

УДК 004.77

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.063065

**Н. В. РУДЕНКО**, канд. техн. наук, доцент;

ORCID: 0000-0001-8582-3126

**Н. С. ХАБ'ЮК**, ст. викладач;

ORCID: 0009-0005-7917-5528

**М. С. КУЛИК**, аспірант,

ORCID: 0009-0006-1510-8024

Державний університет інформаційно – комунікаційних технологій, Київ

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У ТРАНСПОРТНІЙ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ IP/MPLS

*У статті розглядається проблема стратегій управління тунелюванням у транспортній мережі на базі технології IP/MPLS з фокусом на підвищенні ефективності та оптимізації передачі даних. Пропонується використання спеціалізованої моделі для визначення та оптимізації тунельних ресурсів, спрямованої на підтримку високого рівня якості обслуговування.*

*Обґрунтовується актуальність створення моделі управління тунелюванням в контексті зростання обсягів трафіку та розширення функціональності мережі IP/MPLS. Зазначається, що традиційні методи управління можуть бути неефективними у зумовленому швидким розвитком середовищі, а використання спеціалізованої моделі є ключовим чинником для оптимального використання тунельних ресурсів.*

*Продемонстровано уявну модель управління тунелюванням, яка включає такі важливі компоненти: сегменти тунельних ресурсів, що представляють окремі аспекти мережі IP/MPLS; механізм визначення та аналізу трафіку для кожного тунельного сегменту; пріоритетність тунельного трафіку відповідно до критеріїв ефективності управління, сприяючи оптимальному розподілу ресурсів та забезпеченню найвищого рівня сервісу.*

**Ключові слова:** транспортна мережа IP/MPLS, динамічна адаптація ресурсів, ефективність управління трафіком, мультиагентний підхід, трафік, сегментація трафіку, критерії ефективності, динамічна маршрутизація.

### Вступ

Тунелювання (tunneling) або інкапсуляція (encapsulation) – це спосіб передачі корисної інформації через проміжну мережу. Такою інформацією можуть бути кадри (або пакети) іншого протоколу. При інкапсуляції кадр не передається у згенерованому вузлом-відправником вигляді, а постачається додатковим заголовком, що містить інформацію про маршрут, що дозволяє інкапсульованим пакетам проходити через проміжну мережу (Internet). В кінці тунелю кадри деінкапсулюються та передаються одержувачу. Логічний шлях пересування інкапсульованих пакетів у транзитній мережі називають тунелем. Тунелювання (або інкапсуляція) використовується не тільки для передачі інформації через проміжні мережі, а й для створення захищених віртуальних приватних мереж (VPN), забезпечення конфіденційності та інтеграції різнорідних мережевих технологій.

Тунелювання дозволяє "упаковувати" трафік одного протоколу в рамки іншого, що діє на вищому рівні абстракції, тим самим дозволяючи даним успішно пройти через мережі, які можуть не підтримувати вихідний протокол. Ця техніка є основою для створення безпечних з'єднань у небезпечних мережах, таких як Інтернет.

Процес тунелювання можна уявити як доставку листа в запечатаному конверті в межах іншого, більшого конверта, адресованого іншій поштової службі. Коли більший конверт дохо-

---

© Н. В. Руденко, Н. С. Хаб'юк, М. С. Кулик, 2024

дить до своєї цілі, він відкривається, а внутрішній конверт передається вже згідно з його адресою. Так само у тунелюванні кінцеві точки тунелю розуміють "зовнішній" заголовок і можуть маршрутизувати пакет до його кінцевої точки, ігноруючи "внутрішній" контент.

Використання тунелювання дозволяє користувачам і організаціям значно підвищити рівень захисту своїх даних в Інтернеті, забезпечити їх конфіденційність і цілісність під час передачі через публічні мережі.

### Організація управління тунелюванням у транспортній мережі на базі технології IP/MPLS

Тунельні передачі представлені на рис. 1. Всі прикордонні маршрутизатори MPLS (LER1, LER2, LER3 та LER4) використовують протокол BGP і створюють комутований за мітками тракт LSP між ними (LSP1). Ці чотири прикордонні LER будуть використовувати протокол LDP для отримання та зберігання міток від вихідного LER (LER4 у даному сценарії) аж до вхідного LER (LER1).

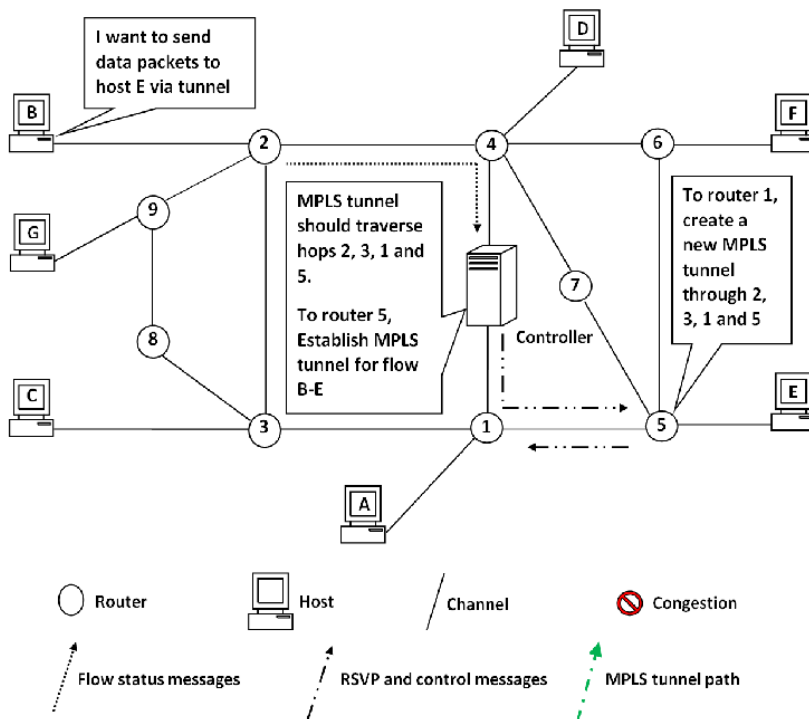


Рис. 1. Схема процесу тунелювання в MPLS

Щоб дані були передані від LER1 до LER2, вони повинні пройти через декілька (у даному випадку три) транзитних маршрутизатори LSR. Між двома LER (LER1 і LER2) створюється окремий тракт LSP (LSP2), який охоплює LSR1, LSR2 і LSR3. Він представляє собою тунель між цими двома LER. Мітки у цьому тракті відрізняються від міток, які створили LER для LSP1. Це справедливо для LER3, LER4 і для LSR, що є між ними. І тому, в останньому сегменті створюється тракт LSP3. Для досягнення цього результату при передачі пакета через два мережевих сегменти використовується концепція стека міток. Пакет

повинен слідувати через LSP1, LSP2 і LSP3, він переноситиме одночасно дві окремі мітки.

Пари, що використовуються для кожного сегменту: для першого - мітка для LSP1 та LSP2, для другого – мітка для LSP1 та LSP3. Коли пакет залишає першу мережу і приймається граничним маршрутизатором LER2, той видаляючи мітку для LSP2, замінює її на мітку для LSP3, замінюючи при цьому мітку LSP1 всередині пакету на мітку наступною пересилання. LER4 видаляє обидві мітки перед надсиланням пакета адресату.

Математична модель ефекту тунелювання в MPLS [4, 5] є мережею масового обслуговування з послідовними чергами (рис. 2).

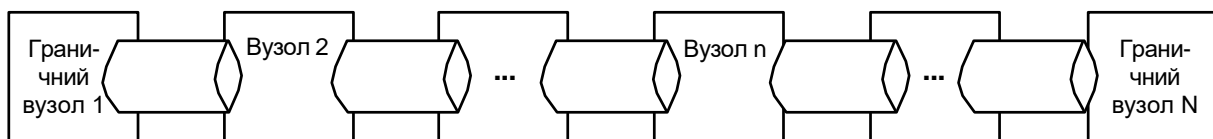


Рис. 2. Модель послідовних черг

Оцінимо параметри такі, як:

- середній час обслуговування без переривання (період зайнятості),
- середній час перебування пакету в n-му вузлі.

Пакети, які обслуговуються у період зайнятості (безперервно, без звільнення), об'єднуються у групу на виході вузла і називаються пачкою. Середня довжина такої пачки визначається кількістю пакетів. На вхід граничного вузла 1 надходить пуасонівський потік повідомлень з інтенсивністю вхідного потоку заявок  $\lambda$  та середнім часом обслуговування  $1/\mu$ .

Якщо розглядати два наступних один за іншим повідомлення на вузлі  $n$  ( $n \geq 2$ ), інтервал часу між надходженням цих двох повідомлень залежить від часу надходження та обслуговування попередніх вузлів. Повідомлення, згруповані на вузлі  $n$  ( $n \geq 2$ ), залишаються згрупованими і на наступних вузлах  $n + 1, n + 2$ .

У тунелюванні існують два явища: зчеплення пачок, що виходять від першого вузла, і фрагментація цих пачок.

Перше явище - зчеплення - відноситься не тільки до другого, але й до будь-якого не першого вузла  $n$  ( $n \neq 1$ ) і пов'язано з тим, що перший пакет  $k$ -ї пачки надходить на цьому вузлі останній пакет  $(k - 1)$ -ї пачки і обидві пачки -  $k$  та  $(k - 1)$  - відповідним чином з'єднуються (рис. 3).

Нехай в першому вузлі обслуговується пакет номер  $j$  із пачки  $k$  і в цей момент на той самий вузол надходить наступний пакет номер  $j + 1$ , час обслуговування якого перевищує час обслуговування пакету  $j$ . На наступному другому вузлі в цей момент немає черги і пакет  $j$  обслуговується, як тільки він надходить на вузол 2, пакети  $j + 1$  та  $j$  починають обслуговуватися одночасно на вузлах 1 і 2 відповідно. Коли пакет  $j$  потім залишає вузол 2, пакет  $j + 1$  все ще продовжує оброблятися на вузлі 1, оскільки його обслуговування довше.

Математичний аналіз цих двох явищ ефекту тунелювання MPLS дозволяє застосувати наступну формулу для часу перебування пакета у тунелі, що складається з  $N$  вузлів [1]:

$$T = \frac{\gamma}{\rho} (N - 1), \quad (1)$$

де  $\gamma$  - постійна Ейлера, а  $N > 2$ ;  $\rho$  - навантаження мережі,  $\rho$  - навантаження мережі.

На рис. 3 представлений маршрут MPLS-мережі, який складається з  $N$  вузлів і фізичних каналів передачі даних між ними. Маршрут визначається місцем розташування LSR<sub>i</sub> (LSR джерела), LSR<sub>n</sub> (LSR призначення) та класом обслуговування трафіку, визначеним допустимим часом передачі. Нехай  $\lambda$  - інтенсивність пуасонівського потоку запитів, а  $1/\mu$  означає усереднений час обслуговування повідомлень у вузлі. Відповідно,  $\rho = \lambda/\mu$  означає навантаження, яке обслуговується вузлом LSP-маршруту.

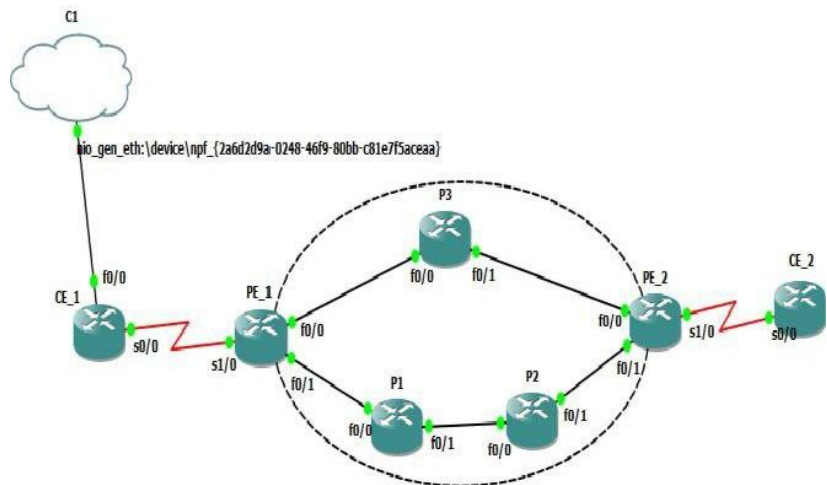


Рис. 3. Порівняльна оцінка величин  $V_1(N)$  і  $V_2(N)$

Обслуговування цього навантаження вузлами, вхідними у даний LSP-маршрут і є основною роботою цього фрагменту мережі MPLS.

За мету у даній статті ми ставили собі завдання пошуку стратегії прийняття рішення про організацію LSP-тунелю для оцінки альтернативного варіанту сумарного часу  $V_2(N)$  перебування пакета в LSP-шляху без тунелю. Допустимо використовувати формулу Ерланга в якості адекватної оцінки, що дозволяє зробити порівняння:

$$T = \frac{N}{\mu - \lambda}, \quad (2)$$

де  $T$  - середній час очікування (час перебування пакета в тунелі),  $N$  - кількість зайнятих обслуговуючих пристроїв (вузлів у тунелі),  $\mu$  - середня інтенсивність обслуговування (частота обробки пакетів на один вузол),  $\lambda$  - інтенсивність потоку пакетів (частота надходження пакетів на вхід тунелю).

Для аналітичного дослідження ситуації відсутності LSP-тунелю вузол  $n$ , що передає пакети по LSP, доцільно описати за допомогою моделі  $M/M/1/K$  зі швидкістю передачі  $\mu$  пакетів в секунду і максимальним числом  $K$  пакетів, яке він може зберігати у своїй буферній пам'яті. Пакети в цій моделі є тими самими, що у випадку організації тунелю, а обмеження на розмір буфера вибрано так, щоб умови у варіантах наявності або відсутності тунелю були б однакові. Традиційні тунелі завжди проходять від однієї межі до іншої скрізь мережу. У випадку MPLS тунелі можуть створюватися всередині мережі для управління трафіком тільки в частини мережі. Тобто, в LSP з  $M$  маршрутизаторів від вхідного LSR1 до вихідного LSRM можна створити LSP-тунель, наприклад, від вхідного LSR5 до вихідного LSRN, при  $N < M$ . Створені на короткий час LSP-тунелі в MPLS можуть починатися всередині мережі, а не з додатку користувачів на межі мережі. Це особливо важливо для практичного застосування представленої в роботі моделі: користувачі будуть продовжувати застосовувати звичайні IP-пакети та адресацію у своїх додатках і навіть у локальних мережах. Однак, у випадку підключення локальної мережі до глобальною, деякі IP-пакети користувачів (або пакети, що належать до інших протоколів) можуть прямувати через тунелі MPLS в цілях забезпечення їх привілейованого обслуговування.

Ефект, отриманий від організації тунелю, виражається різницею. Наявність цього ефекту перевіряється, починаючи з максимально можливого значенням  $N = M$ , тобто з максимально довгого тунелю з кінця в кінець. Якщо при цьому досягається позитивний ефект, то приймається рішення про організацію тунелю. Якщо ні, то спроба пошуку цього ефекту повторюється більш коротким шляхом  $N = M - 1$ .

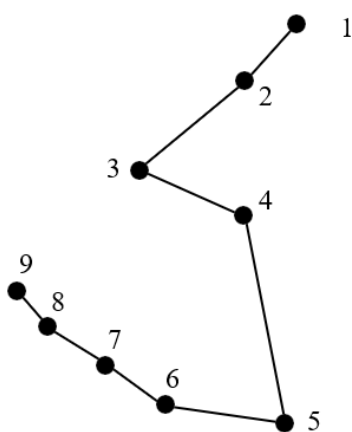


Рис. 4. Аналізований маршрут мережі передачі даних

Вибраний для аналізу маршрут мережі передачі даних, для якого будуть проводитись обчислення, представлений на рис. 4 [6, 7]. Для обчислення аналізу маршруту мережі передачі даних можна скористатися різними математичними і статистичними методами для оцінки ефективності використання LSP-тунелю. Серед таких методів – аналіз часу обслуговування, ймовірності втрат пакетів, а також затримок в мережі з використанням та без використання LSP-тунелю.

Для аналізу ефективності використання LSP-тунелю важливо визначити ключові показники ефективності (KPI), такі як середній час затримки пакета в мережі, ймовірність втрат пакетів через переповнення буферів у вузлах, а також пропускну здатність мережі.

Для цього можемо скористатися формулою Ерланга для оцінки інтенсивності навантаження в системах масового обслуговування. Це дозволить нам оцінити ймовірність того, що пакет буде обслуговуватися без очікування та ймовірність втрати пакетів через відсутність вільних ресурсів (наприклад, через переповнення буфера вузла).

Розглянемо вибраний маршрут мережі передачі даних на рис. 5. Припустимо, що в мережі на маршруті від LSR1 до LSRM (де  $M$  - кількість маршрутизаторів на шляху) потрібно оцінити ефективність організації LSP-тунелю від LSR5 до LSRN ( $N < M$ ).

#### 1. Оцінка навантаження без тунелю ( $V2(N)$ ):

- Використовуючи модель  $M/M/1/K$  для кожного вузла на маршруті, можемо розрахувати середній час затримки пакета на основі інтенсивності надходження пакетів ( $\lambda$ ) та швидкості обслуговування ( $\mu$ ). Інтенсивність навантаження ( $\rho$ ) можна розрахувати як  $\lambda/\mu$ .

- Враховуючи максимальну кількість пакетів  $K$ , яку може зберігати буфер кожного вузла, можемо оцінити ймовірність втрати пакетів за формулою Ерланга.

#### 2. Оцінка ефективності використання LSP-тунелю ( $V1(N) - V2(N)$ ):

- Визначивши сумарний час перебування пакета в мережі з тунелем і без тунелю, можна

розрахувати ефект від використання тунелю.

- Позитивний ефект від використання тунелю буде визначений, як зменшення сумарного часу затримки пакета на маршруті при використанні LSP-тунелю порівняно з варіантом без тунелю.

Важливо також враховувати вплив різних рівнів навантаження на мережу ( $\rho = 0,3; 0,5; 0,8; 0,95$ ), адже збільшення навантаження може призвести до збільшення часу затримки та ймовірності втрати пакетів.

Величини  $V_1(N)$  і  $V_2(N)$ . За їх позитивної різниці організація тунелю між першим вузлом і вузлом  $n$  недоцільна. При цьому здійснюється перехід до кроку 6. У протилежному випадку приймається рішення організувати тунель між першим вузлом і вузлом  $n$  і робота алгоритму завершується.

Позитивною різницею  $V_1(N)$  і  $V_2(N)$  у вузлі  $n$  приймається рішення про виключення вузла  $n$  з розгляду щодо можливого LSP-тунелю. Виконується аналіз рівності  $N$  числу 3. Якщо  $N = 3$ , то приймається рішення про відмову в організації LSP-тунелю будь-де вздовж LSP-маршруту і робота алгоритму завершується. У протилежному у разі, при  $N > 3$ , присвоюється  $N = N - 1$  і відбувається повернення до кроку 2.

Виграш в часі від організації тунелю дорівнює різниці  $V_1$  і  $V_2$ . Навантаження на LSP =  $0,3; 0,5; 0,8; 0,95$ .

Час перебування пакету в мережі передачі даних з організацією тунелю ( $V_1$ ) на початковому етапі менше, ніж час проходження пакету по мережі без організації тунелю ( $V_2$ ). Але після проходження пакетом п'ятого вузла  $V_1$  час починає суттєво збільшуватися, тоді як час проходження пакету по мережі без організації тунелю ( $V_2$ ) зростає плавніше. Тобто після п'ятого вузла пакет у мережі з організацією тунелю буде оброблятися повільніше, чим в мережі без організації тунелю. Це відбувається через зчеплення пачок повідомлень. Отже, організація тунелю при навантаженні мережі  $\rho = 0,3$  та середньої швидкості обслуговування 25 000 пак/с буде ефективним на мережі, що складається з п'яти вузлів.

Можна зазначити, що час перебування пакета в мережі передачі даних з організацією тунелю ( $V_1$ ) і без організації тунелю ( $V_2$ ) до проходження пакетом другого вузла різняться несуттєво, але після проходження пакетом другого вузла час перебування пакету в мережі передачі тунелю ( $V_1$ ) починає значно зростати порівняно з часом проходження пакету по мережі без організації тунелю ( $V_2$ ). Це збільшення часу може бути пов'язане з додатковим навантаженням, яке створюється внаслідок ініціації та підтримки тунельного з'єднання, а також можливими затримками при обробці тунельного трафіку спеціалізованим обладнанням або програмним забезпеченням.

Організація тунелю може бути виправданою за умов, коли загальний час проходження пакетів через мережу з тунелем ( $V_1$ ) менше, ніж час проходження пакетів мережею без тунелю ( $V_2$ ), з урахуванням певного порогового значення ефективності, яке компенсує додаткові затрати на організацію та підтримку тунелю. Цей поріг може бути визначений на основі вимог до якості обслуговування (QoS), специфічних для даної мережі або її частини.

### Висновки

Проведення подібних обчислень дозволяє не тільки оцінити ефективність використання тунелю на конкретному маршруті мережі передачі даних, але й визначити оптимальні параметри для організації тунелів в мережі з урахуванням існуючого навантаження та обмежень.

Для оцінки ефективності організації тунелю важливо враховувати різні навантаження на мережу, оскільки це впливає на загальну продуктивність мережі та час проходження пакетів. Навантаження, які перевищують здатність мережі ефективно обробляти трафік, можуть призводити до затримок, втрат пакетів і загалом до погіршення якості обслуговування. Тому, при високих значеннях  $\rho$ , організація тунелю може не принести очікуваного поліпшення продуктивності або навіть виявитися контрпродуктивною.

Рішення про організацію тунелю між вузлами в мережі повинно базуватися на детальному аналізі поточних характеристик трафіку, обчисленні часу проходження пакетів з тунелем і без

нього, а також врахуванні поточного навантаження на мережу. Організація тунелю може бути ефективною стратегією для покращення продуктивності мережі та зменшення загального часу проходження пакетів, але це вимагає уважного підходу та точного планування.

### Список літератури

1. Воробієнко П. П., Нікітюк Л. А., Резніченко П. І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі. К.: САММІТ-Книга, 2010. 708 с.: іл.
2. Довгий С.О., Савченко О.Я., Воробієнко П.П. та ін. Сучасні телекомунікації: мережі, технології, економіка, управління, регулювання / За ред. С.О. Довгого. – К.: Український Видатничий Центр, 2002. – 520 с.
3. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Кузик О.В., Тихий А. А. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2020. 428с. ISBN 978-617-7813-27-8.
4. Швець А. В. Мультиагентна система управління транспортними ресурсами. Сучасні проблеми науки. Тези доп. XXI Міжнар. наук.-практ.конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених (5-9 квіт. 2021 р. м. Київ.). С. 128-130.
5. Литвин В. В. Мультиагентні системи підтримки прийняття рішень, що базуються на прецедентах та використовують адаптивні онтології. *Радіoeлектроніка. Інформатика. Управління.* 2009. № 2 (21). С.120–126.
6. Теоретичні основи телекомунікаційних мереж: навч. посіб. /М.М.Климаш, Б.М.Стрихалюк, М.В.Кайдан. – Львів : вид-во УАД, 2011. – 496 с.

N. Rudenko, N. Khabiuk, M. Kulik

### INCREASED EFFICIENCY AND OPTIMIZATION OF DATA TRANSMISSION IN THE TRANSPORT NETWORK BASED ON IP/MPLS TECHNOLOGY

*This article considers the problem of tunneling management strategies in an IP/MPLS transport network with a focus on improving the efficiency and optimization of data transmission. It is proposed to use a specialized model to identify and optimize tunnel resources aimed at maintaining a high level of service quality.*

*The relevance of creating a tunneling management model in the context of traffic growth and expanding the functionality of the IP/MPLS network is substantiated. It is noted that traditional management methods can be ineffective in a rapidly evolving environment, and the use of a specialized model is a key factor for optimal use of tunnel resources.*

*The authors introduce a formalized tunneling management model that includes the following important components: segments of tunnel resources representing separate aspects of the IP/MPLS network; a mechanism for determining and analyzing traffic for each tunnel segment; prioritization of tunnel traffic in accordance with management efficiency criteria, contributing to the optimal allocation of resources and ensuring the highest level of service.*

**Keywords:** IP/MPLS transport network, dynamic resource adaptation, traffic management efficiency, multi-agent approach, traffic, traffic segmentation, efficiency criteria, dynamic routing.