

УДК 621.39; 004.724

О.І. Романов, С.П. Пасько

ОЦІНКА ЧАСУ ЗАТРИМКИ В МЕРЕЖАХ IP І MPLS ПРИ ОБСЛУГОВУВАННІ ПОВІДОМЛЕНЬ У СКЛАДНИХ БАГАТОТРАНЗИТНИХ НАПРЯМКАХ ЗВ'ЯЗКУ

We propose the analytical model of the guaranteed packets transfer in the IP/MPLS networks, aimed at finding the ways of accelerating the packet transmission via the transport network. We also estimate the effectiveness of IP and MPLS technologies by the network's time delay in the process of packets transmit along the complex composite way. The size packet delay is calculated as a sum of delays on the complex way. A number of transit nodes, communication length expressed in a number of packets, and network congestion serve as variable parameters. Thus the model is simple and can be utilized for preliminary calculations. The results are similar to real networks. Moreover, it provides the precise criteria of reasonable limits for using IP and MPLS stacks.

Вступ

Технологія MPLS дає змогу підвищити швидкість обробки пакетів порівняно з технологією IP за рахунок заміни процесу маршрутизації пакетів на процес комутації при проходженні даних через магістральну мережу провайдера. Це досягається створенням LSP-тунелів між граничними маршрутизаторами магістральної мережі, де процес обробки пакетів і аналіз адресної інформації здійснюються з використанням спеціальних міток [1].

Якщо не враховувати додаткові часові витрати на формування тунелів, то технологія MPLS завжди буде переважати технологію IP з погляду часу затримки пакетів у тракці передачі. Однак у реальних умовах експлуатації, перш ніж розпочати процес обміну інформацією між джерелами й споживачами інформації, необхідно сформувати тунель, що відповідає заданим вимогам до якості обслуговування [2]. Це вимагає певних обчислювальних і часових затрат. У загальному випадку, по сформованому тунелю може бути передано не одне, а кілька повідомлень. Використання одного тунелю різними видами повідомлень можливе у випадку, якщо в них збігаються вимоги до всіх показників якості обслуговування [3].

Руйнування тунелів відбувається, якщо протягом певного часу відсутні пакети з необхідною міткою або надходить відповідний сигнал на звільнення ресурсів, задіяних тунелем. У статті пропонується розглянути "найгірший" для MPLS випадок, за якого обміну інформацією між кінцевими пунктами завжди передують процес створення тунелю, а по закінченні інформаційного обміну тунель завжди підлягає руйнуванню (рекомендації IETF по MPLS [4]).

Постановка задачі

Мета дослідження – оцінити час затримки в мережах IP і MPLS при обслуговуванні повідомлень у складних багатотранзитних напрямках зв'язку; визначити сферу раціонального використання тієї чи іншої технології залежно від обсягу повідомлень (пакетів), кількості транзитних вузлів, завантаженості мережі.

Вихідні дані

Порівняльну оцінку ефективності технологій MPLS і IP пропонується провести за сумарним часом обробки пакетів на всіх вузлах тракту передачі. Як критерій переваги тієї чи іншої технології використовується різниця часу доставки Δt повідомлення в мережах MPLS ($T_{\text{дост MPLS}}$) і IP ($T_{\text{дост IP}}$):

$$\Delta t = T_{\text{дост MPLS}} - T_{\text{дост IP}}$$

На ділянках мережі, де $\Delta t > 0$, доцільно використовувати протокол IP, а там, де $\Delta t < 0$, доцільнішою буде технологія MPLS.

У процесі вирішення завдання передбачається використовувати ряд допущень:

- продуктивність вузлів і ліній на всіх ділянках мережі однакова й не залежить від часу;
- довжина пакета не залежить від типу й виду переданої інформації і є сталою величиною;
- незалежно від використовуваної технології пакети одного повідомлення передаються по шляхах, що мають однакову довжину й параметри обслуговування.

Для більшої наочності уточнимо алгоритми роботи IP і MPLS на прикладі мережі, наведеної на рис. 1.

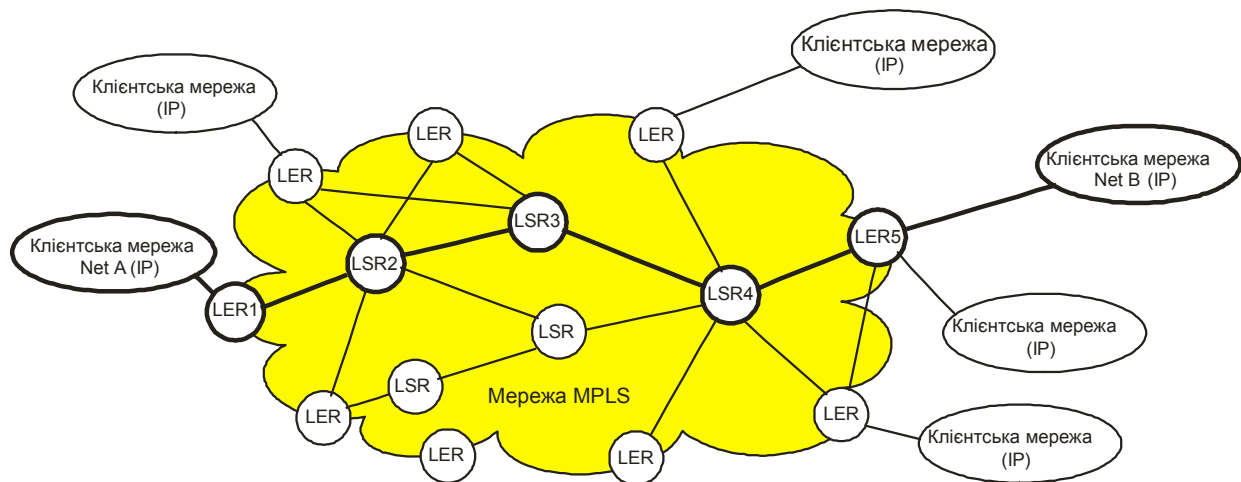


Рис. 1. Приклад MPLS-мережі: **LER** – граничний маршрутизатор MPLS; **LSR** – внутрішній маршрутизатор MPLS; **○** – лінії і вузли, які беруть участь у передачі повідомлення

При виконанні розрахунків для реальних телекомунікаційних мереж необхідно здійснити прив'язку до структури мережі, врахувати конкретні характеристики вузлів і ліній зв'язку, зібрати статистичні дані про кількість абонентів і коливання навантаження в напрямках зв'язку, типи інформаційних потоків, сумарні обсяги навантаження і якість обслуговування на елементах мережі.

Процес обслуговування заявок по TE-тунелях

Процес передачі інформації з використанням технології MPLS характерний тим, що обслуговування кожної заявки починається з формування тунелю. При цьому, якщо тунель уже існує, то здійснюється корекція його параметрів з метою забезпечення заданої якості обслуговування. При цьому може відбутися відмова у встановленні тунелю, а відповідно – й обслуговування, якщо користувач не має достатніх прав або відсутні ресурси в необхідному обсязі.

Формування тунелю відбувається в три етапи:

- 1) на основі стандартних протоколів маршрутизації будується матриця маршрутів;
- 2) в необхідному напрямку зв'язку створюється звичайний LSP-тунель без врахування обмежень на показники якості обслуговування;
- 3) на основі LSP-тунелю створюється RSVP-TE-тунель, який закріплює необхідний мережевий ресурс, що забезпечує задані вимоги до якості обслуговування.

Можливі три методи передачі інформації: FE, SE і багатоадресна передача по дереву MPLS. Метод FE передбачає передачу по тунелю пакетів тільки від одного користувача. При цьому якщо повідомлення від користувача відсутні, то тунель простоює. Метод SE допускає передачу інформації з тунелю від групи користувачів. При цьому користувачі повинні мати однакові вимоги до якості обслуговування, а їх кількість має відповідати обсягу наданого ресурсу. Третій, багатоадресний, метод передачі по дереву MPLS поки не знайшов своєї практичної реалізації.

Перший етап. Основним завданням цього етапу є формування матриць маршрутів на основі стандартних протоколів маршрутизації OSPF; IS-IS; BGP. Сформовані на основі одного із протоколів матриці маршрутів надалі є вихідними даними для формування тунелів.

Другий етап. На цьому етапі включається спеціально розроблений для технології MPLS протокол розподілу міток LDP, який забезпечує поширення атрибутів ресурсів мережі й формує LSP-тунелі, які в загальному випадку можуть не забезпечувати задану якість обслуговування. Розподіл міток проводиться від одержувача до відправника після надходження запиту.

LER5 "знає" (має маршрут) про підключену безпосередньо до нього мережу NET B. LER5 довільно призначає для мережі NET B вхідну мітку, наприклад LABEL = X, і прописує це у свою LFIB (таблицю маршрутизації по мітках) (рис. 2, а).

LER5 "знає" (має маршрут) про підключену безпосередньо до нього мережу NET B. LER5 довільно призначає для мережі NET B вхідну мітку, наприклад LABEL = X, і прописує це у свою LFIB (таблицю маршрутизації по мітках) (рис. 2, а).

За допомогою протоколу LDP LER5 повідомляє сусідній LSR4 про призначення мітки X для мережі NET B, яку LSR4 описує у свою LFIB як вихідну для інтерфейсу (рис. 2, б).

Так триває до останнього маршрутизатора MPLS – LER1 заповнює свою LFIB записом про мережу NET B (рис. 2, в).

Процес формування LSP-тунелю із вказанням часу виконання кожної операції зображено на рис. 3.

При проведенні аналізу використовуються такі позначення:

$t_{1,2}, t_{3,2}$ – час поширення сигналу (фізичний рівень моделі OSI) між вузлами LSR, який залежить від швидкодії модуляторів/демодуляторів, фізичного носія, довжини шляху тощо;

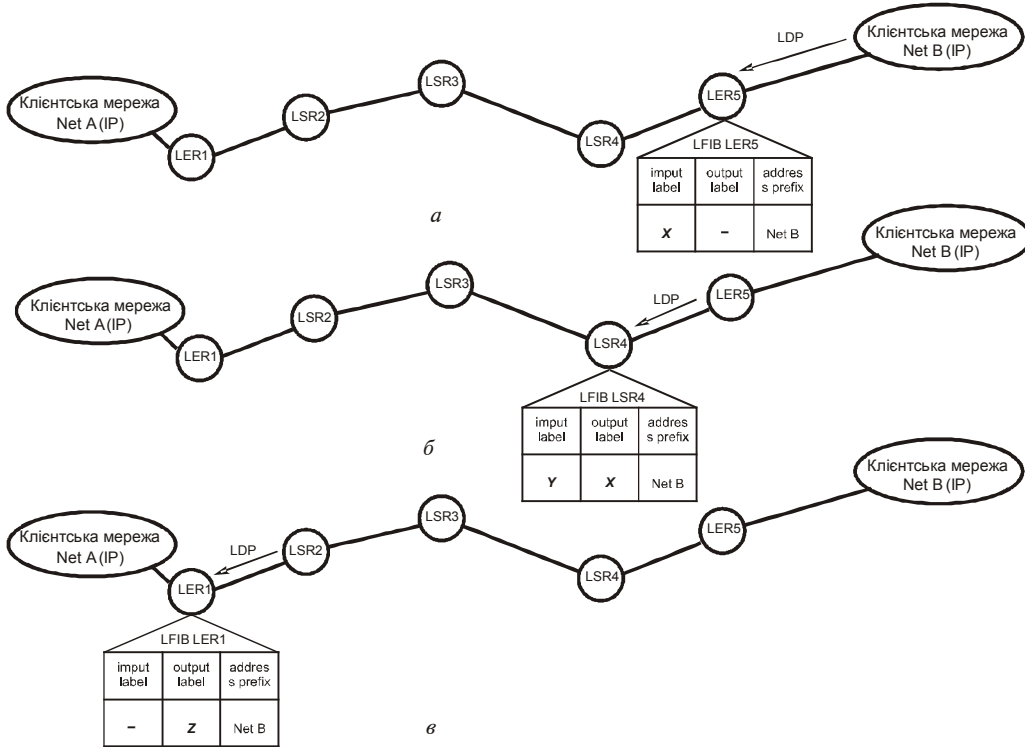


Рис. 2. Процес розподілу міток LDP: а – на LER5; б – на LSR4; в – на LER1

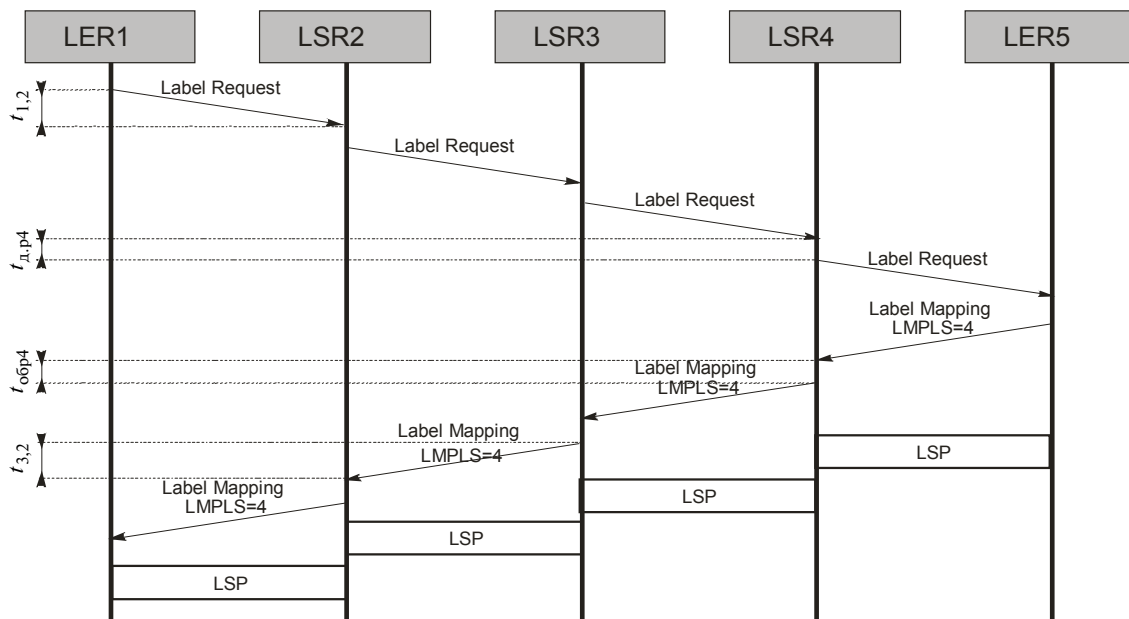


Рис. 3. Процес формування LSP-тунелю

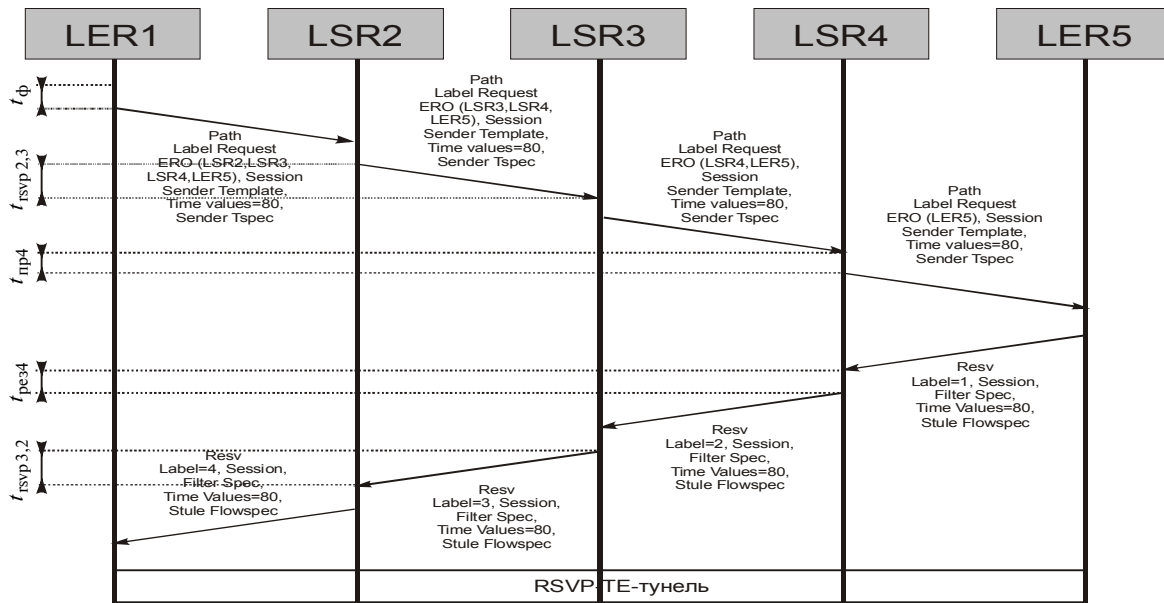


Рис. 4. Процес формування RSVP-TE-тунелю

$t_{д,р4}$ – час на обробку пакета в маршрутизаторі в дейтаграмному режимі (ДР) (залежить від швидкодії процесорів маршрутизаторів, їх завантаженості, розмірів таблиці маршрутизації тощо);

$t_{обр4}$ – час аналізу й заміни мітки в маршрутизаторі, який покладемо рівним $t_{д,р4}$.

Тоді загальний час установлення LSP-тунелю буде рівний

$$t_{LSP}(N) = 2 \sum_{i=1}^{N-1} t_{i,i+1} + \sum_{i=1}^{N-1} t_{д,рi} + \sum_{i=2}^N t_{обрi}$$

де N – кількість вузлів у LSP-тунелі.

Час передачі $t_{i,i+1}$ туди й назад практично однаковий, тому що довжина повідомлення не змінюється і становить 32×5 біт, де $t_{i,i+1}$ дорівнює відношенню довжини повідомлення до пропускної здатності лінії.

Третій етап. На основі LSP-тунелю створюється RSVP-TE-тунель. Для визначеності аналізу покладемо, що шлях проходження пакетів задається в явному вигляді. Це дає змогу робити автоматичну ремаршрутизацію в обхід аварійних ділянок, перевантажених областей і “вузьких” місць мережі. Розподіл міток буде здійснюватися від одержувача до відправника повідомлення. Алгоритм розподілу міток подано на рис. 4.

Будемо використовувати такі позначення: $t_{rsvp\ 2,3}, t_{rsvp\ 3,2}$ – аналогічно $t_{1,2}, t_{3,2}$ 2-го етапу;

t_{ϕ} – час, необхідний для формування запиту Path, списку явно заданих маршрутизаторів ERO (фіксований шлях з маршрутизаторів);

t_{pp4} – час на просування Path, модернізацію ERO;

t_{pez4} – час, який витрачається на аналіз прав і резервування ресурсів.

Тоді загальний час встановлення тунелю RSVP-TE буде рівний

$$t_{RSVP-TE}(N) = t_{\phi} + \sum_{i=1}^{N-1} t_{RSVPi,i+1} + \sum_{i=2}^N t_{RSVPi,i-1} + \sum_{i=2}^N t_{pez_i} + \sum_{i=2}^{N-1} t_{pp_i}$$

де N – кількість вузлів у RSVP-TE (LSP).

Час доставки в мережі MPLS одного IP-пакета по RSVP-TE-тунелю

Розглянемо процес комутації пакетів у MPLS-мережі. Припустимо, LSR A одержує пакет, адресований мережі NET B. LER1 вивчає свою LFIB і знаходить там запис із NET B і відповідній їй мітку Z_p (з резервуванням) і вихідний інтерфейс. До отриманого пакета додається мітка Z_p , пакет відправляється далі через відповідний інтерфейс і так далі по ланцюжку (рис. 5, а).

Наприклад, LSR4 одержує пакет з міткою Y_p на певному інтерфейсі. По своїй LFIB

LSR4 з'ясовує, через який інтерфейс і з якою міткою (X_p) необхідно просувати пакет далі, й виконує необхідну заміну мітки. На цьому етапі заголовки мережевого рівня не аналізуються – відбувається комутація по мітці (рис. 5, б). Це дає змогу зменшити час обробки пакета в маршрутизаторі.

Нарешті, LER5 одержує пакет з міткою X_p на вхідному інтерфейсі. LER5 витягає мітку з пакета й відправляє його в мережу призначення як звичайний IP-пакет (рис. 5, в).

Процес передачі із вказанням часу виконання кожної операції відображено на рис. 6, де t_{FEC} – час, який витрачається на визначення приналежності IP-пакета до певного класу FEC і створення мітки MPLS; $t_{зм3}$ – час, який витрачається на заміну мітки в маршрутизаторі; $t_{MPLS\ 4,5}$ – час просування пакета між двома вузлами мережі.

Тоді час перебування в мережі MPLS одного IP-пакета з урахуванням часу встановлення RSVP-TE-тунелю буде рівний

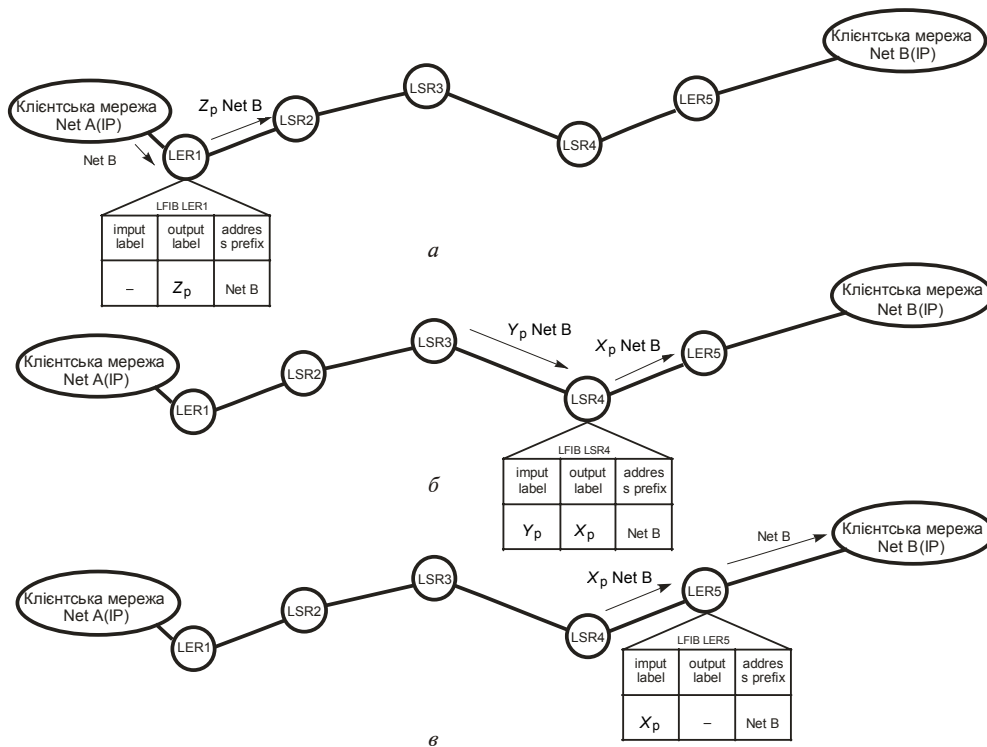


Рис. 5. Процес комутації пакетів у MPLS-мережі: а – на LER1; б – на LSR4; в – на LER5

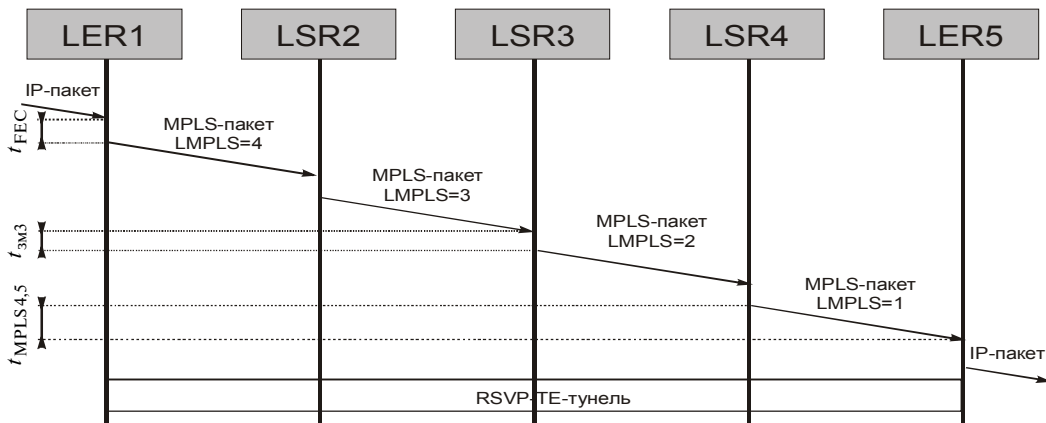


Рис. 6. Процес передачі одного IP-пакета по RSVP-TE-тунелю

$$t_{п-м}(N) = t_{LSP}(N) + t_{RSVP-TE}(N) + \sum_{i=1}^{N-1} t_{MPLS_{i,i+1}} + \sum_{i=2}^N t_{зми} + \alpha t_{FEC},$$

де α – кількість заміни мітки для присвоєння класу по шляху руху.

Врахування одночасної обробки пакетів одного повідомлення в гілках мережі (приклад)

Зобразимо ланцюг з 5 вузлів. Пакети входять в перший вузол і виходять із останнього (ланцюг – транзитний). Пакети одного потоку рухаються один за одним без розривів (розкиду в часі). Вважатимемо, що в гілках мережі час передачі пакетів рівний нулю, а затримку, яка виникає при передачі, зумовлюють маршрутизатори. Позначимо величину затримки на одному маршрутизаторі t_1 .

Час затримки одного пакета, за умови, що на шляху передачі інформації 5 транзитних вузлів, визначається в такий спосіб.

Для одного пакета час затримки становить $T_1 = 5t_1 = nt_1$, де n – кількість вузлів у ланцюгу (рис. 7, а).

Для двох пакетів час затримки становить $T_2 = 5t_1 + t_1 = (n + 1)t_1$ (рис. 7, б).

Для трьох пакетів час затримки становить $T_3 = 5t_1 + 2t_1 = (n + 2)t_1$ (рис. 7, в).

Узагальнимо: для K пакетів час затримки рівний $T_K = nt_1 + (K - 1)t_1$, де nt_1 – час, необхідний для передачі одного пакета по ланцюгу з n вузлів.

Оцінка часу доставки в MPLS-мережі K пакетів при використанні протоколу IP по RSVP-TE-тунелю (метод FE)

Загальний час доставки K пакетів у MPLS-мережі при використанні RSVP-TE-

тунелю й методу FE дорівнює сумі часу встановлення спочатку LSP-, потім RSVP-тунелів, часу передачі пакетів:

$$t_{Kп-м}(N, K) = t_{LSP}(N) + t_{RSVP-TE}(N) + \left(\sum_{i=1}^{N-1} t_{MPLS_{i,i+1}} + \sum_{i=2}^N t_{зми} + \alpha t_{FEC} \right) + (K - 1)t_{зм},$$

де $(K - 1)t_{зм}$ – компонент, що враховує одночасне обслуговування пакетів на різних ділянках мережі.

Врахування нерівномірності надходження навантаження

У зв'язку з тим, що процес надходження навантаження в мережу обумовлюється випадковим законом, то в певні моменти часу ресурс мережі простоює, а в інші – на маршрутизаторах виникають черги. Це призводить до появи додаткової складової часу затримки. Кожний маршрутизатор можна описати за допомогою вхідного λ і вихідного μ потоків. Чим більше λ і чим менше μ , тим довша черга і тим більший час затримки повідомлення в мережі. Завантаження вузла можна оцінити відношенням $\rho = \lambda/\mu$. За відомими значеннями ρ можна побудувати функцію $\chi(\rho)$, яка визначить однозначну відповідність між параметрами навантаження, інтенсивністю обслуговування і часом затримки повідомлення в системі.

Фізичний зміст функції $\chi(\rho)$ полягає в тому, що при завантаженні мережі (вузла), рівному ρ , час передачі пакета збільшується в $\chi(\rho)$ раз. У простому випадку функція має вигляд

$$\chi(\rho) = 1/(1 - \rho),$$

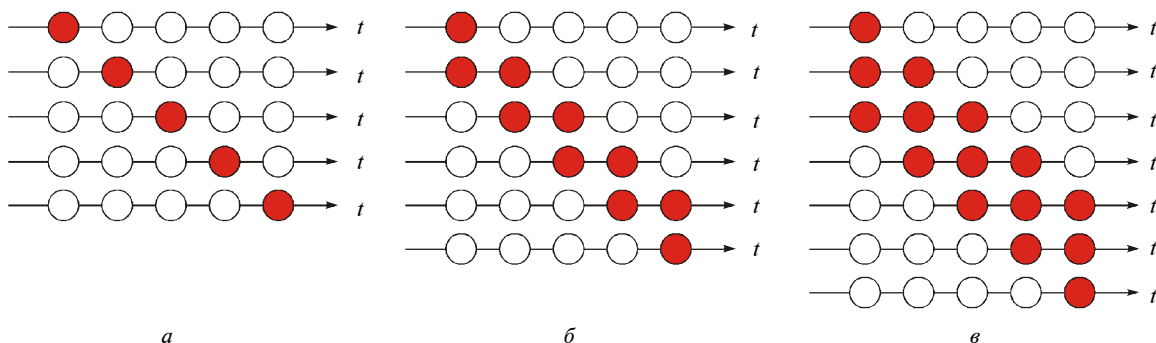


Рис. 7. Врахування одночасної обробки пакетів: а – передача 1-го пакета; б – передача 2-х пакетів (підряд); в – передача 3-х пакетів (підряд)

де ρ – завантаження маршрутизатора (лінії) (рис. 8).

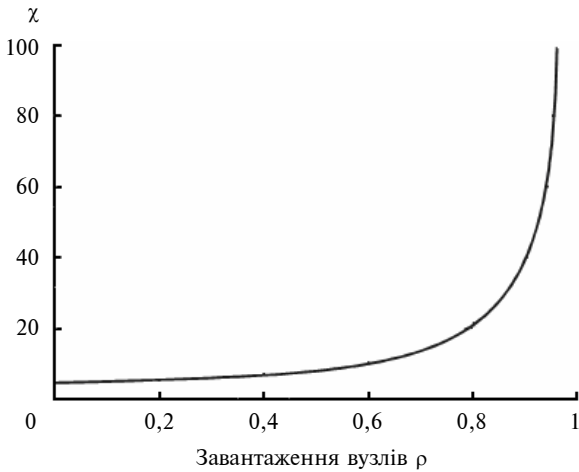


Рис. 8. Графік функції $\chi(\rho) = 1/(1 - \rho)$

При високих вимогах до точності і достовірності результатів розрахунку необхідно використовувати більш складні моделі, наприклад модель $M/M/1/K$. Саме ця функція дає можливість здійснювати прив'язку математичного апарату теорії масового обслуговування до конкретної структури мережі з використанням коректних обмежень і допущень.

У роботі використовується функція виду $\chi(\rho) = 1/(1 - \rho)$, тому що розглядається загальна методика оцінки технології без прив'язки до конкретної структури і типу мережі.

Час доставки в мережі MPLS одного IP-пакета в ДР

Процес передачі повідомлення по мережі в ДР подано на рис. 9, де $t_{\text{маршр}2}$ – час, який ви-

трачається на просування пакета в ДР; $t_{\text{IP}3,4}$ – час необхідний для передачі пакета між вузлами.

Час перебування в мережі MPLS одного IP-пакета (ДР) буде дорівнювати (без врахування ефекту черг)

$$t_{\text{п-д,р}}(N) = \sum_{i=1}^N t_{\text{маршр}i} + \sum_{i=1}^{N-1} t_{\text{IP}i,i+1}$$

Час доставки в MPLS-мережі K IP-пакетів у ДР

Для визначення часу доставки в MPLS-мережі K IP-пакетів у ДР враховуємо ефект паралельної обробки пакетів (залежить від кількості пакетів K, кількості транзитних вузлів N) і нерівномірність поступання навантаження (залежить від завантаженості мережі ρ). Тоді час перебування в MPLS-мережі K IP-пакетів у ДР становить

$$t_{K\text{п-д,р}}(N, K, \rho) = \chi(\rho) \left(\sum_{i=1}^N t_{\text{маршр}i} + \sum_{i=1}^{N-1} t_{\text{IP}i,i+1} + (K - 1)t_{\text{маршр}} \right),$$

де $\chi(\rho)$ – функція врахування ефекту черги на маршрутизаторі.

Час доставки в MPLS-мережі K IP-пакетів по RSVP-TE-тунелю (метод SE)

Метод FE досить неефективно використовує ресурси, але забезпечує максимально допустимі показники якості. По суті тут створюється однобічний віртуальний канал з одним користувачем. Канал може часто простоювати, від-

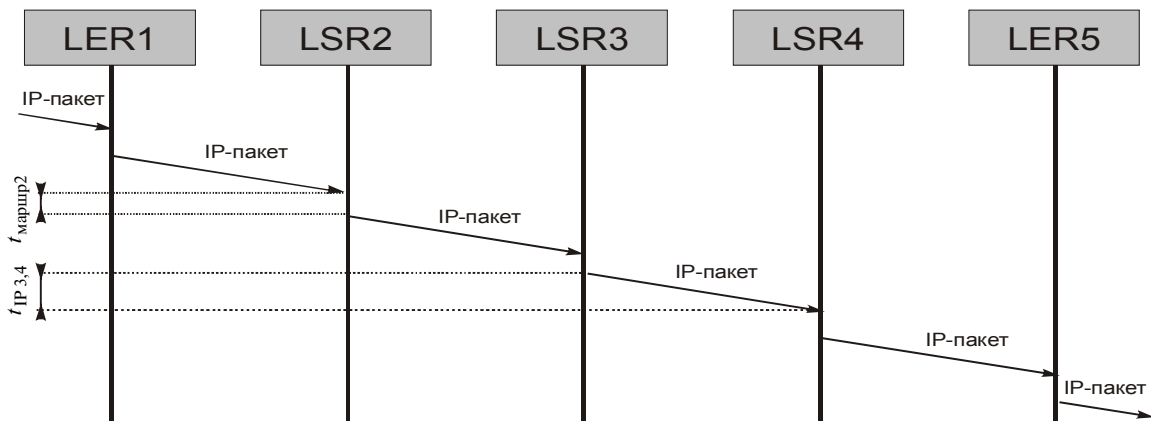


Рис. 9. Процес передачі одного IP-пакета в ДР

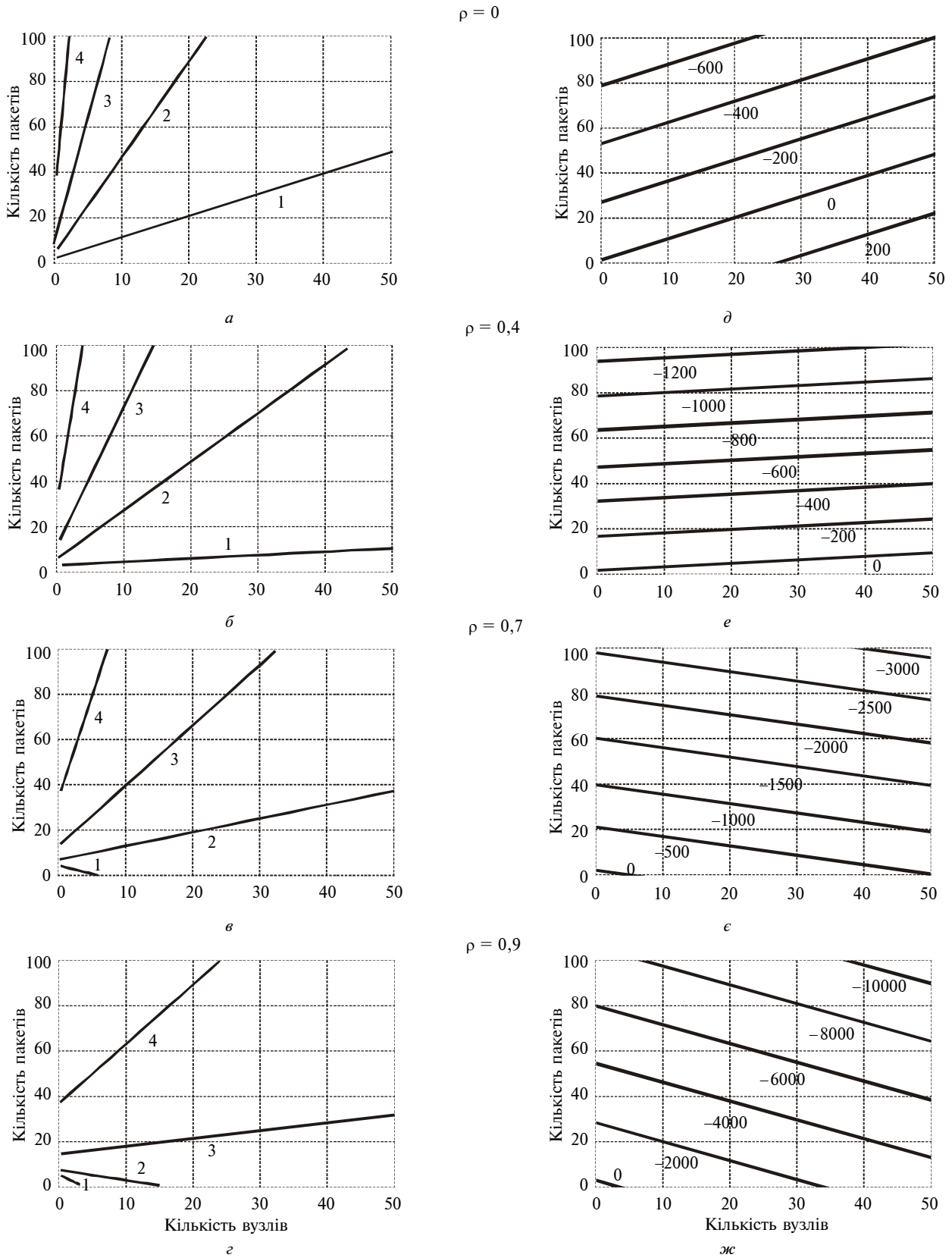


Рис. 10. Результати моделювання: а, б, в, з – $T_{\text{дост IP}}/T_{\text{дост MPLS}}$; д, е, е, ж – $T_{\text{дост MPLS}} - T_{\text{дост IP}}$

повідно, для користувачів він порівняно дорогий.

Метод SE відрізняється від попереднього тим, що віртуальним каналом можуть користуватися відразу кілька користувачів.

Тоді час перебування в мережі MPLS-мережі K IP-пакетів становитиме (метод SE):

$$t_{K\text{-}m}(N, K, \rho) = t_{\text{LSP}}(N) + t_{\text{RSVP-TE}}(N) + \chi(\rho) \left(\sum_{i=1}^{N-1} t_{\text{MPLS}, i, i+1} + \sum_{i=2}^N t_{\text{ЗМ}i} + (K-1)t_{\text{ЗМ}} \right).$$

Оцінка ефективності організації тунелів за критерієм часу передачі повідомлень (метод SE)

У мережах IP і MPLS робота починається з формування найкоротших маршрутів. Тому час на розв'язок завдання на даному етапі витрачається рівний для обох видів мереж. Можна вважати, що на оцінку ефективності організації тунелю він не впливає.

Для якісної оцінки часу вважатимемо, що всі пакети передаються по тій самій мережі (тобто значення N , K , швидкодія маршрутизаторів і пропускна здатність однакові), для обох випадків $\chi(\rho)$ тотожне (зазвичай це не так: в SE-тунелі значення ρ встановлюються невеликими, а при дейтаграмній передачі можуть бути істотними).

Тоді різниця в часі передачі становитиме (після спрощення)

$$\Delta t_{\text{м-д,р}}(N, K, \rho) = t_{\text{LSP-TE}}(N) + t_{\text{RSVP-TE}}(N) + \chi(\rho) \left(\left(\sum_{i=1}^{N-1} t_{\text{MPLS}, i, i+1} - \sum_{i=1}^{N-1} t_{\text{IP}, i, i+1} \right) + \left(\sum_{i=2}^N t_{\text{ЗМ}i} + \alpha t_{\text{FEC}} - \sum_{i=1}^N t_{\text{маршр}i} \right) + (K-1)(t_{\text{ЗМ}} - t_{\text{маршр}}) \right).$$

Зрозуміло, що SE-тунель доцільно організувати при $\Delta t_{\text{м-д,р}}(N, K, \rho) < 0$, а коли $\Delta t_{\text{м-д,р}}(N, K, \rho) > 0$, то більш раціонально є дейтаграмна передача.

Результати

На рис. 10, а, б, в, г показано відношення $T_{\text{дост IP}}/T_{\text{дост MPLS}}$, на рис. 10, д, е, є, ж –

різницю $T_{\text{дост MPLS}} - T_{\text{дост IP}}$ залежно від трьох параметрів (кількості транзитних вузлів N , кількості пакетів у повідомленні K і завантаженості мережі ρ). Для графічного відображення на площині покладемо, що N , K змінні, а ρ – константа.

Можна побачити, що при $\rho = 0,7; 0,9$ доцільність передачі дейтаграмним способом малої кількості пакетів на велику відстань (кількість проміжних вузлів) зникла. Це пояснюється тим, що при формуванні тунелю пакету-запиту дається найвищий пріоритет, він просувається зі швидкістю, яка не залежить від завантаження мережі, тоді як швидкість просування інформаційного пакета значною мірою залежить від завантаження. У результаті при значних завантаженнях мережі навіть невелика кількість пакетів на значну відстань буде просуватися швидше по мітках, аніж у дейтаграмному режимі.

Можна знайти критичне значення $\rho = \rho_{\text{кр}}$, при переході через яке зникає доцільність використання протоколу IP за великої кількості транзитних вузлів.

Висновки

З точки зору часу доставки повідомлення від джерела до користувача технологія MPLS завжди буде мати переваги порівняно з IP, якщо інформація передається по наперед сформованому тунелю. Якщо процес обслуговування кожної заявки починається з формування тунелю, то ефективність тієї чи іншої технології визначається довжиною шляху доставки повідомлення, яка характеризується кількістю проміжних вузлів N , обсягом повідомлення, вираженим у кількості пакетів, і завантаженнях мережі. При цьому, якщо $\rho < \rho_{\text{кр}}$, повідомлення складається з відносно невеликої кількості пакетів і при значній кількості вузлів на шляху передачі інформації доцільно використовувати технологію IP. Технологія MPLS має переваги у випадках, коли $\rho > \rho_{\text{кр}}$ і сформований тунель використовується для передачі повідомлень, які складаються з великої кількості пакетів, або для передачі групи повідомлень. При цьому виграш від використання технології MPLS тим істотніший, чим більше транзитних комутаційних центрів на шляху передачі інформації.

Використання отриманих залежностей дає можливість визначити сферу раціонального використання тієї чи іншої технології і методи зниження непродуктивного навантаження в мережі. На сьогодні важливість розв'язання цієї задачі підвищується внаслідок зростання популярності технології MPLS і поширення застосування як в магістральних, так і в локальних телекомунікаційних мережах.

У майбутньому планується подальше вдосконалення моделі доставки пакетів, а саме: врахування нерівномірності довжин пакетів залежно від типу і виду передаваної інформації; використання більш складних моделей, що відображають завантаженість гілок і вузлів мережі; застосування до розрахунків можливостей трафік-інжинірингу.

1. *Гольдштейн А.Б.* Механизм эффективного туннелирования в сети MPLS // *Вестник связи*. – 2004. – № 2. – С. 4–16.
2. *Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С.* MPLS технология и протоколы. – СПб.: БВХ, 2005. – 304 с.
3. *Романов А.И., Фигурный С.С.* Повышение эффективности функционирования и защиты информации в VPN-сетях на базе технологии MPLS // *Вісник УНДЗ*. – 2008. – № 1 – С. 17–25.
4. *Документи серії RFC (рекомендації)*, розроблені комітетом IETF по MPLS: RFC 2702, RFC 3031, RFC 3032, RFC 3033, RFC 3034, RFC 3035, RFC 3036, RFC 3037, RFC 3038, RFC 3107.

Рекомендована Радою
Інституту телекомунікаційних систем
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
9 березня 2011 року