшує оптимальний розподіл трафіку уздовж мережі і дозволяє надати диференційоване обслуговування потокам трафіку різних класів, сформованих на основі прийнятих правил та методів управління мережею.

Встановлене з'єднання є симлексним. Для організації полудуплексного з'єднання повинні бути встановлені два LSP. LSP завжди починається на границі

мережі і закінчується на протилежному кінці, проходячи через кілька транзитних маршрутизаторів.

Розглянемо MPLS-мережу, яка складається з декількох граничних і транзитних маршрутизаторів (рис. 2.6).

На вихідний вузол LER6 надходять потоки пакетів від декількох вхідних вузлів LER1, LER5 і LER2. У транзитних маршрутизаторах деякі з цих потоків можуть об'єднуватися в один загальний потік пакетів. Такому потоку присвоюється загальний FEC.

Таким чином, множина трактів LSP, що йдуть до одного вихідного вузла LER6, утворює розгалужене дерево, корінь якого знаходиться у вихідному вузлі. Кожен із семи пограничних вузлів виконує функції вхідного та вихідного вузла. Таким чином, на рис. 2.6 у мережі MPLS існує сім дерев такого роду, які разом містять $7 \times (7-1) = 42$ LSP. Через один транзитний маршрутизатор може проходити кілька LSP, що належать різним деревам [16].

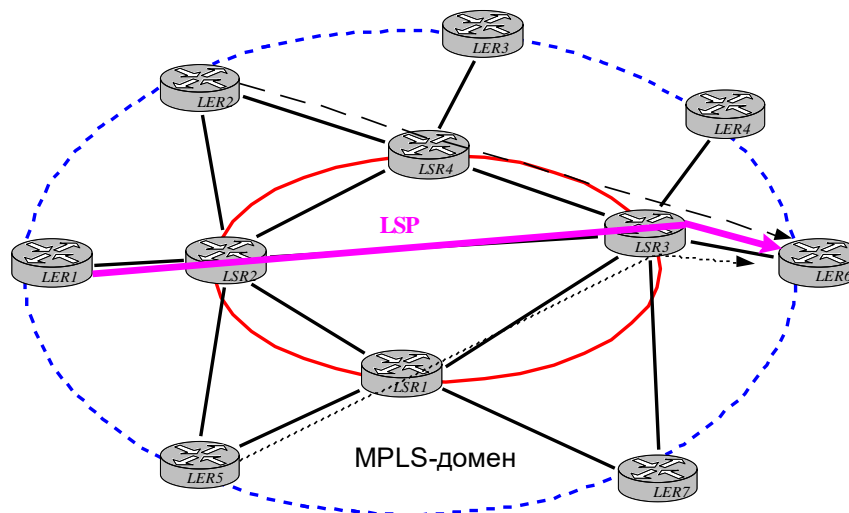


Рисунок 2.6 – Приклад домену MPLS-мережі

2.4 Адаптація MPLS до вимог транспортних мереж. Мережі MPLS TP

Вже йшла мова, що основу мультисервісної мережі становить універсальна транспортна мережа, що реалізовує функції транспортного рівня й рівня

управління комутацією, маршрутизацією й передачею інформації. Транспортний рівень мультисервісних мереж будується із використанням сучасних технологій, зокрема MPLS, які забезпечують гарантовану якість передачі інформації.

MPLS розроблялася як варіант побудови високошвидкісних IP- магістралей, проте область її застосування не обмежується протоколом IP, а поширюється на трафік будь-якого маршрутизованого мережного протоколу.

Традиційно головними вимогами, запропонованими до технології магістральної мережі, були висока пропускна спроможність, мале значення затримки й гарна масштабованість. Тепер постачальникам послуг недостатньо просто надавати доступ до своєї IP-мережі. Потреби, які змінили користувачі, містять у собі і доступ до інтегрованих сервісів мережі, і організацію віртуальних приватних мереж (VPN), і ряд інших інтелектуальних послуг. Для розв'язання виникаючих завдань і розроблялася архітектура MPLS, яка забезпечує побудову магістральних мереж, що мають практично необмежені можливості масштабування, підвищену швидкість обробки трафіку та безпрецедентну гнучкість з погляду організації додаткових сервісів. Крім того, технологія MPLS дозволяє інтегрувати мережі IP і ATM, за рахунок чого постачальники послуг зможуть не тільки зберегти засоби, інвестовані в устаткування асинхронної передачі, але й отримати прибутки зі спільного використання цих протоколів [3].

Завдання транспортної мережі – забезпечити надійну інфраструктуру агрегації і транспортування для будь-якого типу клієнтського трафіку. З ростом пакетних послуг оператори трансформують свої мережеві інфраструктури, прагнучи скоротити капітальні та експлуатаційні витрати. У цьому контексті з'являється нова технологія: транспортний профіль багатопроTOCOLЬНОЇ комутації за мітками під назвою MPLS-TP. Він повинен стати основою для пакетної транспортної мережі наступного покоління.

Основна ідея полягає в розширенні MPLS, де це необхідно, засобами експлуатації, адміністрування і обслуговування (OAM), які широко застосовуються в існуючих технологіях транспортних мереж, таких як SONET/SDH або OTN [18].

2.4.1 Історія створення пакетної транспортної мережі MPLS-TP

У 2006 році компанія Nortel Networks запропонувала технологію PBT (Provider Backbone Transport), яка для стандартизації була передана в комітет IEEE 802.1, де її перейменували в PBB-TE (Provider Backbone Bridge Traffic Engineering). Робоча група IEEE 802.1Qay стандартизувала технологію в 2009 році. Технологія ґрунтується на відомих принципах VLAN, за допомогою якої в Ethernet мережі створюються віртуальні канали для передачі трафіку різних сервісів. Повністю підтримується OAM функціональність. За рахунок встановлених системою управління віртуальних каналів (транків) з параметрами B-SA, B-DA, B-VID без петель, виключається необхідність використання STP. Також відсутня комутація пакетів за MAC таблицями, так як організуються статичні таблиці комутації. Захист трафіку забезпечується за рахунок створення резервних транків з автоматичним перемиканням трафіку за повідомленнями системи OAM. Однак, з огляду на те, що вже широко застосовувалися MPLS мережі у провайдерів, ця технологія не могла повністю претендувати як основна для побудови транспортних мереж.

Приблизно в той же час MCE зайнявся доопрацюванням вже досить прогресивної технології MPLS для використання її у транспортних мережах. Була запропонована концепція T-MPLS (Transport MPLS). Вона передбачала виключення з MPLS нехарактерних для транспортної мережі функцій, які ускладнюють її роботу: об'єднання LSP, передача трафіку паралельно по кількох LSP однакової «вартості», організація односпрямованих LSP. Однак, T-MPLS виявилася несумісною з уже розгорнутими у провайдерів MPLS мережами. Крім того, обладнання T-MPLS коштувало на 30-40% дорожче, ніж обладнання PBB-TE.

Тому в 2009 році зусилля двох організацій MCE-T та IETF були об'єднані і почалася розробка концепції MPLS-TP (MPLS Transport Profile). За розвиток архітектури MPLS-TP відповідає об'єднана робоча група інженерів ITU-T і IETF. У даний час технологія MPLS-TP добре регламентована в документах:

RFC 5654 (Requirements of MPLS-TP), 5921 (A Framework for MPLS in Transport Profile), 5659 (Architecture for Multi-Segment Pseudowire Emulation Edge-2-Edge), 5960 (MPLS-TP Data Plane Architecture).

На рис. 2.7 зображено конвергенцію ITU-T/IETF у напрямку узгоджених стандартів MPLS-TP.

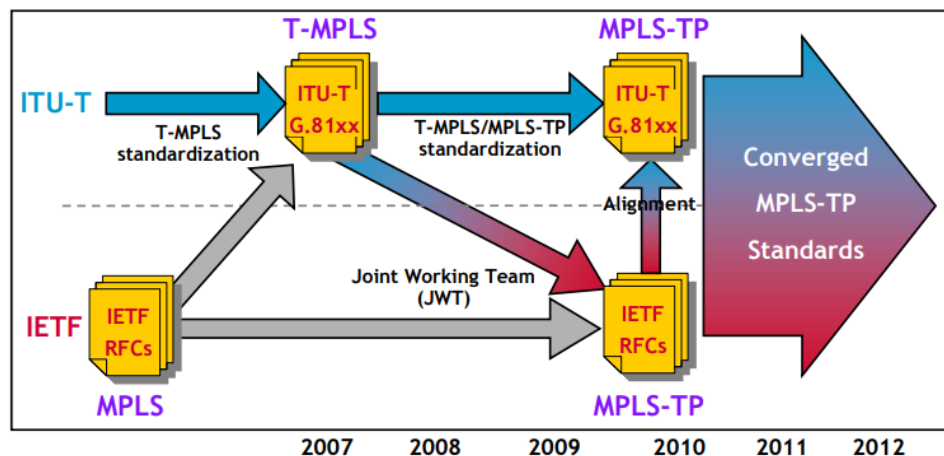


Рисунок 2.7 – Конвергенція ITU-T/IETF у напрямку узгоджених стандартів MPLS-TP

2.4.2 Огляд MPLS-TP

Сучасні транспортні мережі (наприклад, SONET/SDH) зазвичай управляються з єдиного центру експлуатації мережі (NOC) за допомогою централізованої системи управління мережею (NMS), яка зв'язується із мережевими елементами (NE) на місцях через мережу управління телекомунікаціями (TMN). NMS забезпечує відомі функції управління FCAPS, а саме: fault (управління несправностями), configuration (конфігурацією), accounting (обліком), performance (продуктивністю) і security (безпекою), як визначено в Рекомендації МСЕ-Т М.3400. Разом з функціями живучості, такими як захист та відновлення, показники доступності >99,999% були досягнуті завдяки дуже складним функціям OAM, які існують, наприклад, у транспортних мережах SONET/SDH. Ця добре зарекомендована парадигма управління мережею була

взята за основу при розробці нової технології пакетної транспортної мережі MPLS-TP [19].

Серед основних вимог до транспортної технології MPLS-TP слід виокремити:

- не повинна суперечити основним принципам роботи MPLS;
- повинна підтримувати взаємодію з існуючими мережами MPLS/PW (Pseudo Wire – емуляція провідного з'єднання) на рівнях управління та передачі даних;
- повинна організовувати тільки двонаправлені LSP;
- не повинно бути об'єднання LSP, а також створення паралельних шляхів у вигляді LSP для передачі одного і того ж трафіку;
- повинна підтримувати режими роботи встановлення LSP та PW без динамічного реконфігурування;
- OAM, схема захисту, віртуальні канали не повинні залежати від наявності або відсутності трафіку.

Основними атрибутами набору протоколів MPLS-TP є:

- площина даних – залишається точно такою ж, як і MPLS, щоб полегшити взаємодію з MPLS;
- площина управління – опціонально, динамічна через протоколи на основі IP або статична через платформу управління NMS;
- OAM – транспортно-подібний OAM;
- захист і відмовостійкість – SDH-подібні [19].

MPLS-TP підтримує статичне забезпечення транспортних шляхів через систему управління мережею (NMS) та динамічне забезпечення транспортних шляхів через площину управління. Площина управління в основному використовується для забезпечення функцій відновлення для підвищення рівня живучості мереж при наявності збоїв та облегшує наскрізне надання шляхів у доменах мережі або оператора. У оператора є вибір: включити площину управління або керувати мережею традиційним способом без площини

управління за допомогою NMS. Слід зазначити, що площина управління не робить NMS застарілою – NMS повинна конфігурувати площину управління, а також взаємодіяти із площиною управління для управління з'єднаннями.

Оператори зв'язку відчують безпрецедентне поєднання попиту на послуги, що вимагають вдосконалення і розширення (наприклад, Triple Play), в поєднанні із економічним тиском, спрямованим на мінімізацію витрат для надання цих послуг. MPLS-TP розробляється для задоволення цих суперечливих вимог шляхом впровадження у пакетні транспортні мережі функцій OAM, подібних SDH [20].

2.5 Організація тунелів в мережі MPLS та організація в них каналів за принципом PW (Pseudo wires)

Існує одна вельми важлива перевага MPLS, що заслуговує окремої згадки саме в контексті привабливості цієї технології. Це можливість в рамках архітектури MPLS разом із пакетом передавати не одну мітку, а цілий стек міток. Операції додавання/вилучення мітки визначені як операції на стеці (push/pop). Результат комутації задає лише верхня мітка стеку, нижні ж передаються прозоро до операції вилучення верхньої. Даний підхід дозволяє створювати ієрархію потоків у мережі MPLS і організувати тунельні передачі.

Йдеться про можливість в MPLS управляти усім трактом передачі пакету без специфікування в явному вигляді проміжних маршрутизаторів. Це досягається шляхом створення тунелів через проміжні маршрутизатори, які можуть охоплювати кілька мережевих сегментів, як це зображено на рис. 2.8

Усі пограничні маршрутизатори MPLS (LER1, LER2, LER3 і LER4) використовують протокол BGP і створюють комутований по мітках тракт LSP між ними (LSP1). LER1 знає про те, що його наступний пункт призначення – LER2, оскільки він передає дані від відправника, які повинні пройти через два сегменти мережі. У свою чергу, LER3 знає про те, що його наступний пункт призначення – LER4, і т.д. Ці чотири пограничні LER будуть використовувати

протокол LDP для отримання та зберігання міток від вихідного LER (LER4 в даному сценарії) аж до вхідного LER (LER1).

Однак, для того, щоб дані були передані від LER1 до LER2, вони повинні пройти через кілька (в даному випадку три) транзитних маршрутизаторів LSR. Таким чином, між двома LER (LER1 і LER2) створюється окремий тракт LSP (LSP2), який охоплює LSR1, LSR2 та LSR3.

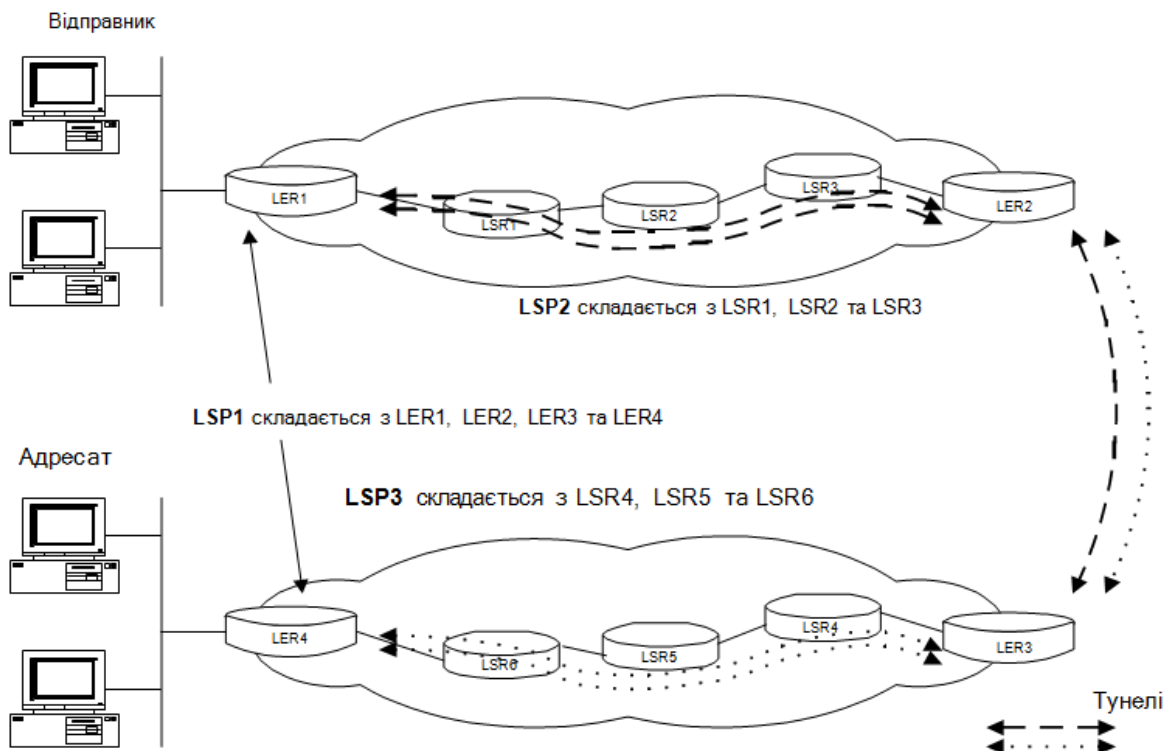


Рисунок 2.8 – Схема тунелювання MPLS

Він, по суті, являє собою тунель між цими двома LER. Мітки в цьому тракті відрізняються від міток, які LER створили для LSP1. Це справедливо і для LER3, і LER4, так само як і для LSR, що знаходяться між ними. Для цього останнього сегменту створюється тракт LSP3. Для досягнення цього результату, при передачі пакету через два мережевих сегменти використовується концепція стеку міток. Оскільки пакет повинен слідувати через LSP1, LSP2 і LSP3, він буде переносити одночасно дві окремі мітки. Пари, які використовуються для кожного сегменту, такі: для першого сегменту – мітка для LSP1 та LSP2, для другого сегменту – мітка для LSP1 та LSP3.

Коли пакет залишає першу мережу та приймається пограничним маршрутизатором LER2, той видаляє мітку для LSP2 і замінює її на мітку для LSP3, замінюючи при цьому мітку LSP1 всередині пакету на мітку наступного пересилання. LER4 видаляє обидві мітки перед відправкою пакету адресату [22].

2.5.1 Pseudo-Wire Emulation Edge to Edge (PWE3)

У комп'ютерних мережах та телекомунікаціях використовується псевдопровід – це емуляція двоточкового з'єднання по мережі з комутацією пакетів (PSN). Псевдопровід імітує роботу «прозорого проводу», що несе послугу, але зрозуміло, що така емуляція рідко буває ідеальною.

У 2001 році IETF створила робочу групу PWE3, якій було доручено розробити архітектуру для наскрізних псевдопроводів постачальника послуг та документи по конкретним послугам, котрі детально описують інкапсуляцію техніки [23]. Базовим документом, що стандартизує псевдопроводові мережі є RFC3985. Цей документ описує архітектуру наскрізної емуляції псевдопроводу (PWE3), в ньому обговорюється емуляція таких служб, як Frame Relay, ATM, Ethernet, TDM, SONET/SDH у мережах із комутацією пакетів (PSN), що використовують IP або MPLS.

PWE3 є механізмом, який емулює істотні атрибути телекомунікаційного сервісу в мережах PSN. Завданням PWE3 є лише забезпечення мінімальної необхідної функціональності для емуляції проводу із необхідним ступенем достовірності для даного типу сервісу [24].

З точки зору кінцевого користувальницького обладнання (CE) PW представляється як виділений (unshared) канал або пристрій відповідної служби.

Існує два методи створення PWE3:

- статичний PW – у статичному PW для узгодження параметрів не використовується протокол сигналізації; замість цього відповідна інформація задається вручну за допомогою команд;

- динамічний PW – динамічний PW відноситься до PW, який встановлюється за допомогою протоколу сигналізації. PWE3 використовує LDP як протокол сигналізації.

Основні транспортні компоненти мережі PWE3 наступні:

- attachment circuit (AC) – пристрій підключення – фізичний або віртуальний пристрій, що забезпечує підключення CE до PE;
- customer edge (CE) – клієнтський край – пристрій, один край якого є джерелом або завершенням сервісу;
- pseudo wire (PW) – псевдопровід – механізм, що забезпечує передачу істотних елементів емульованого сервісу з пристрою PE в один або безліч інших пристроїв PE через мережу PSN;
- provider edge (PE) – провайдерський край – пристрій, що забезпечує PWE3 для CE [25].

На рис. 2.9 зображено схему, яка вводить дані базові поняття.

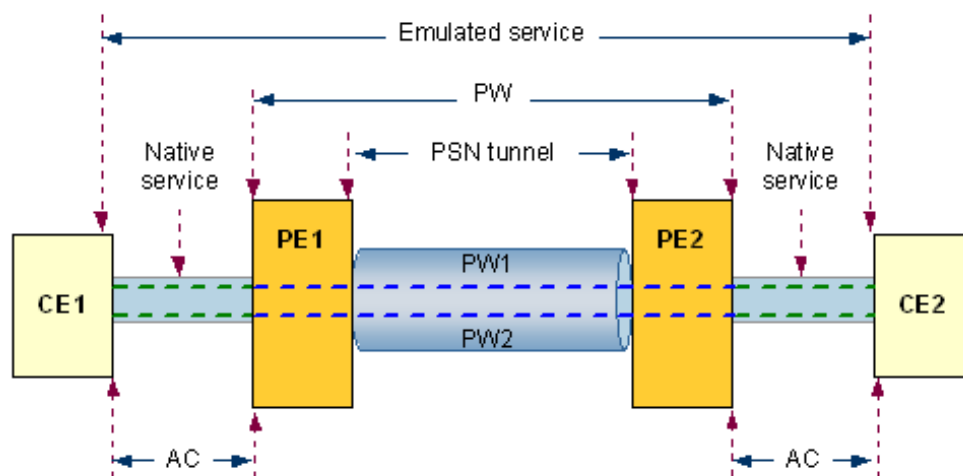


Рисунок 2.9 – Основні транспортні компоненти PWE3

Абонентський CE1 девайс підключається через Attachment Circuit (AC) до PE1 девайсу. AC в даному випадку символізує ту технологію, яку хоче передати абонент через мережу провайдера (ATM, наприклад). PE1 сигналізує pseudowire через провайдерську мережу, проходячи P девайси (Provider). PE2 є вихідним

пристроєм з pseudowire. Його завдання, передати трафік з нього в нативному форматі (ATM, у нашому випадку) до клієнта на його девайс CE2.

PSN tunnel (Packet Switched Network tunnel) – це тунель за яким передається трафік іншого тунелю (pseudowire). Тобто PE1 сигналізує з PE2 pseudowire-тунель і вони виділяють для нього мітки. Але для того, щоб доставити до PE2 трафік, PE1 повинен передати його через величезну мережу провайдера. Усередині мережі провайдера будується інший тунель, як правило теж MPLS, цей тунель і називається PSN. До слова, pseudowire зазвичай сигналізується засобами T-LDP, а PSN можна організувати різними способами (LDP, RSVP-TE, LDPoRSVP і навіть GRE).

Emulated Service – це сервіс, який прозора емулює провайдер від одного абонентського девайсу до іншого [26].

Конкретний формат інкапсуляції PWE3 трохи відрізняється в залежності від типу емульованої послуги, але існує і загальний формат інкапсуляції. Пакет PWE3 містить мітку MPLS, керуюче слово і корисне навантаження. На рис. 2.10 проілюстрований формат інкапсуляції PWE3.

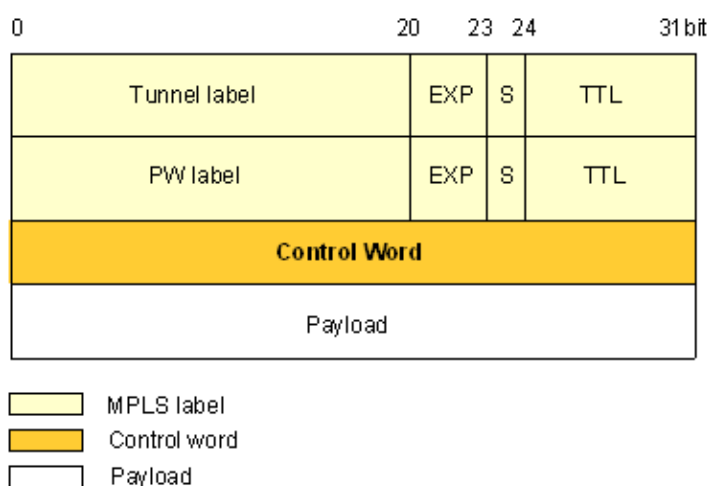


Рисунок 2.10 – Формат інкапсуляції PWE3

Мітки MPLS включають тунельні мітки і мітки PW, які використовуються для ідентифікації тунелів та PW відповідно. Формат тунельної мітки такий самий, як і формат мітки PW. 4-байтове керуюче слово – це заголовок, який

використовується для передачі пакетної інформації по MPLS PSN. Керуюче слово використовується для перевірки послідовності пакетів, фрагментації пакетів і реструктуризації пакетів. Конкретний формат керуючого слова визначається типом сервісу, переданого PWE3, та прийнятим режимом інкапсуляції [25].

2.6 Основні відмінності MPLS-TP від MPLS

У зв'язку зі зростаючим значенням пакетних мереж, в якийсь момент ІТУ-Т зацікавився адаптацією MPLS до застосування в мережах із рівнем якості операторського класу, що функціонують у відповідності зі встановленими ІТУ-Т архітектурними принципами. Вважалося, що MPLS не вистачає головних транспортних атрибутів, таких як жорсткий SLA, детермінована поведінка мережі та наскрізний OAM.

MPLS-TP заснований на тому ж архітектурному принципі мережевих рівнів, що використовується сьогодні в великомасштабних мережах OTN і SDH/SONET. Оператори зв'язку вже мають розроблені процеси управління і високорівневі робочі процедури, засновані на цих принципах.

MPLS-TP обіцяє стати тим рішенням, яке забезпечить трансформацію знайомих і надійних пакетних технологій (таких як IP/MPLS) в форму, прийнятту в організаційних процесах традиційних транспортних мереж із комутацією каналів, додавши до цього можливість обслуговування Ethernet та інших клієнтно-орієнтованих сервісів.

MPLS-TP це орієнтована на з'єднання пакетна мережа на основі MPLS, яка забезпечує керовані наскрізні з'єднання до мереж клієнтського рівня (таким як Ethernet). Це спеціально виділена реалізація MPLS, де вилучені всі зайві функції, що не мають відношення до комутації пакетних з'єднань, і додані ключові функціональні можливості, такі як QoS, наскрізний OAM та зарезервована комутація, забезпечивши тим самим повну детермінованість мережі.

Таким чином, MPLS-TP це новий різновид MPLS, спеціально призначений для застосування в транспортних мережах. Вона спирається на добре відомі та

широко використовувані технології та стандарти мереж IP/MPLS, але без всієї його надлишковості, яка не має відношення до додатків на основі з'єднань, і без пробілів у транспортній функціональності. MPLS-TP може розглядатися як основа мереж Ethernet та транспортних мереж OTN.

На відміну від класичного MPLS, MPLS-TP не підтримує режим без встановлення з'єднання, у нього більш прості можливості, він менш складний та більш керований. Він відкриває шлях до транспортної технології із низькою вартістю комутації на другому рівні, де усунена вся надлишковість маршрутизації третього рівня. Це повинно призвести до появи на ринку обладнання та рішень, які відповідають побажанням операторів до архітектури і вартості мереж наступного покоління [27].

Узагальнено можна виокремити базові відмінності MPLS-TP від MPLS. Серед них відзначимо наступні:

- орієнтована тільки на встановлення з'єднання;
- організація тільки двонаправлених каналів по заданим оператором маршрутам;
- постійний контроль за станом каналів за допомогою протоколів OAM;
- відсутність невизначеностей, що пов'язані з динамічною маршрутизацією;
- виділення потрібної гарантованої ємності каналів для всіх сервісів;
- резервування маршрутів та портів;
- швидкість відновлення працездатності до 50 мс;
- здатність передавати потоки PDH та агрегатні потоки SDH;
- обладнання дешевше ніж MPLS;
- мережі MPLS-TP експлуатуються за добре відпрацьованими процедурами транспортних мереж.

2.7 OAM-функціональність

OAM (Operations, Administration, and Maintenance) – операції, адміністрування і підтримка – служить загальним терміном для виявлення, ізоляції, інформування про відмови та моніторингу роботи мереж. Методи OAM, початково застосовувалися у традиційних технологіях зв'язку, таких як E1 і T1, пізніше перейшли в PDH, а потім у SONET/SDH. ATM була можливо першою технологією із вбудованою спочатку підтримкою OAM, тоді як в інших технологіях функції OAM зазвичай додавалися спеціальним чином вже після визначення та розгортання технології. Мережі на основі пакетів традиційно вважалися ненадійними і тими, що доставляють дані по мірі можливості (best effort). У міру розвитку пакетних мереж вони ставали базовим транспортом для передачі даних і телефонії, замінивши традиційні транспортні протоколи. Тому передбачається, що в пакетних мережах буде забезпечуватися «операторський рівень» і, зокрема, підтримка більш розвинених функцій OAM на додачу до ICMP і router hello, які традиційно служили для виявлення відмов.

Дамо визначення компонентам аббревіатури OAM:

- операції (operations) виконуються для підтримки працездатності мережі (і послуг, які забезпечуються мережею). Вони включають моніторинг та пошук несправностей. У ідеалі проблеми слід шукати до того, як вони почнуть впливати на користувачів;
- адміністрування (administration) включає контроль ресурсів мережі та їх використання, а також облік, який потрібен для відстеження ресурсів і контрольованої мережі;
- підтримка (maintenance) включає дії з технічного обслуговування, спрямовані на сприяння оновленню та ремонту, наприклад, заміну обладнання, встановлення програмних оновлень, додавання в мережу нових пристроїв. Підтримка також включає коригування та заходи запобігання для забезпечення

більш ефективного управління мережею, наприклад налаштування конфігурації і параметрів пристроїв [28].

2.7.1 MPLS-TP OAM

MPLS-TP володіє надійними та подібними транспорту можливостями експлуатації і управління (OAM). Оператори використовують OAM для надання надійних послуг із гарантованими угодами про рівень обслуговування (SLA), при цьому мінімізуючи час усунення несправностей та знижуючи експлуатаційні витрати.

Загальні вимоги до MPLS-TP OAM наступні:

- функції проактивного (безперервного) моніторингу, включаючи контроль безперервності, контроль з'єднання, контроль якості сигналу (втрата пакетів, затримка кадрів, зміна затримки кадрів), придушення сигналів тривоги, віддалена індикація якості та безперервності;
- додатки проактивного моніторингу – управління несправностями, моніторинг продуктивності/SLA, перемикання захисту;
- реактивний моніторинг/моніторинг на вимогу, включаючи локалізацію несправностей, вимірювання якості сигналу (пропускна здатність, вимірювання порядку та помилок, затримка передачі, варіації затримки і вимірювання джиттеру);
- канали зв'язку, включаючи координацію головного/хвостового вузла комутації захисту, управління мережею, управління віддаленими вузлами, управління послугами [19].

Існують два запропонованих стандарти для MPLS-TP OAM, і немає галузевої угоди з цього приводу. Вони засновані на рекомендаціях IETF (G.8113.2) і ITU-T (G.8113.1). Ці два рішення пропонують використання різних форматів одиниць даних протоколу (PDU) та використовують різні методи для задоволення вимог MPLS-TP OAM. Європейський центр тестування передових

мережевих технологій (EANTC) успішно провів тест на сумісність із декількома постачальниками для обох запропонованих рішень (окремо). Постачальники, які впроваджують рішення ITU-T OAM, отримали менше проблем, ніж рішення IETF OAM.

Як наслідок, деякі пристрої будуть використовувати рішення OAM на базі IETF, інші – на базі ITU-T, а третя сторона підтримуватиме рішення із можливими функціями взаємодії (IWF). Це робить транспортну мережу MPLS дуже складною в експлуатації і ускладнює ручне налаштування OAM, що може збільшити операційні витрати (OpEx). Щоб вирішити цю проблему, пропонується використовувати автоматичний механізм для виявлення того, який зі стандартів OAM може бути обраний, для визначення ідентифікатора кінцевої точки обслуговування (MEP ID) без необхідності ручного регулювання, а також для виявлення методу OAM, підтримуваного MEP.

Існує три види OAM: Hop-by-hop (наприклад, на основі площини управління), Out-of-band OAM (наприклад, зворотний шлях UDP протоколу User Datagram Protocol) та In-band OAM (наприклад, Pseudowire PW Emulation Edge-to-Edge PWE-3 Associated Channel Ach). У рамках MPLS, Ach відомий як техніка для внутрішньосмугової перевірки з'єднання віртуальних ланцюгів (VCCV), застосовна тільки для PW, в той час як LSP із комутацією міток не мають механізму для відрізнення користувальницьких пакетів від пакетів OAM. MPLS-TP розширив Ach до Generic Associated Channel (G-Ach) і ввів нову мітку G-Ach Alert Label (GAL) для ідентифікації пакетів на G-Ach, як описано на рис. 2.11.

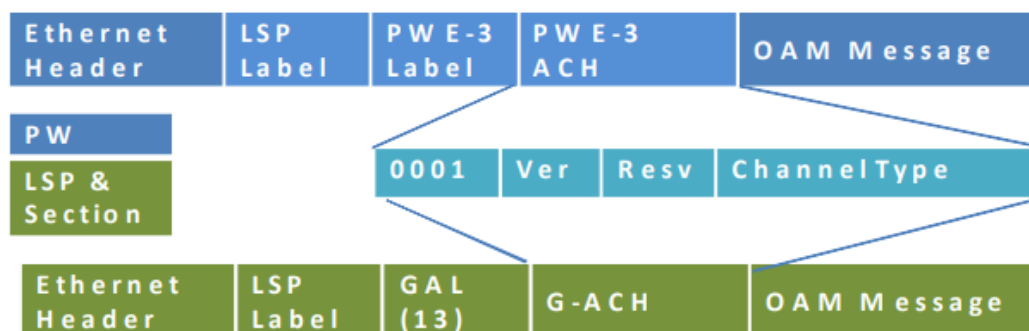


Рисунок 2.11 – Асоційований канал для LSP, секції та PW

Це внутрішньосмуговий канал управління на PW або LSP, який не залежить від маршрутизації, користувальницького трафіку або динамічних функцій площини управління. Пакети OAM можуть проходити по одному шляху з користувальницьким трафіком, працювати на основі кожного домена та/або в декількох доменах і можуть бути налаштовані у відсутності площини управління.

Мережева модель MPLS-TP OAM складається з:

- різноманітних рівнів OAM (адміністративні домени). Кожен рівень може незалежно контролюватися своїми власними кадрами управління несправностями з'єднання Ethernet (CFM). Область дії кадрів OAM обмежена доменом, у якому інформація, що переноситься, є значимою;

- двох планів: «вертикальний план», який представляє суб'єкти OAM у різних адміністративних доменах, та «горизонтальний план», який представляє суб'єкти OAM у межах одного адміністративного домену.

Група об'єктів обслуговування (Maintenance Entity Group, MEG) – це частина транспортного шляху, яка контролюється або обслуговується. Кінцеві точки MEG називаються кінцевими точками управління (MEPs), а проміжні вузли – проміжними точками управління (MIPs). Повідомлення OAM можуть обмінюватися між MEP або від одного MEP до іншого MIP. MEP обробляє OAM-пакет, коли він прибуває на Label Edge Router (LER), а потім розкривається GAL, що дозволяє MEP почати обробку відповідною OAM-функцією. MIP може обробляти OAM-пакет, використовуючи механізм Time To Leave (TTL). Існують також деякі відмінності в термінології, використовуваної ITU-T і IETF, як показано в табл. 2.1 [29].

Таблиця 2.1 – Термінологія IETF і ITU-T

| IETF | ITU-T |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Maintenance Domain (MD) | Maintenance Entity (ME) |
| Maintenance Association (MA) | Maintenance Entity Group (MEG) |
| Maintenance Intermediate Point (MIP) | MEG Intermediate Point (MIP) |
| Maintenance Endpoint (MEP) | MEG Endpoint (MEP) |
| Maintenance Domain Level | MEG Level |

2.7.1.1 Інструменти ITU-T OAM G.8113.1

MCE-T пропонує повторно використовувати ті ж одиниці даних протоколу OAM (PDU) і процедури, визначені в Ethernet OAM MCE-T Y.1731. На рис. 2.12 показано, що наявність PDU OAM Y.1731 ідентифікується одним каналом ACH Type. У PDU OAM поле OpCode дозволяє ідентифікувати тип кадру OAM.

| 1 | | | | 2 | | | | | | | | 3 | | | | | 4 | | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|---|---------|---|---|---|----------|---|---|---|---------------------------|----|---|-----|------------|---|---|---|---|---|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Tunnel Label GAL (13) | | | | | | | | | | | | | TC | S | TTL | | | | | | | | | |
| 0001 | | | | 0000 | | | | 00000000 | | | | Channel Type (Y.1731 OAM) | | | | | | | | | | | | |
| MEL | | | | Version | | | | OpCode | | | | Flags | | | | TLV offset | | | | | | | | |
| OAM PDU Payload area (Y.1731) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| End TLV | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рисунок 2.12 – Визначення формату пакету OAM ITU-T

ITU-T OAM надають набір механізмів, що відповідають вимогам MPLS-TP OAM. Підтримувані методи та процедури перераховані в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – G.8113.1 Функції OAM

| OAM Function (IETF draft-bhh-mpls-tp-oam-y1731) | | | | |
|---|--|-----------------------------|------------------------|--|
| Fault Management (FM) | | Performance Management (PM) | | Other Applications |
| Pro-active | Continuity check and Connectivity Verification (CC/CV) | Pro-active | Loss Measurement (LM) | Automatic Protection Switching (APS) |
| | Remote Defect Indication (RDI) | | | Management communication channel/Signaling communication channel (MCC/SCC) |
| | Alarm Indication signal (AIS) | | Delay Measurement (DM) | Vendor-specific (VS) |
| | Client signal Fail (CSF) | | | Experimental (EXP) |
| On-demand | Connectivity Verification (CV) | On-demand | Loss Measurement (LM) | Connectivity Verification (CV) |
| | Diagnostic test (DT) | | | Diagnostic test (DT) |
| | Locked Signal (LCK) | | Delay Measurement (DM) | Locked Signal (LCK) |

Цей набір інструментів OAM претендує на звання зрілого і широко розгорнутого. Він все ще перебуває на стадії консенсусної стандартизації. Однак G.8113.1 все ще вимагає, щоб кодова точка G-Ach була призначена IANA (IETF).

2.7.1.2 Інструменти IETF OAM G.8113.2

Рішення IETF засноване на існуючому наборі інструментів MPLS OAM і забезпечує наступні функції: CC для проактивного моніторингу, CV для перевірки кінцевих точок, PM, FM та діагностика. Це рішення вимагає специфічних розширень Bidirectional Forwarding Detection (BFD) та LSP Ping, а також введення нових механізмів для функцій, недоступних в MPLS, таких як вимірювання втрат та затримки. BFD і LSP повинні бути спроможними працювати без IP (IP less).

На рис. 2.13 показано визначення формату пакету IETF OAM.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---------|---|---|---|----------|---|---|---|---|---|---|---|--------------|---|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | 2 | | | | | | | | 3 | | | | | | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| LSP Label | | | | | | | | | | | | | | | | TC | S | TTL | | | | | | | | | | | | | |
| Tunnel Label (13) | | | | | | | | | | | | | | | | TC | S | TTL | | | | | | | | | | | | | |
| 0001 | | | | version | | | | Reserved | | | | | | | | Channel Type | | | | | | | | | | | | | | | |
| ACH TLV Header | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OAM PDU Payload area (BFD, LSP Ping ...) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| End TLV | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рисунок 2.13 – Визначення формату пакету IETF OAM

Підтримувані методи та процедури перераховані в табл. 2.3 [29].

Таблиця 2.3 – IETF MPLS-TP OAM Functions/RFCs

| Fault Management (FM) | | | Performance Management (PM) | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|---|-------------------------------|--------------------|
| Pro-active | MPLS-TP Identifiers | RFC6370 | Proactive PM OAM Functions and On demand PM OAM | Packet Loss Measurement (LM) | RFC6374 RFC6375 |
| | RDI – use BFD extension | RFC6428 | | | |
| | AIS | RFC6427 | | Packet Delay Measurement (DM) | |
| | Link Down Indication (LDI) | | | | |
| | Lock Report (LKR) | | | | |
| Config MPLS-TP OAM using LSP Ping | draft-absw-mpls-lsp-ping-mpls-tp- | Throughput measurement | | | |
| On-demand | CV – use LSP Ping and BFD Extensions | RFC6426 | Delay variation measurement (use DM) | | |
| | Loopback Message/Replay (LBM/LBR) | RFC6435 | | | |
| | Lock Instruct (LI) | | | | |

2.8 Моніторинг та керування мережею MPLS-TP

Площина керування MPLS-TP заснована на комбінації площини керування MPLS для псевдопроводів та площини керування GMPLS для MPLS-TP LSP, відповідно. Розподілена площина керування MPLS-TP забезпечує наступні основні функції:

- сигналізація;
- маршрутизація;
- інженерія трафіку та обчислення шляху на основі обмежень.

Більш того, площина керування MPLS-TP здатна виконувати швидке відновлення в разі збоїв у мережі.

Площина керування MPLS-TP надає функції для забезпечення власної живучості та можливості плавного відновлення після збоїв і деградації. До них відносяться граціозний перезапуск та конфігурації із гарячим резервуванням. Площина керування MPLS-TP максимально відділена від площини даних MPLS-TP, так що збої в площині керування не впливають на площину даних і навпаки.

Механізм площини керування відповідає за створення LSP (динамічно або статично) в мережі MPLS. Набір протоколів MPLS підтримує надійну та зрілу динамічну площину керування із такими протоколами, як OSPF-TE, IS-IS-TE, RSVP-TE, LDP і BGP. Однак сучасні транспортні мережі використовують статичну площину керування, тобто ланцюги статично надаються інтелектуальною системою управління мережею (NMS). Динамічна площина керування є необов'язковою в MPLS-TP. Статичне забезпечення в MPLS підтримується багатьма виробниками вже досить довгий час. Статична площина керування може бути застосовна в сценаріях, коли деяке обладнання, особливо, що використовується на границях мережі, не підтримує динамічну площину керування, або коли статична конфігурація краща з міркувань безпеки. Керована NMS площина управління також дозволяє операторам керувати мережею на основі пакетів так само, як вони історично керували мережею з комутацією каналів.

Незважаючи на те, що в MPLS-TP використання динамічної площини керування є необов'язковим, вона має свої переваги, зокрема, щодо масштабування. Вона також забезпечує розширені функції захисту (наприклад, захист хвостової частини LSP) [30]. Можна використовувати динамічну площину керування з MPLS-TP, щоб LSP та PW створювалися мережею за допомогою G-MPLS та T-LDP відповідно. G-MPLS заснований на TE-розширеннях MPLS (MPLS-TE). Він також може використовуватися для налаштування функції OAM та визначення механізмів відновлення. T-LDP є частиною архітектури PW і широко використовується сьогодні для сигналізації PW та їх стану [31].

2.9 Подальший розвиток транспортних мереж, перехід до GMPLS

Ідея про можливість поширити парадигму заміни міток MPLS на нові оптичні технології була вперше представлена як специфікація для управління світловими шляхами, або оптичними слідами. Кожен вузол ОХС (Optical Cross-Connect) взаємодіє подібно MPLS LSR із площиною керування. Між сусідніми ОХС встановлюється окремий канал керування IP. Світлові шляхи стають шляхами LSP, а вибір лямбд та портів крос-з'єднання є процесом, аналогічним призначенням міток і зв'язок мітка-FEC.

Технологія узагальненої (універсальної) багатопроTOCOLЬНОЇ комутації за мітками (Generalized Multi-Protocol Label Switching, GMPLS) розроблена технічною комісією Інтернет (IETF). Термін «узагальнена» в назві технології підкреслює той факт, що GMPLS охоплює усі аспекти комутаційних можливостей: від комутації пакетів до комутації довжин хвиль оптичних волокон.

Таким чином, MPLS еволюціонує до GMPLS шляхом розширення (генералізації) поняття мітки на різні комутаційні додатки: часове мультиплексування TDM, частотне мультиплексування FDM і просторове мультиплексування SDM. Мітки більше не є виключно додатковими полями в заголовку пакета мережевого рівня, вони можуть бути також оптичними лямбдами та ін.

Існують чотири класи шляхів, які можна створювати за допомогою сигналізації GMPLS:

- статистично мультимплексовані шляхи – звичайні пакети MPLS, які використовують проміжний заголовок;
- шляхи TDM – кожен часовий канал є міткою;
- шляхи FDM – кожна електромагнітна частота (тобто довжина світлової хвилі) є міткою;
- шляхи SDM – міткою є позиція, наприклад місце розташування волокна в пучку.

Технологія GMPLS специфікована в документі RFC3471, що описує саму технологію, а також у RFC3472, присвяченому сигналізації CR-LDP, і RFC3473, що описує протокол RSVP-TE. Усі три документи мають схожу структуру, але якщо в RFC 3471 специфікуються тільки інформаційні поля повідомлень, то в двох інших документах ці поля до того ж обрамляються службовою інформацією конкретного протоколу.

Це дозволяє додати ще одне трактування слова «generalized» в назві технології. Йдеться про те, що GMPLS розширює і число можливих типів обладнання, що входить до складу MPLS-мережі. Універсальність нової архітектури полягає в тому, що вона може включати в себе LSR, котрі нездатні аналізувати заголовки пакетів, але здійснюють маршрутизацію, ґрунтуючись на часових інтервалах, довжинах хвиль або фізичних портах. Таким чином, всі LSR, а точніше – інтерфейси на LSR, можуть бути поділені на такі класи:

- інтерфейси Packet-Switch Capable (PSC), здатні розрізнити границі пакетів та осередків і здійснювати маршрутизацію, ґрунтуючись на змісті їх заголовків, наприклад, звичайні LSR або АТМ-комутатори;
- інтерфейси Time-Division Multiplex Capable (TDM), через які маршрутизують дані, ґрунтуючись на їх часових інтервалах, наприклад інтерфейси SDH або входи комутаційного поля цифрової АТС;

- інтерфейси Lambda Switch Capable (LSC), через які здійснюється маршрутизація на основі довжини хвилі, тобто інтерфейси оптичних лямбда-комутаторів;
- інтерфейси Fiber-Switch Capable (FSC), через які маршрутизуються дані, ґрунтуючись на їх реальному фізичному середовищі перенесення, наприклад інтерфейси оптичного комутатора, що працює на рівні одного або декількох оптичних волокон.

Відзначимо, що PSC-інтерфейси нічим не відрізняються від використовуваних у традиційній MPLS-мережі, в зв'язку з чим нижче будемо розрізняти PSC- і не-PSC-інтерфейси, так як саме наявність останніх є причиною появи більшості опцій GMPLS.

Принцип вкладених LSP дозволяє масштабувати систему, формуючи ієрархію маршрутизації. Нагорі ієрархії розташуються FSC-інтерфейси, за ними – LSC, потім TDM і нарешті PSC. Таким чином, LSP, який починається і закінчується на PSC-інтерфейсі, може (разом з кількома іншими LSP) бути поміщений в LSP, що починається та закінчується на TDM-інтерфейсі. Також LSP рівня TDM та інших рівнів можуть бути вкладені в LSP, які ієрархічно розташовані вище.

Унаслідок використання в GMPLS інтерфейсів, відмінних від PSC, з'явилася необхідність встановлення двонапрямлених LSP. Зокрема, вони використовуються для запобігання конфліктної ситуації захоплення ресурсів, що виникає при встановленні різних LSP по окремим сигнальним сесіям; а також для спрощення процедур відновлення після збоїв на не-PSC обладнанні. Також двонаправлені LSP мають переваги меншого часу затримки при їх встановленні та меншої кількості необхідних для цієї операції повідомлень.

У технології GMPLS формалізується можливе розділення каналів сигналізації і каналів даних, що важливо для підтримки технологій, де сигнальний трафік не може посилатися разом із користувальницькою інформацією. Також

GMPLS передбачає можливість розширення протоколів сигналізації специфічними параметрами для підтримки конкретних технологій.

GMPLS визначає ще кілька удосконалень, які необхідні для виконання роботи MPLS в оптичних мережах, у число яких входять зв'язування каналів, нумеровані канали та новий протокол, котрий базується на IP, LMP (Link-Management Protocol). Зв'язування каналів являє собою агрегування атрибутів каналів більш ніж одного паралельного каналу в єдиний пучок каналів. Виграш від такого зв'язування полягає в зменшенні величини бази даних станів каналів та поліпшення деяких важливих характеристик масштабування. Нумеровані канали підтримують канали, що не сконфігуровані IP-адресами. Використання альтернативної ідентифікації каналів спрощує багато завдань управління каналами. Знову запропонований нумерований тег каналу є кортежем «ідентифікатор маршрутизатора/номер каналу». LMP – додатковий протокол управління, який обумовлений особливими оптичними вимогами моніторингу та управління між двома сусідніми оптичними вузлами. LMP забезпечує верифікацію зв'язності каналів, кореляцію властивостей каналів, управління керуючими каналами та локалізацію несправностей [2].

2.10 Висновки до розділу 2

У даному розділі було розглянуто історію виникнення транспортних мереж на основі технології MPLS. Детально розглянуто основні поняття та ідеї цієї технології, основні елементи архітектури. Проведено аналіз адаптації MPLS до вимог транспортних мереж. Коротко проаналізовано мережі MPLS TP, принципи організації магістральних каналів в мережі, тунелі та побудова каналів за принципом PWE. Визначено основні відмінності між MPLS TP та MPLS. Проаналізовано процеси керування, моніторингу мережею MPLS TP та розглянуто подальший розвиток транспортних мереж, зокрема, перехід до технології GMPLS.

Поява технології MPLS обумовлена недоліками IP-маршрутизації. У мережах MPLS пакетам даних присвоюються так звані «мітки» (Label). Вони використовуються у якості своєрідної адреси вузла, якому призначений конкретний пакет даних. Основна ідея MPLS TP полягає у розширенні MPLS, де це необхідно, засобами експлуатації, адміністрування і обслуговування (OAM).

3 ОБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ MPLS-TP

3.1 Cisco CPT – Carrier Packet Transport

Cisco CPT (Carrier Packet Transport – операторський пакетний транспорт) – рішення для модернізації операторських транспортних інфраструктур, яким необхідно підтримувати такі IP-послуги нового покоління, як відео, мобільність та «хмарні» обчислення. Нове рішення поєднує надійність транспортної мережі із ефективністю пакетних технологій, дозволяючи успішно доставляти нинішні та майбутні послуги.

Динамічна розподілена природа відео, мобільних послуг і «хмарних» обчислень найрадикальнішим чином змінює характер мережевого трафіку і викликає бурхливе зростання обсягів переданої інформації. Наявні технології вже не справляються із цим потоком та не можуть ефективно доставляти передові мережеві послуги.

Можливості сучасної технології мультиплексування із поділом каналів за часом та синхронної оптичної/цифрової мережевої ієрархії явно недостатні для ефективної обробки нових, передових сервісів. Система Cisco CPT надає транспортній платформі гнучкість та ефективність пакетної мережі, дозволяючи швидко та динамічно адаптувати транспортні мережі до вимог нових додатків при одночасному скороченні капітальних витрат. Крім того, система Cisco CPT підтримує надійність, стійкість і передбачуваність, а також всю функціональність, необхідну для експлуатації, управління та технічної підтримки. Cisco CPT – перша платформа в галузі, що підтримує стандартний транспортний профіль із багатопроTOCOLьною комутацією за мітками (MPLS-TP), повністю сумісний із технологією MPLS, яка працює на таких маршрутизаторах Cisco, як Cisco ASR 9000 та Cisco CRS-3.

Система випускається в 6-поличному (Cisco CPT 600) та двополичному (Cisco CPT 200) варіантах із супутниковим пристроєм (Cisco CPT 50). Система Cisco CPT підтримує технологію MPLS-TP, мережі Ethernet з широкими

можливостями управління якістю (QoS) та віртуальними локальними приватними мережами (VLAN) [32].

3.1.1 CPT600/200/50

Сімейство продуктів Cisco Carrier Packet Transport (CPT) із серіями CPT600, CPT200 і CPT50 встановлює галузевий стандарт у якості компактної конвергентної платформи доступу та агрегації операторського класу для архітектур уніфікованого пакетного транспорту. Сімейство продуктів Cisco CPT представляє собою захоплюючу нову парадигму в світі пакетної передачі даних із винятковою масштабованістю по мірі зростання, надійністю операторського класу, неймовірною гнучкістю та простотою надання пакетних послуг, OAM та можливостями захисту, подібно TDM.

На рис. 3.1 зображена схема модулю Cisco CPT 600, на рис. 3.2 – модулю CPT 200 та на рис. 3.3 – модулю CPT 50 відповідно.

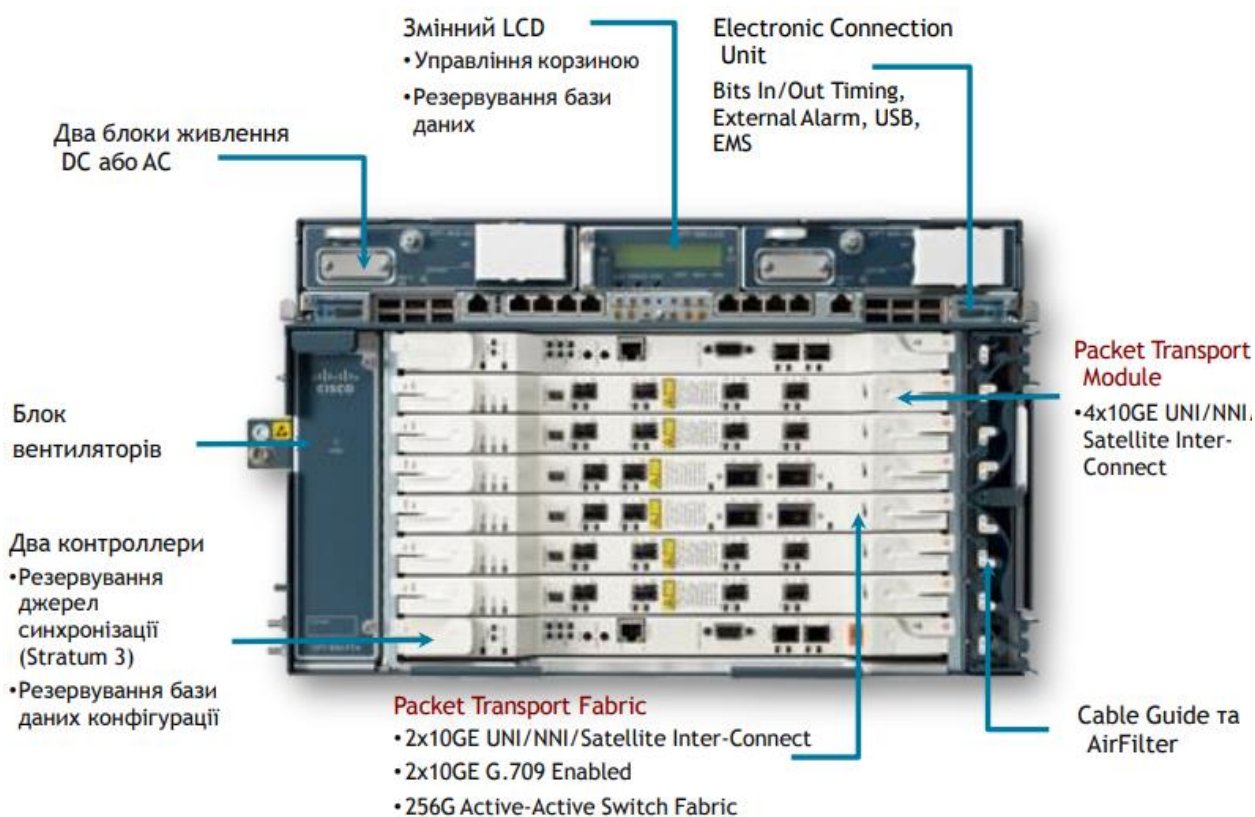


Рисунок 3.1 – Схема модулю Cisco CPT 600

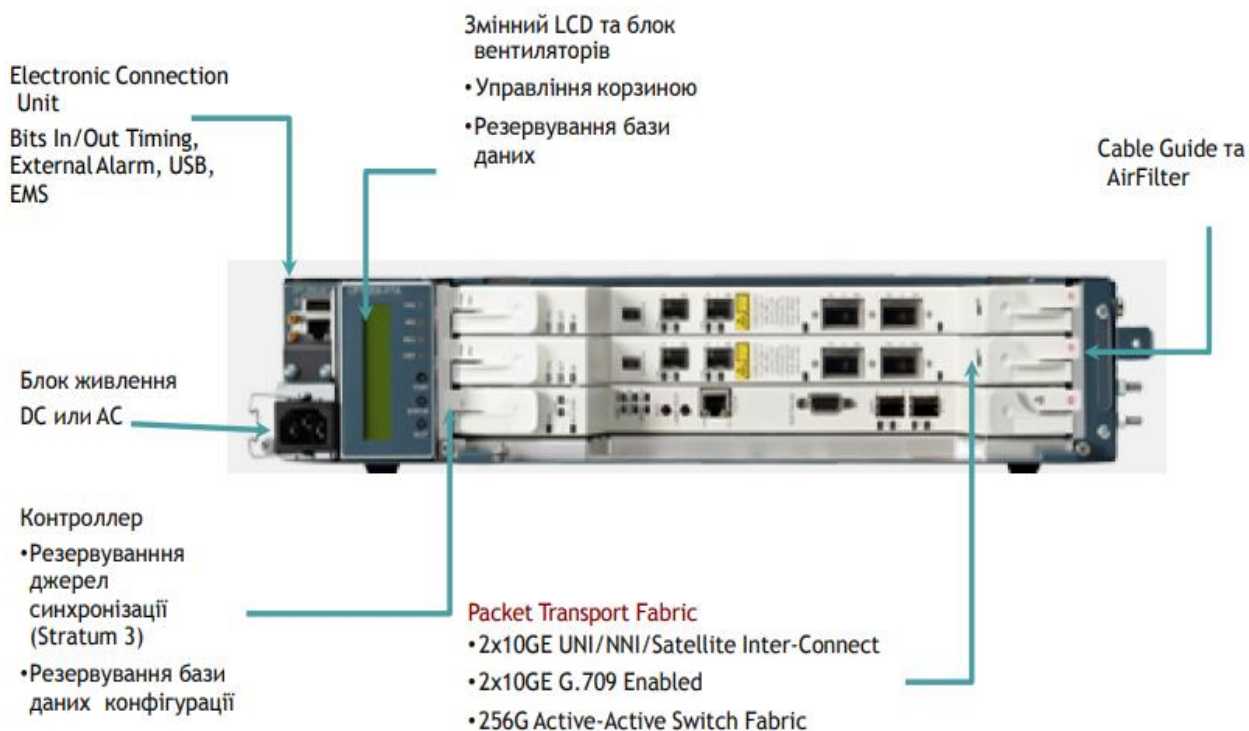


Рисунок 3.2 – Схема модулю Cisco CPT 200

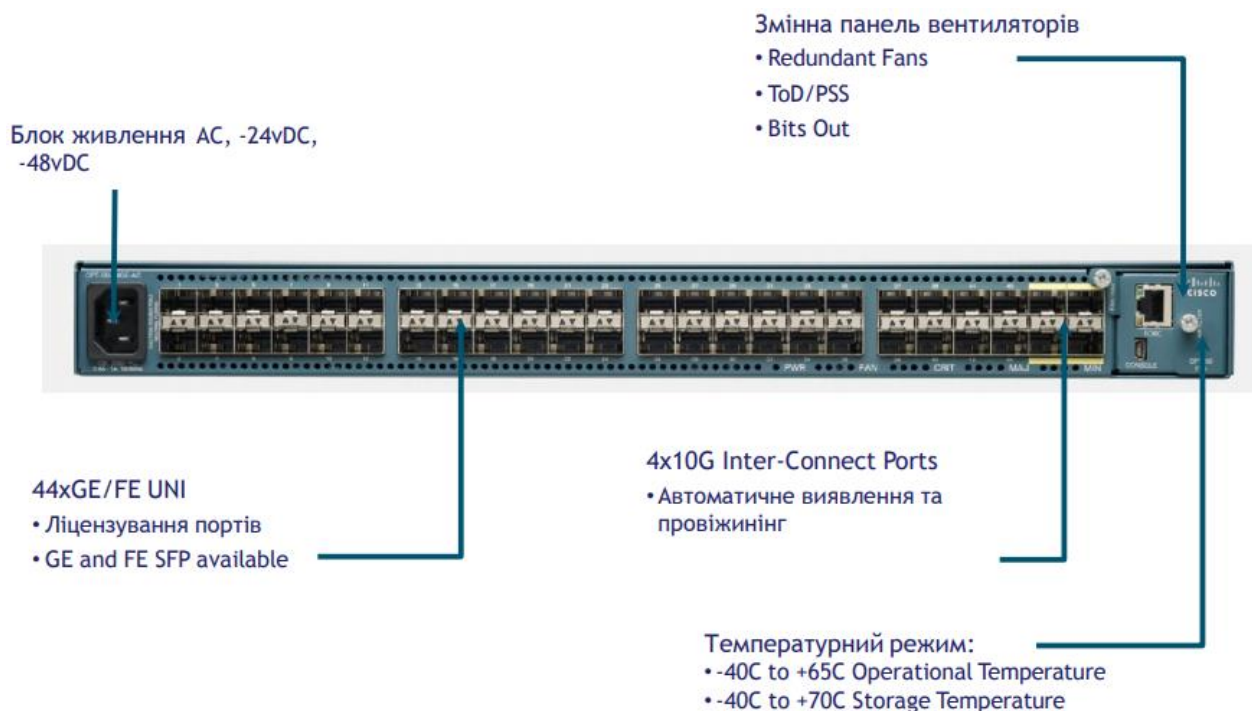


Рисунок 3.3 – Схема модулю Cisco CPT 50

Cisco CPT 50 – це компактна та проста в експлуатації, але при цьому дуже масштабована і гнучка платформа, оптимізована для надання приватних ліній

TDM і Ethernet, а також багатоточкових можливостей для бізнесу, житлових приміщень, мобільних транзитних мереж, центрів обробки даних та відеопослуг. Її унікальна супутникова архітектура розроблена для масштабування, спрощення і поліпшення аспектів експлуатації та розгортання мереж надання послуг. Cisco CPT 50 Series працюють як віддалені лінійні карти для CPT 600 та/або CPT 200, разом утворюючи розподілену модульну систему. Ця архітектура дозволяє створювати фізичні топології із гнучкістю і перевагами віддаленого та локалізованого розгортання [33].

3.1.2 Cisco ASR 9000v

Система Cisco ASR 9000 System забезпечує підвищену потужність і простоту пограничних мереж, а ASR 9000v (рис. 3.4) встановлює галузевий стандарт у якості віртуалізованої компактної конвергентної платформи доступу та агрегації операторського класу. Використовуючи технологію «мережевої віртуалізації» або nV (network virtualization), система Cisco ASR 9000 забезпечує виняткову масштабованість по мірі зростання, надійність операторського класу і спрощене надання послуг.



Рисунок 3.4 – Cisco ASR 9000V Series

Основні характеристики ASR 9000v включають:

- діє як супутник у розподіленій архітектурі із гнучкістю для надання множини послуг, спеціально створений для зниження CAPEX і OPEX витрат;
- підтримує безпрецедентну щільність портів у просторі 1 RU з 44 абонентськими портами на базі SFP (10/100/1000 Мбіт/с) і 4 мережевими висхідними портами 10GE на базі SFP +;

- ліцензійна модель оплати в міру зростання портів Ethernet дозволяє клієнтам оптимізувати поточні капітальні витрати, при цьому маючи можливості для зростання в майбутньому без необхідності модернізації [34].

3.2 Raisecom ITN221

ITN221 – гібридна мультисервісна транспортна платформа висотою 1,5RU – є потужним продуктом, спрямованим на сприяння міграції до мереж з пакетною передачею даних. Живиться від змінного або постійного струму, обладнана інтелектуальним вентилятором та змінними допоміжними картами, вона може надавати послуги голосу, послуги послідовної передачі даних і послуги передачі даних Ethernet.

Застосовується в мережах SDH, MEF CE2.0 або MPLS-TP, таким чином задовольняючи вимогам для доступу і передачі традиційних послуг передачі в галузях U&T та допомагає здійснити перехід до передачі послуг із комутацією пакетів. ITN221, що зображено на рис. 3.5, має один основний слот, MCC-модуль, який включає: 2x STM-1/4 інтерфейсів, 4x GE 10/100/1000 Base-T, 2x GE SFP і 8x E1's в додачу до трьох слотів для суб-карт (FXS/FXSO/E&M, Magneto, TP, E1, GE, RS232/V24/RS485, V35/X21 та 64K Codir iTN221).



Рисунок 3.5 – Raisecom ITN221

ITN221 – це пристрій кінцевого доступу у вертикальній площині U&T, він надає різні типи сервісних інтерфейсів, тому він може формувати єдину платформу з iTN2100 або iTN8800. Ним можна управляти локально або через систему Raisecom Nview NNM. Він може відповідати спеціальним вимогам до

синхронізації SyncE та IEEE 1588, тому він може підтримувати гнучкі схеми реалізації. Завдяки цій інтегрованій системі оператори зв'язку та інтернет-провайдери можуть заощадити значні суми на CAPEX і OPEX для впровадження масштабованих мереж і додаткових послуг в майбутньому [35].

3.3 ZTE ZXCTN 6000

У зв'язку з ростом послуг 3G/LTE від мереж передачі даних вимагається забезпечити множину гнучких функцій із великою пропускнуою здатністю та низькою вартістю. Портфель продуктів ZXCTN 6000 (рис. 3.6) призначений для створення високоефективних і енергозберігаючих бездротових мереж передачі даних, а також для розширення ринку та впровадження інноваційних послуг операторами зв'язку.



Рисунок 3.6 – Портфель продуктів ZXCTN 6000

ZXCTN 6000 забезпечує постачальникам послуг плавний перехід до побудови конвергентної пакетної транспортної мережі на основі технології MPLS/MPLS-TP. Він забезпечує орієнтовані на з'єднання функції традиційної транспортної мережі, такі як SDH-подібний OAM, досконалі механізми захисту та потужне управління, з перевагами чудового статистичного мультиплексування та гнучкого розгортання чистих IP-мереж.

ZXCTN 6000 пропонує широкий набір інтерфейсів із неперевершеною гнучкістю обслуговування. Він дозволяє постачальникам послуг надавати послуги мобільного транзитного зв'язку, послуги IP та операторського Ethernet бізнес-класу, послуги асинхронного режиму передачі (ATM) і мультиплексування з часовим поділом (TDM) приватних виділених ліній на швидкостях від E1 до STM-4, а також послуги Ethernet від 10 Мбіт/с до 10 Гбіт/с [36].

3.4 Висновки до розділу 3

У даному розділі було розглянуто типи обладнання мереж MPLS TP від провідних виробників телекомунікаційного обладнання (Cisco, Raisingcom, ZTE). Проаналізовано основні можливості та технічні характеристики.

Cisco CPT підтримує стандартний транспортний профіль з багатопротоковою комутацією за мітками (MPLS-TP), повністю сумісний з технологією MPLS, яка працює на таких маршрутизаторах Cisco, як Cisco ASR 9000 та Cisco CRS-3.

Raisingcom ITN221 застосовується в мережах MPLS-TP, задовольняючи вимогам для доступу і передачі традиційних послуг передачі в галузях U&T та допомагає здійснити перехід до передачі послуг із комутацією пакетів.

ZTE ZXCTN 6000 забезпечує орієнтовані на з'єднання функції традиційної транспортної мережі, такі як SDH-подібний OAM, досконалі механізми захисту та потужне управління.

ВИСНОВКИ

Згідно із завданням на дипломну роботу, був здійснений огляд транспортних мереж на основі технології багатопротокольної комутації за мітками. Основна частина роботи присвячена аналізу історії створення даної технології, її основних понять та ідей, основних елементів архітектури, адаптації MPLS до вимог транспортних мереж, а також транспортного профілю багатопротокольної комутації за мітками під назвою MPLS-TP, який є фундаментом для пакетної транспортної мережі наступного покоління.

Транспортна мережа, окрім високої пропускної спроможності, повинна забезпечувати мінімальні затримки пакетів на маршрутах. Це можливо досягти замінивши комутацію за маршрутними таблицями комутацією за мітками. Така технологія носить назву MPLS і дещо модифікованою є базовою в сучасних транспортних мережах.

MPLS, яка була досить успішною технологією пакетної передачі даних, орієнтованою на з'єднання, пройшла виробничу перевірку в тисячах мереж по всьому світу та ідеально підходить для пакетних транспортних мереж. Значне число постачальників послуг вже перевели свої опорні мережі на MPLS, і багато хто хотів би перевести на MPLS свої мережі доступу, агрегації та опорні мережі наступного покоління. Однак для того, щоб цей перехід відбувся, необхідно внести кілька удосконалень в набір протоколів MPLS, щоб забезпечити функціональність та керованість, відповідні поточним транспортним мережам із комутацією каналів.

Транспортний профіль MPLS (MPLS-TP) являє собою стандарт, розроблений IETF спеціально для використання технології MPLS в транспортних мережах. Ця специфікація дозволяє інтегрувати різні транспортні мережі в єдину інфраструктуру, що дозволяє скоротити витрати обслуговування і підвищити ефективність управління.

GMPLS – це еволюційна технологія, яка була розроблена після успіху MPLS в мережах із комутацією пакетів. Традиційна MPLS була розроблена для передачі

IP-трафіку третього рівня шляхом створення IP-шляхів і асоціювання цих шляхів із довільно призначеними мітками. MPLS еволюціонує до GMPLS шляхом генералізації поняття мітки на різні комутаційні додатки: часове мультиплексування TDM, частотне мультиплексування FDM і просторове мультиплексування SDM. Мітки більше не являються виключно додатковими полями в заголовку пакета мережевого рівня, вони можуть бути також оптичними лямбдами та ін.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Г.Н. Попов. Телекоммуникационные системы передачи PDH и SDH. Часть II. Основы построения SDH. /Учебное пособие – Новосибирск: Изд. «ВЕДИ», 2007. 2-е издание, испр. и доп. – 286 с.
2. Транспортные сети IP/MPLS. Технология и протоколы : учебное пособие /А. Б. Гольдштейн, А. В. Никитин, А. А. Шкрыль ; СПбГУТ. – СПб., 2016. – 80 с.
3. Фомін М.М., Житник І.В. Обґрунтування впровадження технології мультипротокольної комутації по міткам як основи транспортної мережі зв'язку // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2014. №3 (21). С. 64–68.
4. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції. Том 1. URL: <http://www.znanius.com/3533.html> (дата звернення: 13.04.2021).
5. Організація операційних процесів в галузі електрозв'язку. Мод. 1. Ч. 1, Організація операційних процесів в галузі радіозв'язку, радіомовлення та телебачення. [Текст] : навч. посібник / С. Б. Горелкіна, Є. М. Стрельчук, Н. К. Заборська ; каф. менеджменту та маркетингу. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2007. – 95 с.
6. П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко Телекомунікаційні та інформаційні мережі : Підручник [для вищих навчальних закладів]. – К.: САММІТ-Книга, 2010. – 708 с.: іл.
7. Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління: конспект лекцій. Модуль 5.2 / Педяш В.В. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017. – 76 с.
8. Ильтаф В. Эффективный механизм передачи данных в опорных IP-сетях с использованием технологии MPLS / В. Ильтаф // Беспроводные технологии. 2017. № 2. URL: <https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/1447.pdf> (дата звернення: 14.04.2021).
9. Бирюков Н.Л. Эволюция технологий базовой транспортной сети и сети доступа. URL: <https://www.itu.int/ITU->

- [D/tech/events/2010/RDF_EUR/Presentations/Session4/RDF10_EUR_Presentation_NBiriukov_1.pdf](#) (дата звернення: 15.04.2021).
10. What is Carrier Grade? URL: <https://getvoip.com/library/what-is-carrier-grade/> (дата звернення: 15.04.2021).
11. What is carrier-grade exactly? URL: <https://www.appneta.com/blog/what-is-carrier-grade-exactly/> (дата звернення: 15.04.2021).
12. Бубенцова Л.В. Технология MPLS: учебное пособие для студентов четвертого курса / Бубенцова Л.В. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2010. – 44 стр.
13. Шувалов В.П., Тимченко С.В. Обобщённая многопротокольная коммутация по меткам: Учебное пособие / СибГУТИ. – Новосибирск, 2007. – 147с.
14. Сатовский Б.Л. MPLS – технология маршрутизации для нового поколения сетей общего пользования. URL: http://www.ccc.ru/magazine/depot/01_03/0303.htm (дата звернення: 20.04.2021).
15. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS СПб.: БХВ — Санкт-Петербург, 2005. — 304 с.: ил.
16. Будылдина Н.В., Шувалов В.П. Телекоммуникационные сети с многопротокольной коммутацией по меткам. Построение и оптимизация – Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2006.–274 с.
17. RFC 5036 LDP Specification. URL: <https://www.protocols.ru/WP/rfc5036/?print=print> (дата звернення: 22.04.2021).
18. MPLS-TP – The New Technology for Packet Transport Networks. URL: <https://www.dfn.de/fileadmin/3Beratung/DFN-Forum2/118.pdf> (дата звернення: 22.04.2021).
19. MPLS-TP OAM Toolset: Interworking and Interoperability Issues. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.671.8416&rep=rep1&type=pdf> (дата звернення: 23.04.2021).
20. Decoding MPLS-TP and the deployment possibilities. URL: <https://www.stl.tech/brain-share/white-papers/decoding-mpls-tp-and-the-deployment-possibilities.php> (дата звернення: 25.04.2021).

21. RFC 6373 MPLS Transport Profile (MPLS-TP) Control Plane Framework. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6373> (дата звернення: 30.04.2021).
22. Гольдштейн А.Б. Механизм эффективного туннелирования в сети MPLS // Вестник связи. 2004. №2.
23. Псевдопровод – Pseudo-wire. URL: <https://360wiki.ru/wiki/Pseudo-wire> (дата звернення: 01.05.2021).
24. RFC 3985 Pseudo Wire Emulation Edge-to-Edge (PWE3) Architecture. URL: <https://www.protocols.ru/WP/rfc3985/> (дата звернення: 04.05.2021).
25. The Pseudowire Emulation Edge to Edge (PWE3). URL: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/the-pseudowire-emulation-edge-to-edge-pwe3/thread/705635-875?page=2> (дата звернення: 06.05.2021).
26. Сервисно-ориентированный подход и PWE3. URL: <http://www.labnfun.ru/2016/06/pwe3.html> (дата звернення: 10.05.2021).
27. Тенденции эволюции транспортных сетей. URL: <https://nag.ru/articles/article/20069/tendentsii-evolyutsii-transportnyih-setey.html> (дата звернення: 11.05.2021).
28. RFC 7276 An Overview of Operations, Administration, and Maintenance (OAM) Tools. URL: <https://www.protocols.ru/WP/rfc7276/?print=print> (дата звернення: 13.05.2021).
29. Azizi M., Benaini R., Ben Mamoun M. (2013) MPLS-TP: OAM Discovery Mechanism. In: Guyot V. (eds) Advanced Infocomm Technology. ICAIT 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7593. Springer, Berlin, Heidelberg.
30. A Set of Enhancements to the Rich MPLS Toolkit. URL: <http://opti500.cian-erc.org/opti500/pdf/sm/mpls-tp%20Juniper.pdf> (дата звернення: 18.05.2021).
31. Understanding MPLS-TP and Its Benefits. URL: https://www.cisco.com/en/US/technologies/tk436/tk428/white_paper_c11-562013.html (дата звернення: 18.05.2021).
32. Cisco CPT – Carrier Packet Transport. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83>

[%D0%BA%D1%82: Cisco CPT - Carrier Packet Transport](#) (дата звернення: 20.05.2021).

33. Cisco Carrier Packet Transport (CPT) 50 Data Sheet. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/optical-networking/carrier-packet-transport-cpt-system/data_sheet_c78-633751.html (дата звернення: 20.05.2021).
34. Cisco ASR 9000v Series Aggregation Service Routers. URL: <https://www.metodos.ru/upload/iblock/918/6723b1fd0d37d41f623530391d563d4c.pdf> (дата звернення: 21.05.2021).
35. Raisecom ITN221. URL: <https://deps.ua/ua/katalog/ip-mpls/raisecom-itn221.html> (дата звернення: 21.05.2021).
36. ZXCTN 6000 Carrier-Class Multiservice Transport Platform. URL: <http://www.telecomdatasheets.com/ddata/743.pdf> (дата звернення: 22.05.2021).