

УДК 004(71+728)

МИКОЛА НЕСТЕРЕНКО

КОМПЛЕКСНІ АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАСПОРТНИХ МЕРЕЖ IP / MPLS

В даній роботі проводилась оцінка ефективності мережевих технологій IP/MPLS, що застосовуються в якості базових при розгортанні сучасних транспортних мереж. Основні вимоги, що висуваються до технологій магістральної компоненти є: висока пропускна спроможність, незначне значення затримки обробки повідомлень та її масштабованість. Впровадження сучасних мережевих технологій таких, як MPLS вимагає достатньо великих матеріально-технічних витрат на її розгортання та проведення попередньої оцінки величини ефекту в залежності від області її застосування. В свою чергу використання тільки IP-мереж не дозволяє: забезпечити гнучке, раціональне розподілення інформаційних потоків; дотримуватись нормованих значень параметрів якості обслуговування для мультимедійного трафіку; реалізувати швидку та адаптивну зміну маршрутів передачі інформації у випадку перевантажень у мережі. Для обґрунтування вибору запропонованих технологій постає задача створення адекватних моделей, які дозволяють кількісно оцінити величину вигаду в часі при обробці повідомлень, в залежності від розмірності мережі та враховують особливості роботи активного мережевого обладнання при MPLS-комутації та IP-маршрутизації.

Для оцінки якості обслуговування повідомлень в пакетних мережах був використаний метод імітаційного моделювання, булева алгебра та бітові моделі. В результаті був проведений аналіз порядку і швидкості обслуговування пакетів мережах IP/MPLS на базі імітаційної моделі сегменту корпоративної мережі та розроблені комплексні аналітичні моделі, що враховують особливості роботи мережевих протоколів, функціонування активного обладнання мережі. Отримані комплексні аналітичні моделі можуть бути використані для оцінки ефективності технологій IP/MPLS в залежності від розмірності та топології мережі.

Ключові слова: MPLS, протоколи маршрутизації, протокол сигналізації, емуляція мережевих активних елементів, таблиця просування, бітові моделі.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день головними вимогами, що висуваються до транспортної мережі є висока пропускна спроможність, мінімальні значення затримки та можливість її масштабування. Це пояснюється тим, що сучасні потреби користувачів включають як і доступ до інтегрованих сервісів мережі, так і організацію віртуальних приватних мереж (VPN) та ряд інших інтелектуальних послуг. В зв'язку з цим, зростаючий попит на додаткові послуги, що реалізуються поверх простого IP-доступу, має великі перспективи та призводить до збільшення навантаження на мережу.

У свою чергу, технологія комутації міток MPLS [1] - [3] призначена для збільшення пропускної спроможності як глобальних, так і корпоративних мереж. Це обумовлено тим, що у класичних IP-мережах необхідний перегляд таблиць маршрутизації для кожного пакету, який передається, кожним маршрутизатором, що вимагає певних часових затрат і в сумі може обмежувати загальну пропускну спроможність мережі.

Мітка, відповідно до технології MPLS має менший розмір, ніж IP-адреса, та є по суті, ідентифікатором віртуального каналу, для обробки якого передбачені більш ефективні алгоритми. Крім того, технологія MPLS дозволяє інтегрувати мережі IP, ATM та Frame Relay у випадку підтримки останніми протоколу призначення міток (LDP), завдяки чому можна провести модернізацію даного типу мереж при збереженні закупленого обладнання та існуючої інфраструктури.

Проведення оцінки щодо визначенням величини ефекту від впровадження MPLS технології в порівнянні з IP-маршрутизацією, яка домінує в сучасних пакетних мережах вимагає створення адекватних аналітичних моделей або розробки імітаційних моделей для проведення експерименту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що побудова аналітичних моделей MPLS та IP-мереж ускладнена зважаючи на порівняно високу складність зазначених технологій, стандартні специфікації яких налічують більш п'яти сотень сторінок [1] - [5]. Також виникають неоднозначності щодо вибору узагальненого показника у зв'язку із різними апаратно-програмними рішеннями різних вендорів мережевого обладнання.

Метою статті є аналіз порядку і швидкості обслуговування пакетів мережах IP/MPLS на базі імітаційної моделі сегменту корпоративної мережі та розробка комплексних аналітичних моделей, що враховують особливості роботи мережевих протоколів, функціонування активного обладнання мережі для оцінки ефективності вище приведених технологій в залежності від розмірності та топології мережі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основна ідея технології MPLS полягає в наступному: для визначення топології мережі використовуються стандартні протоколи маршрутизації (наприклад, внутрішньошлюзові протоколи RIP, IS-IS, OSPF), а передача інформації всередині границь мережі одного постачальника послуг (MPLS-домену) використовується техніка віртуальних каналів. У зв'язку з цим дана технологія отримала назву багатопроTOCOLної комутації за допомогою міток (MultiProtocol Label Switching, MPLS) [3].

Таким чином, головна особливість технології MPLS – відокремлення процесу комутації пакету від процесу маршрутизації (аналізу IP-адрес в заголовку пакету) в середині MPLS-домену. А саме, передача кадру в MPLS-мережі здійснюється на основі MPLS-мітки і методу шляхів передачі з комутацією за мітками (Label Switching Path, LSP) LSP, а не на основі адресної інформації і відповідного методу передачі технології (наприклад PPP, Ethernet, Frame Relay, ATM), формат кадру якої MPLS використовує.

У наслідок цього наступний сегмент LSP може не збігатися з черговим сегментом маршруту, який був би вибраний при традиційній маршрутизації.

Розглянемо основні ключові моменти технології MPLS [4]. По-перше, для здійснення комутації, а саме для визначення шляхів передачі з комутацією за мітками LSP, необхідне створення таблиці просування (комутації) в кожному маршрутизаторі MPLS-мережі. Дані таблиці для кожного активного елемента MPLS-мережі формуються за допомогою сигнального протоколу, який називається протоколом розподілу міток (Label Distributon Protocol, LDP).

В рамках архітектури MPLS розрізняють наступні типи активного обладнання [4]:

LSR (Label switch Router) – маршрутизатор, який підтримує комутацію за мітками і традиційну IP-маршрутизацію, тобто підтримує сигнальний протокол розповсюдження міток LDP та один із стандартних протоколів маршрутизації. Однак, передача пакетів LSR здійснюється безпосередньо на основі міток, після встановлення шляху передачі інформації LSP;

LER (Label switch Edge Router) або (Edge LSR) – пограничний комутуючий за мітками маршрутизатор, що приймає трафік від інших мереж (зовнішніх не MPLS-мереж) у вигляді стандартних IP-пакетів, потім добавляє до них мітку та направляє по відповідному шляху до іншого вихідного пристрою LER через декілька транзитних пристроїв LSR.

При ініціалізації сеансу між зовнішніми мережами (від користувачів мережі 193.233.154.0/24 до 193.233.48.0/24, рис. 1.) здійснюється розподіл міток на основі LDP протоколу для формування LSP-шляхів усередині MPLS-домену. При чому, LSP – однонаправлений віртуальний канал, тому для дуплексної передачі використовують два LSP.

Розглянемо порядок передачі та модифікації пакету в MPLS мережі згідно приведеного прикладу представленого на рис. 1. На граничному маршрутизаторі LER_1 кожному IP-пакету який приходить з мережі 193.233.154.0/24 додається мітка.

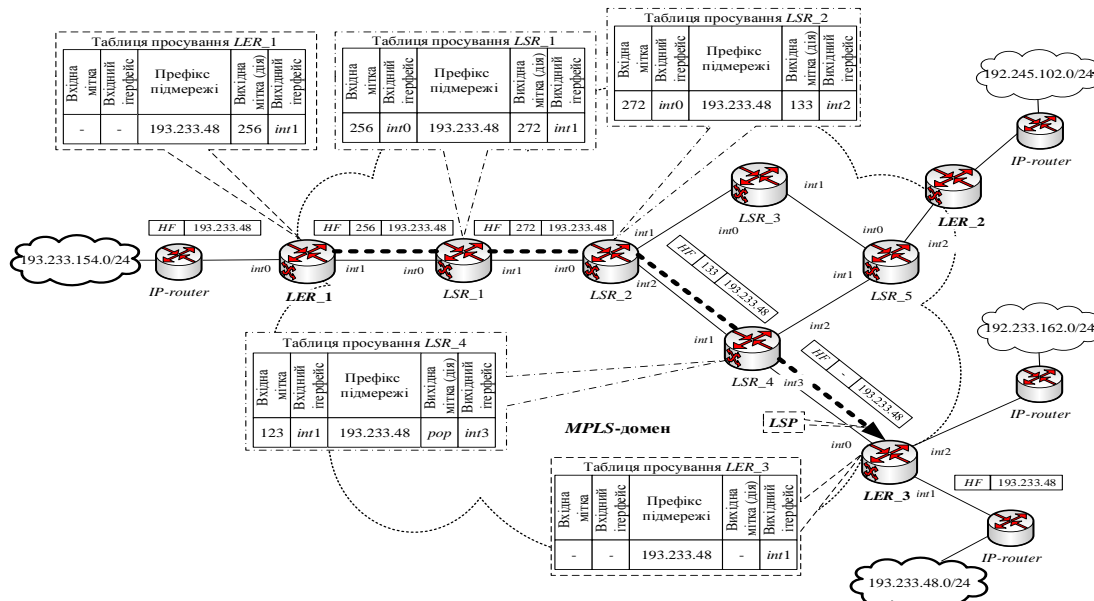


Рисунок 1 – Приклад порядку проходження пакету через MPLS-домен

Відповідне значення мітки записується до складу MPLS заголовка, який включається між заголовком кадру (Head Frame, HF) (другий рівень OSI) і заголовком IP-пакету (третій рівень моделі OSI). Даний процес також називається “призначенням мітки” (label imposing). LSR_1 отримує з інтерфейсу №0 (interface, int_0) IP-пакет з міткою 256 і на основі таблиці MPLS-комутації (таблиця просування LSR_1) визначає, що мітка пакету має бути змінена на 272 і пакет має бути пересланий у бік LSR_2, через інтерфейс №1 (int_1) LSR_1. Даний процес називається “перепишуванням мітки” (label swapping). При цьому, унікальною комбінацією є вхідний інтерфейс і мітка.

LSR_2 також отримує з інтерфейсу №0 (int_0) IP-пакет з міткою 272 і на основі таблиці MPLS-комутації (таблиця просування LSR_2) аналогічно визначає, що мітка пакету має бути змінена на 133 і пакет має бути пересланий у бік LSR_3, через інтерфейс №2 (int_2) LSR_2.

При отриманні LSR_4 з інтерфейсу №1 (int_1) IP-пакету з міткою 133 згідно таблиці MPLS-комутації (таблиця просування LSR_4) він визначає, що пакет має бути пересланий у бік граничного маршрутизатора LER_3 без міток (значення pop), через інтерфейс №1 (int_3) LSR_4. Така дія називається “видаленням мітки” (Penultimate Hop Popping, PHP). Цей механізм дозволяє зменшити час щодо передачі пакету, за рахунок виключення додаткових операцій, а саме LER_3 повинен виконувати тільки аналіз таблиці IP-маршрутизації.

Виходячи з цього, при встановленні маршруту LSP, на останньому LSR маршрутизаторі, який сполучений з вихідним граничним LER маршрутизатором використовується Penultimate Hop Popping (PHP) для виключення проміжного аналізу таблиці MPLS-комутації (таблиці просування) вихідним LER.

LER_3 отримує з інтерфейсу №0 (int_0) IP-пакет без мітки і на підставі таблиці IP-маршрутизації (таблиця просування LER_3) визначає, що даний пакет має бути пересланий, як звичайний IP-пакет у бік IP-маршрутизатора мережі 193.233.48.0/24, через інтерфейс №1 (int_1) LER_3.

Ще одним важливим механізмом щодо оптимізації передачі трафіку є використання стеку міток. Це дозволяє організувати систему агрегованих шляхів із будь-якою кількістю рівнів ієрархії. В свою чергу MPLS-заголовок (32 біти) кожного рівня має власний набір полів: Label (Label Value, ідентифікатор віртуального каналу, 20 біт), Exp (Experimental Use, для експериментальних досліджень, 3 біт), S (Bottom of Stack, ознака стеку міток, та дорівнює одиниці в випадку використання агрегованих трактів, 1 біт), TTL (Time to Live, час життя мітки, 8 біт). При цьому, послідовність заголовків організована як стек наступним чином: є мітка яка знаходиться на вершині стека та мітка, що знаходиться на його дні, при чому остання мітка стека має ознаку S=1.

Для створення віртуальної моделі сегменту мережі відповідних технологій та проведення дослідження на її основі було обрано програмне забезпечення GNS3 (Global Network Simulator 3). В свою чергу, GNS3 – графічний симулятор мережі, який дозволяє моделювати та аналізувати функціонування мереж із складною топологією при застосуванні існуючих сучасних мережевих протоколів. Необхідно відмітити що, GNS3 є проектом із відкритим вихідним кодом.

Особливістю даного програмного продукту є те, що в ньому можна цілком та повністю відтворити роботу мережевих пристроїв компаній Cisco та Juniper, емулюючи їх мережеві операційні системи на власному комп'ютері. Таким чином, конфігурація та робота даних пристроїв цілком відповідає роботі існуючих маршрутизаторів та комутаторів, що дозволяє моделювати та аналізувати роботу будь-яких мереж.

Також необхідно відмітити, що в GNS3 є вбудовані засоби, які дозволяють організувати з'єднання спроектованої топології з реальною мережею. Це дає просто унікальну можливість перевірити на практиці будь-який проект, без використання реального мережевого обладнання.

У програму GNS3 інтегрований аналізатор трафіку Wireshark, який дозволяє аналізувати мережевий пакет, відображаючи значення кожного поля протоколу будь-якого рівня.

Перед початком розроблення імітаційної моделі необхідно провести опис функціонування її основних компонентів. При цьому, введемо наступні обмеження та допущення:

- мережа будується на базі маршрутизаторів Cisco, з підтримкою MPLS;
- побудова і підтримка таблиці маршрутизації реалізується протоколом OSPF;
- побудова і підтримка таблиці просування реалізується протоколом сигналізації для розподілення міток LDP;
- розглядається четверта версія IP4 протоколу;
- використовуються високонадійні канали передачі, тому ймовірністю помилки (відкидання пакету) можна знехтувати;
- не враховується час на запис та зчитування інформації в реєстр;
- конфігурація мережі проведена оптимально.

Розглянемо принцип функціонування та порядок обробки пакетів IP-маршрутизатором [5] з точки зору обробки повідомлень на третьому рівні OSI. А саме, розглянемо більш детально порядок визначення адреси наступного маршрутизатора (визначення маршруту) за допомогою таблиці маршрутизації при використанні масок підмереж:

- видалення із вхідного IP-пакету адреси призначення $IP_{\text{отримувача}}$, яка складає 32 біти;
- пошук специфічного маршруту, шляхом порівняння $IP_{\text{отримувача}}$, яка була видалена з вхідного пакету тільки з тими рядками адрес призначення таблиці маршрутизації PN_i (32 біт) напроти яких є запис 255.255.255.255 (маска підмережі), де i – номер рядка (запису) в таблиці маршрутизації ($i \in \overline{1, K}$). Для цього можна застосувати елементарну логічну операцію AND (логічне множення). Тобто $IP_{\text{отримувача}} AND PN_i$: якщо є співпадання то обирається адреса наступного маршрутизатора, якщо ні виконується пошук не специфічного маршруту;

– пошук не специфічного маршруту, виконується шляхом накладання по черзі масок адрес призначення M_i де i – номер рядка (запису) в таблиці маршрутизації ($i \in \overline{1, K}$), починаючи з першого рядка, на адресу призначення $IP_{\text{отримувача}}$ вхідного IP-пакету. При чому застосовується наступне правило: $IP_{\text{отримувача}} AND M_i$. Всі співпадання фіксуються та здійснюється перегляд всієї таблиці маршрутизації.

– видача значення наступного маршрутизатора та номеру вихідного інтерфейсу: якщо не має співпадань то використовується шлях по замовчуванню (Default router); якщо єдине співпадання (в результаті накладання масок на $IP_{\text{отримувача}}$), то видається значення адреси призначення та вихідного інтерфейсу, яке відповідає даному рядку; якщо декілька співпадань, тоді серед них обирається ті які мали найбільше співпадання двійкових розрядів.

Тому кожним IP-маршрутизатором необхідне виконання наступних обов'язкових дій при обробці полів IP-паketу, в випадку виконання прийнятих допущень та обмежень:

- перевірка контрольної суми IP-паketу KS здійснюється, шляхом порівняння значення яке надійшло в паketі з реальною довжиною заголовку IP-паketу. При цьому, перед початком розрахунку значення контрольної суми встановлюється в нульове. Якщо в результаті порівняння воно змінюється та паket відкидається.

- перевірка часу життя паketу TTL , якщо $TTL=0$ паket відкидається тому це операція не враховується;

- корегування часу життя паketу, за рахунок віднімання одиниці від молодшого розряду;

- пошук специфічного маршруту;

- пошук не специфічного маршруту.

Для проведення кількісної оцінки, а саме визначення асимптотичної часової складності, можна застосувати бітову модель, яка заснована на рівномірній ваговій функції. Дану модель також називають бітовими розрахунками: всі змінні приймають значення "0" або "1"; використовуються логічні (булеві) операції (AND ; OR ; $NOTAND$).

Тобто враховуючи порядок обробки полів IP-паketів маршрутизаторами можна засовувати наступні формули, які базуються на застосуванні елементарних функцій:

1. Перевірка контрольної $KS = KS_{вхідна} NOTAND KS_{розрахована} = 0$, де $NOTAND$ – операція "І-НІ" (обернена до логічного множення); $KS_{вхідна}$ – значення контрольної суми заголовку, яке було видалено із відповідного поля вхідного паketу; $KS_{розрахована}$ – значення контрольної суми заголовку, яке було визначено.

2. Коректування $TTL_{IP} = TTL_{IP} OR$ одиниця (одиниця додається до молодшого розряду), де OR – логічне додавання для всіх розрядів даного поля в зв'язку тим, що операція віднімання апаратно заміняється операцією додавання, а також може виникати операція переносу в старший розряд.

3. Пошук специфічного маршруту $SR = IP_{отримувача} AND PN_i$, де i – номер рядка (запису) в таблиці маршрутизації ($i \in 1, K$) напроти якого є запис 255.255.255.255. Тобто кількість таких рядків (i) залежить від кількості специфічних маршрутів.

4. Пошук не специфічного маршруту $NSR = IP_{отримувача} AND M_i$, де i – номер рядка (запису) в таблиці маршрутизації ($i \in 1, K$), при чому K – загальна кількість рядків в таблиці маршрутизації.

У випадку коли відсутні специфічні маршрути, а їх використання не є обов'язковим, найбільші розрахункові витрати припадають на визначення не специфічного маршруту (NSR), які в свою чергу прямопропорційні розмірності таблиці маршрутизації. Тобто загальна кількість логічних операцій, які витрачаються при обробці паketів одним IP-маршрутизатором, при прийнятих допущеннях, складає:

$$Q_{Б, IP} = KS + TTL_{IP} + NSP.$$

Розглянемо принцип функціонування та порядок обробки паketів пограничними LER маршрутизаторами та LSR-комутаторами в мережі MPLS. При цьому необхідно відмітити, що LSR-комутатори використовують тільки таблицю просування, а таблицю маршрутизації не використовують.

Для проведення оцінки, у випадку використання в якості критерію, значення кількості елементарних операцій можна привести наступний аналітичний апарат. У випадку застосування вхідного (вихідного) LER, при умові що розсилка міток LPD реалізована оптимально, при отриманні IP-паketу, LER виконуються всі ті самі дії, що і при IP-маршрутизації:

1. Перевірка контрольної $KS = KS_{вхідна} NOTAND KS_{розрахована} = 0$, де $NOTAND$ – операція „І-НІ" (обернена до логічного множення); $KS_{вхідна}$ – значення контрольної суми заголовку, яке було видалено із відповідного поля вхідного паketу; $KS_{розрахована}$ – значення контрольної суми заголовку, яке було визначено.

2. Коректування $TTL_{IP} = TTL_{IP} OR$ одиниця (одиниця додається до молодшого розряду), де OR – логічне додавання для всіх розрядів даного поля в зв'язку тим, що операція віднімання апаратно замінюється операцією додавання, а також може виникати операція переносу в старший розряд.

3. Пошук специфічного маршруту $SR = IP_{отримувача} AND PN_i$, де i – номер рядка (запису) в таблиці маршрутизації ($i \in \overline{1, K}$) напроти якого є запис 255.255.255.255. Тобто кількість таких рядків (i) залежить від кількості специфічних маршрутів.

4. Пошук не специфічного маршруту $NSR = IP_{отримувача} AND M_i$, де i – номер рядка (запису) в таблиці маршрутизації ($i \in \overline{1, K}$), при чому K – загальна кількість рядків.

А також виконується додаткова операція, щодо призначення перед заголовком IP-паketу MPLS-заголовку або стеків MPLS-заголовків. Необхідно відмітити, що дана операція відсутня на вихідному пограничному LER-маршрутизаторі.

У подальшому на кожному LSR відбувається MPLS-комутація, а саме з кадру відповідної каналної технології (PPP, Ethernet, Frame Relay, ATM) вилучається MPLS-заголовок, що знаходиться на вершині стеку та проводиться його аналіз.

Аналіз MPLS-заголовку включає наступні характерні операції:

1. Коректування часу життя мітки $TTL_{Label} = TTL_{Label} OR$ одиниця (одиниця додається до молодшого розряду), де OR – логічне додавання для всіх розрядів даного поля в зв'язку тим, що операція віднімання апаратно замінюється операцією додавання, а також може виникати операція переносу в старший розряд.

2. Знаходження значення вихідної мітки в таблиці просування:

$$LV_{вих.} = LV_{вхідна} AND LV_{FT i},$$

де $LV_{вхідна}$ – значення вхідної мітки; AND – елементарна логічна операція логічного множення $LV_{FT i}$ – відповідний запис значення мітки в таблиці просування, яка була згенерована за допомогою протоколу LPD .

3. Перевірка признаку стеку міток $Bottom\ of\ Stack = S AND$ одиниця. Тобто, якщо $S = 1$ то на останньому LSR в LSP -маршруті, який безпосередньо підключений до вихідного LER відбувається відкидання MPLS-заголовку.

Загальна сума елементарних операцій при обробці мітки одним LSR складає:

$$Q_{BL} = TTL_{Label} + LV_{вих.} + Bottom\ of\ Stack .$$

Перед початком проведення експерименту необхідно визначити початкові дані, з врахуванням зроблених обмежень та допущень.

Постановка задачі: топологія мережі в $GNS 3$ (див. рис. 2). Порядок обміну інформацією між центральним відділом компанії №2 та її філіалами представлена пунктирними лініями.

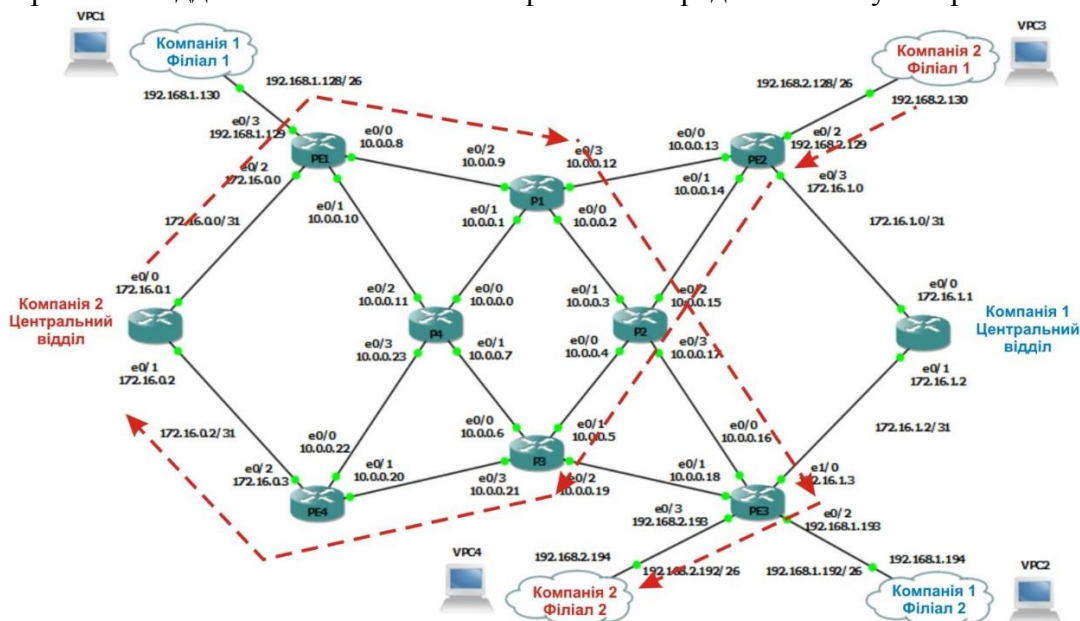
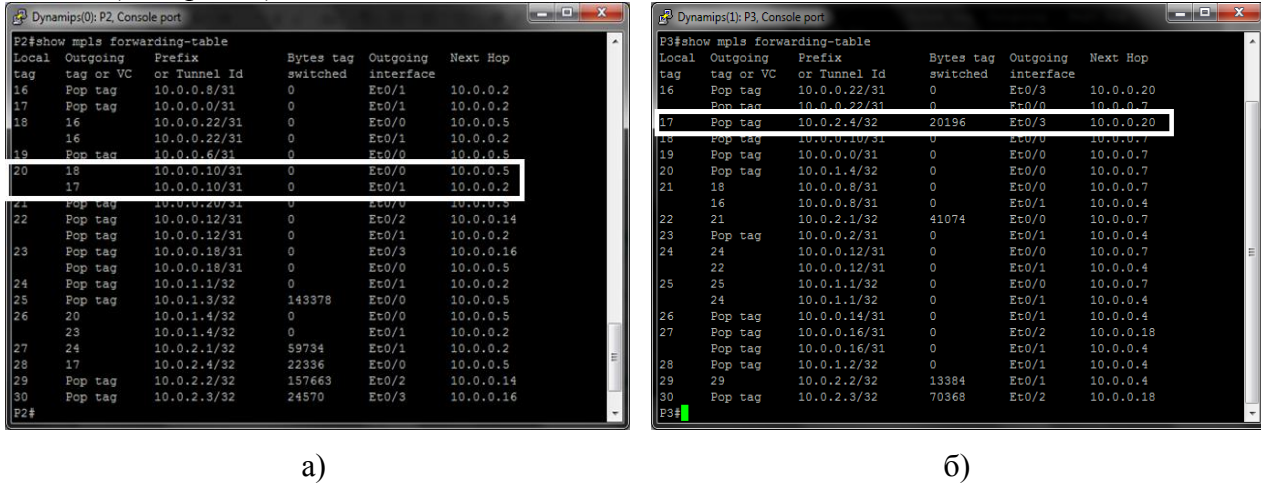


Рисунок 2 – Варіант побудови транспортної мережі постачальника послуг для двох компаній

Проведемо порівняльний аналіз роботи активного обладнання у випадку застосування IP-маршрутизації та MPLS технології [6]. В зв'язку з тим що, заповнення та ведення таблиці маршрутизації та таблиці просування є доволі складний та ресурсоемний процес, використаємо GNS3 для конфігурації та налагодження сегменту мережі (див. рис. 2) на базі протоколу OSPF та LPD [7] - [8].

Розглянемо *LSP*-маршрут від філіялу до центрального відділу компанії №2, який включає PE2 – P2 – P3 – PE4.

В результаті моделювання отримуємо наступні таблиці просування для *LSP* під номером P2 та P3 (див. рис. 3), які мають по 15 записів.



а)

б)

Рисунок 3 – Таблиця просування:
а) P2; б) P3

А також, таблицю просування (див. рис. 4) вихідного пограничного маршрутизатора *LER* під номером PE4.

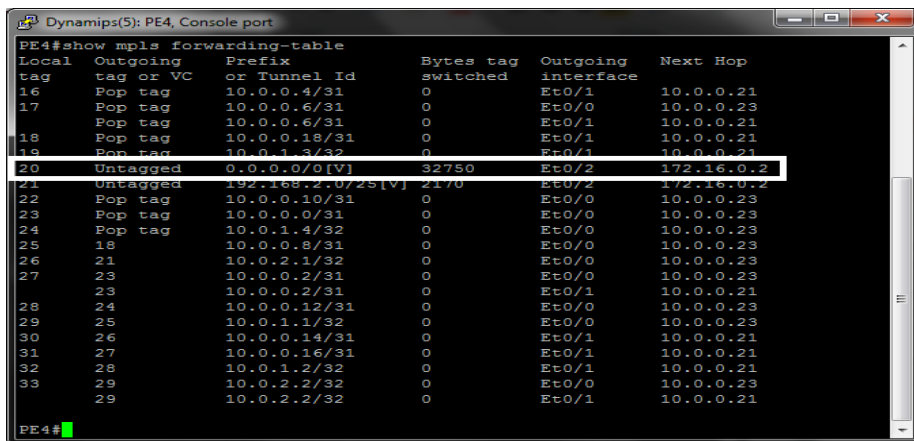


Рисунок 4 – Таблиця просування вихідного пограничного маршрутизатора PE4

Згідно представлених таблиць просування можна зробити висновок, що всього IP-підмереж які використовуються 20 (колонка *Prefix*). Тобто, записів в таблиці маршрутизації на кожному IP-маршрутизаторі буде також, як мінімум 20.

Використаємо підходи щодо розробки бітових моделей [9] і отримані бітові моделі окремих типів активного мережевого обладнання та проведемо порівняльну оцінку для всього шляху передачі інформації (PE2 – P2 – P3 – PE4):

При IP-маршрутизації на кожному маршрутизаторі:

- перевірка контрольної $KS = 16$ біт *NOTAND* 16 біт = 16 *NOTAND* операцій;
- коректування часу життя пакету $TTL_{IP} = 8$ біт *OR* одиниця = 8 *OR* операцій;
- пошук не специфічного маршруту $NSR = IP_{отримувача} \text{ AND } M_i = (32 \text{ біт AND } 32 \text{ біт}) \times 20$ записів (полів) = 640 *AND* операцій.

Загальна сума елементарних операцій на одному маршрутизаторі в середньому складає $Q_{BIP} = KS + TTL_{IP} + NSP = 664$ елементарних операцій.

Загальна сума елементарних операцій на даному маршруті складає $(KS + TTL_{IP} + NSR)$ x кількість IP-маршрутизаторів в шляху = 2656 елементарних операцій.

При використанні MPLS технології:

а) на пограничних маршрутизаторах LER (PE2, PE4) тіж самі дії, тобто $(KS + TTL_{ip} + NSR) = 664$ елементарних операцій. Операцією призначення MPLS-заголовку знехтуємо.

б) на LSR-комутаторах (P2, P3):

- коректування часу життя мітки TTLLabel = 8 біт OR одиниця = 8 OR операцій;
- знаходження значення вихідної мітки в таблиці просування (20 біт AND 20 біт) x15 записів (полів) = 300 AND операцій;
- перевірка признаку стеку міток Bottom of Stack = 1 біт AND одиниця = 1 AND операція.

Загальна сума елементарних операцій на одному LSR складає $Q_{BL} = TTL_{Label} + LV_{вих.} + Bottom\ of\ Stack = 309$ елементарних операцій.

Загальна сума елементарних операцій на даному маршруті складає $(KS + TTL_{IP} + NSR)$ x кількість LER в шляху + $(TTL_{Label} + LV_{вих.} + Bottom\ of\ Stack)$ x кількість LSR в шляху = $664 \times 2 + 309 \times 2 = 1328 + 618 = 1946$ елементарних операцій.

Також необхідно відмітити, що при використанні розроблених комплексних аналітичних моделей можна провести узагальнену порівняльну оцінку ефективності роботи активного обладнання по технології IP та MPLS, при допущенні приблизно однакового часу t виконання логічних функцій ($t_{AND} = t_{NOTAND} = t_{OR}$) мікропроцесором активного мережевого обладнання. Для цього застосуємо наступні розрахункові формули:

$$Q_{IP} = (24 + 32L_{IP}) \cdot D,$$

де 24 – $(KS + TTL_{IP} = 8OR + 16NOTAND)$ елементарних логічних операцій; 32 – $(NSP = 32AND)$ логічних операцій; L_{IP} – кількість ліній зв'язку (ребер графа) IP-мережі в цілому; D – діаметр мережі (графа).

$$Q_{MPLS} = (24 + 32L_{IP}) \times 2 + (9 + 20L_{MPLS}) \cdot (D - 2),$$

де $(24 + 32L) \times 2$ – кількість елементарних логічних операцій щодо обробки пакетів на двох граничних LER; $(9 + 20L) \cdot (D - 2)$ – кількість елементарних логічних операцій в MPLS-домені; L_{MPLS} – кількість ліній зв'язку (ребер графа) в MPLS-домені. При виконанні умови $D > 2$, тобто існує хоча б один транзит.

На основі вище приведених розрахункових формул проведемо порівняльну характеристику операційних витрат при передачі пакетів при маршрутизації та MPLS-комутації. Зведені дані розрахунків, в залежності від розмірності та топології мережі при використанні одностипного обладнання приведенні в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків на основі комплексних аналітичних моделей для оцінки IP/MPLS в залежності від розмірності та топології мережі

№ з/п	Діаметр мережі, D	Кількість ліній зв'язку, L_{IP}	Кількість ліній зв'язку, L_{MPLS}	Q_{IP}	Q_{MPLS}	Середній час виконання ЛО $t_{ло}$ сек. (200 ГГц)	Загальний час обробки IP-пакету T_{IP}	Загальний час MPLS-кадру T_{MPLS}	$\Delta = T_{IP} - T_{MPLS} $
1.	4	20	15	2656	1946	0,000001831	0,00487	0,00356	0,00130
2.	10	50	40	16240	9720	0,000001831	0,02975	0,01781	0,01194
3.	20	100	80	64480	35410	0,000001831	0,11812	0,06487	0,05325
4.	30	150	120	144720	77100	0,000001831	0,26510	0,14123	0,12387
5.	40	200	160	256960	134790	0,000001831	0,47071	0,24691	0,22380
6.	50	250	200	401200	208480	0,000001831	0,73493	0,38190	0,35303

Згідно проведеного аналізу можна зробити висновок, що кількість елементарних операцій в випадку застосування MPLS-технології зменшилась приблизно на 50% при кількості транзитних вузлів більше 30 та 150 ліній зв'язку. Це наглядно демонструє отриманий графік (див. рис. 5).

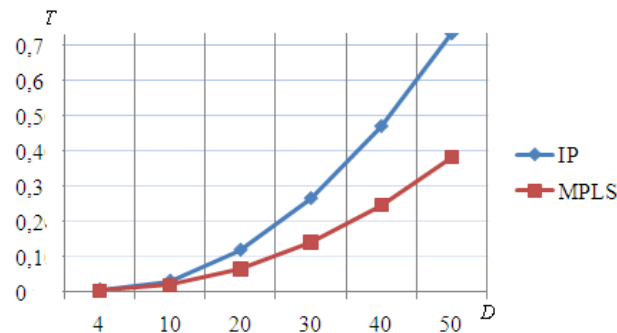


Рисунок 5 – Залежність часу на обробку пакету T від діаметру мережі D

Висновки. Використання комплексних аналітичних моделей, які розроблені з врахуванням обов'язкових операцій щодо обробки повідомлень в процесі передачі дозволяє кількісно оцінити величину ефекту від впровадження технології MPLS над IP-маршрутизацією. Це пояснюється тим, що за рахунок зменшення операцій при обробці міток у випадку перегляду таблиць просування (MPLS) в порівнянні з обробкою пакетів та переглядом таблиць маршрутизації (IP-маршрутизація) збільшується швидкість просування пакетів [10] - [11].

У перспективах подальших досліджень, планується розробити аналітичну модель, яка буде враховувати обробку службових повідомлень в процесі роботи сигнальних протоколів та їх вплив на загальну пропускну спроможність транспортних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. Али, та А.В. Симоненко, Поточковая модель динамической балансировки очередей в MPLS-сети с поддержкой traffic engineering queues, *Проблемы телекоммуникаций*, № 1, с. 59 – 67, 2010.
- [2] Л. Бараш, Виртуальные частные сети на базе MPLS, *Компьютерное Обозрение*, № 17, с. 14 – 16, 2004.
- [3] А.Б. Гольдштейн, та Б.С. Гольдштейн, *Технология и протоколы MPLS*. Санкт-Петербург: СПб. : БХВ, 2005.
- [4] В. Олвейн, *Структура и реализация современной технологии MPLS. Руководство Cisco*. Москва: издательский дом „Вильямс”, 2004.
- [5] E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon, *Multiprotocol Label Switching Architecture*, RFC 3031, 2001. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc3031> Accessed on: May 20, 2017.
- [6] В. Олифер, та Н. Олифер Искусство оптимизации трафика, *Журнал сетевых решений LAN*, № 12, с. 21 – 26, 2001.
- [7] Т. Томас, *Структура и реализация сетей на основе протокола OSPF. Руководство Cisco*. Москва: издательский дом „Вильямс”, 2004.
- [8] Cisco Systems: документація [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.cisco.com/cisco/web/psa/default.html?mode=tech&level0=268435750>. Дата звернення: Бер. 23, 2017.
- [9] А. Ахо, Дж. Хопкрофт, та Дж. Ульман, *Построение и анализ вычислительных алгоритмов*, Ю.В. Матиясевича, Ред. Москва: Мир, 1979.
- [10] Н.В. Будылдина, Д.С. Трибунский, та В.П. Шувалов, *Оптимизация сетей с многопротокольной коммутацией по меткам*. Москва: Горячая линия – Телеком, 2010.
- [11] Д. Вудс, MPLS: новый регулировщик движения на сетевых магистралях, *Сети и Системы Связи*, № 12, с. 10 –18, 2000.

Стаття надійшла до редакції 26 березня 2017 року.

REFERENCE

- [1] S. Ali, and A.V. Simonenko, Flow model of dynamic queue balancing in MPLS network with support for traffic engineering queues, *Telecommunications problems*, iss. 1, pp. 59 - 67, 2010.
- [2] L. Barash, Virtual private networks based on MPLS, *Computer Review*, iss. 17, pp. 14 - 16, 2004.
- [3] A.B. Goldstein, and B.S. Goldstein, *Technology and MPLS protocols*. St. Petersburg: St. Petersburg. :BHV, 2005.
- [4] V. Olwain, *Structure and implementation of modern MPLS technology. Cisco management*. Moscow: Williams Publishing House, 2004.
- [5] E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon, *Multiprotocol Label Switching Architecture*, RFC 3031, 2001. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc3031>. Accessed on: May 20, 2017.
- [6] V. Olifer, N. N. Olifer The art of traffic optimization, *LAN Network Solutions Magazine*, iss. 12, p.p. 21 - 26, 2001.
- [7] T. Thomas, *Structure and implementation of networks based on the OSPF protocol. Cisco management*. Moscow: Williams Publishing House, 2004.
- [8] Cisco Systems: Documentation [Online]. Available: <http://www.cisco.com/cisco/web/psa/default.html?mode=tech&level0=268435750>. Accessed on: May 23, 2017.
- [9] A. Akho, J. Hopcroft, and .J. Ullman, *Construction and analysis of computational algorithms*, Yu.V. Matiyasevich, Ed. Moscow: The World, 1979.
- [10] N.V. Budyldina, D.S. Tribunsky, and V.P. Shuvalov, *Optimization of networks with multiprotocol commutation by labels*. Moscow: Hotline - Telecom, 2010.
- [11] D. Woods, MPLS: A New Traffic Controller on Network Highways, *Networks and Communication Systems*, iss. 12, pp. 10 -18, 2000.

НИКОЛАЙ НЕСТЕРЕНКО

КОМПЛЕКСНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАСПОРТНЫХ СЕТЕЙ IP / MPLS

В данной работе проводилась оценка эффективности сетевых технологий IP / MPLS, применяемых в качестве базовых при развертывании современных транспортных сетей. Основные требования, предъявляемые к технологиям магистральной компоненты являются: высокая пропускная способность, незначительное значение задержки сообщений и ее масштабируемость. Внедрение современных сетевых технологий, таких, как MPLS требует достаточно больших материально-технических затрат на ее развертывание и проведение предварительной оценки величины эффекта в зависимости от области ее применения. В свою очередь использование только IP-сетей не позволяет: обеспечить гибкое, рациональное распределения информационных потоков; выполнять все нормативные значения параметров качества обслуживания для мультимедийного трафика; реализовать быструю и адаптивную смену маршрутов передачи информации в случае перегрузок в сети. Для обоснования выбора предложенных технологии стоит задача создания адекватных моделей, позволяющих количественно оценить величину выигрыша во времени при обработке сообщений, в зависимости от размерности сети и учитывают особенности работы активного сетевого оборудования при MPLS-коммутации и IP-маршрутизации. Для оценки качества обслуживания сообщений в пакетных сетях был использован метод имитационного моделирования, булева алгебра и битовые модели. В результате был проведен анализ порядка и скорости обслуживания пакетов сетях IP/MPLS на базе имитационной модели сегмента корпоративной сети и разработаны комплексные аналитические модели, учитывающие особенности работы сетевых протоколов, функционирования активного оборудования сети. Полученные комплексные аналитические модели могут быть использованы для оценки эффективности технологий IP/MPLS в зависимости от размерности и топологии сети.

Ключевые слова: MPLS, протоколы маршрутизации, протокол сигнализации, эмуляция сетевых активных элементов, таблица продвижения, битовые модели.

MYKOLA NESTERENKO

COMPLEX ANALYTICAL MODELS FOR EVALUATING THE EFFICIENCY OF TRANSPORT NETWORKS IP / MPLS

In this paper conducted evaluating of the effectiveness of networking IP / MPLS, used as a base when deploying modern transport networks. The main requirements that apply to the technology backbone components are: high capacity, a slight delay value message and its scalability. The introduction of modern network technologies such as MPLS requires a sufficiently large logistical cost for its deployment and a prior assessment of the magnitude of the effect, depending on the area of its application. IP-networks only usage does not allow: to provide a flexible, rational distribution of information flows; performance of standardized values of service quality parameters for multimedia traffic; implement a fast and adaptive change of information transmission routes in the event of overloads in the network. In order to substantiate the choice of the proposed technology, the task of creating adequate models that allow quantifying the value of the gain over time in the processing of messages, depending on the size of the network and taking into account the peculiarities of the work of active network equipment with MPLS-switching and IP-routing. To evaluate the quality of message service in packet networks, the simulation model, boolean algebra and bit models were used. As a result, an analysis of the order and speed of packet service on the IP/MPLS networks was performed based on the simulation model of the corporate network segment. Also integrated analytical models were developed which take into account the peculiarities of network protocols and the operation of the active network equipment. The resulting integrated analytical models can be used to evaluate the effectiveness of IP/MPLS technologies depending on the dimension and network topology.

Keywords: MPLS, routing protocols, signaling protocol, emulation of network active elements, forwarding table, bit models.

Микола Миколайович Нестеренко, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних інформаційних технологій, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ, Україна.

E-mail: nesterenko_nik@ukr.net.

Николай Николаевич Нестеренко, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных информационных технологий, Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев, Украина.

Mykola Nesterenko, candidate of technical sciences, assistant professor, assistant professor at the computer information technology academic department, Military institute of telecommunications and informatization, Kyiv, Ukraine.

UDC 623.61:621.391

YEVHEN RYZHOV,
LEV SAKOVYCH

MINIMIZATION MEASUREMENT REQUIREMENTS FOR MAINTENANCE AND REPAIR SPECIAL COMMUNICATION MEANS

In the article describes the approach of determining the minimum required value of probability of a correct assessment of the measurement results for conventional algorithm arbitrary shape. Notice that the sequence and order of measurement parameters during metrological or maintenance service

© Y. Ryzhov, L. Sakovych, 2017