

УДК 621.394

# ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ В МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ РОЗПОДІЛУ ЗАПАСУ ЇХ РЕСУРСІВ



[М.М. КЛИМАШ](#),

[О.А. ЛАВРІВ](#),

[Б.А. БУГИЛЬ](#)

Національний університет  
«Львівська політехніка»

*В даній роботі запропоновано метод управління ресурсами мультисервісної мережі. Розроблено алгоритм обробки пакетів із використанням методу запасів. Досліджено ефективність методу на основі імітаційної статистичної моделі.*

*This paper proposed a method of resource management for multiservice network. The packets processing algorithm was designed on the basis of stock method in this article. The method's efficiency was investigated on the basis of statistical simulation model.*

*В данной работе предложен метод управления ресурсами мультисервисной сети. Разработан алгоритм обработки пакетов с использованием метода запасов. Исследована эффективность метода на основе имитационной статистической модели.*

## Вступ

В технології IP/MPLS [1, 2] основною проблемою є забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS) в реальному часі, так як користувачі вимагають все більшої різноманітності послуг та сервісів, а оператори намагаються їх надавати з найменшими економічними та ресурсними затратами. Відповідно слід шукати спосіб гарантованого надання задовільного сервісу абонентам в умовах обмежених мережних ресурсів. В даній роботі запропоновано метод управління мережею на основі розподілу запасу її ресурсів.

## I. Характеристика запасу ресурсів в телекомунікаційних системах

В телекомунікаційних системах у якості запасів ресурсів мережі прийнято наступні параметри QoS [1]: пропускна здатність  $C$ , імовірність втрати пакетів  $P$ , затримка пакетів  $T$  та джитер  $J$ . Телекомунікаційні мультисервісні мережі найбільш точно описує модель системи з фіксованим періодом перевірки рівня запасів. У даній моделі кожен пакет надходить до мережі з визначеним періодом (пакети VoIP, кадри IPTV), перебуває в мережі певний час та характеризується запасом ресурсів.

Можна виділити дві реакції кінцевого користувача на дефіцит (відсутність задовільної якості сервісу), який виникає при вичерпанні запасу, тобто запізненні пакету. У першому випадку одержувач послуг згоден зачекати доки прийдуть затримані пакети. У другому випадку одержувачу гарантовано повинні доставлятися пакети у визначений час. Перший варіант для трафіка реального часу є категорично неприйнятним з точки зору користувача і задовільного надання йому послуг, в той час, як дру-

гий варіант є не зовсім реальним з точки зору ресурсів мережі. Однак, з певними обмеженнями, можна використати другий варіант, задовольняючи потреби користувача з мінімальними затратами ресурсів мережі.

Постає нова концепція функціонування мережі, де ресурси виділяються не окремим пакетам, а потоку в цілому. В такій ситуації вноситься чіткість в обробці пакетів, яка виражається характеристикою втрат та запізнення пакетів виключно окремого потоку. Ієрархія приналежності мережних ресурсів представлена на рис. 1.

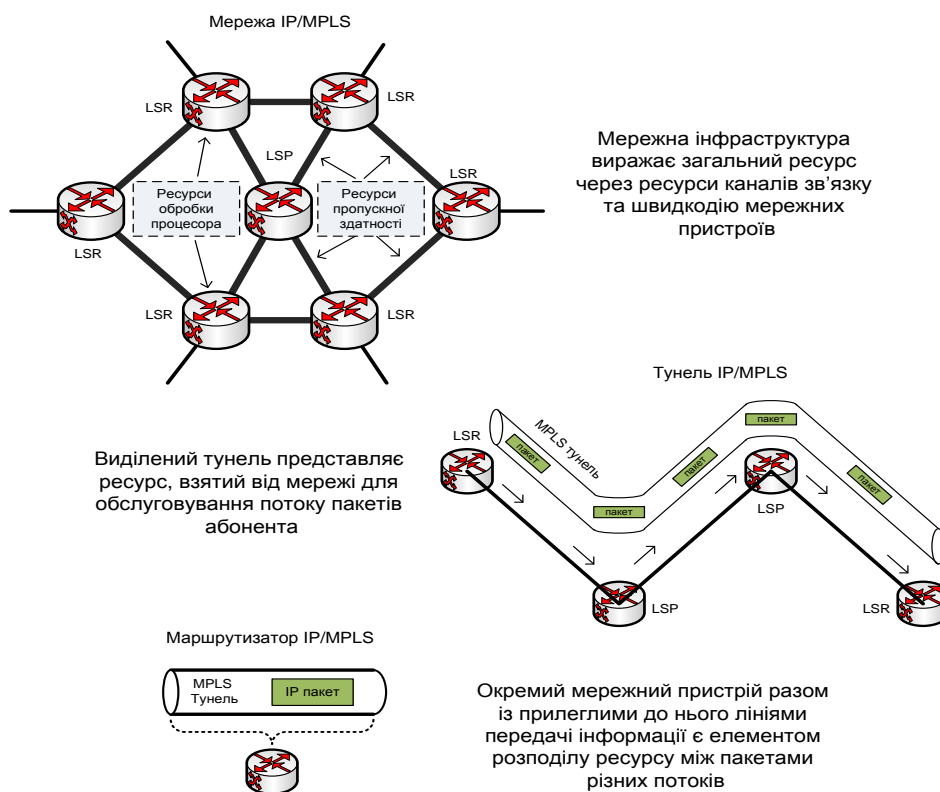


Рис. 1. Ієрархія мережних ресурсів

На верхньому рівні ієрархії представлена мережа, що характеризується ресурсами каналів зв'язку та мережних пристроїв. Даний ресурс є незмінним при незмінній мережній інфраструктурі та розрахований на обмежену кількість тунелів. Для кожної заявки, що надходить на обслуговування до мережі, створюється тунель та виділяються ресурси мережі у залежності від класу обслуговування. Тунелі формують другий рівень ієрархії, оскільки мережні ресурси поділяються саме між ними. Сумарна кількість тунелів, створених в мережі, за власними ресурсними затратами не може перевищувати загального об'єму ресурсів мережі. Оскільки виділений ресурс для кожного тунелю може бути різним у залежності від класу трафіка, що транспортується, відповідно кількість тунелів у мережі може бути різною, однак не перевищувати ресурс мережі. Найнижче в ієрархії мережних ресурсів стоять мережні комутаційні пристрої, які здійснюють обробку пакетів. Пакет транспортується по MPLS тунелю та може користуватись тільки його ресурсами, а якщо їх не вистачає, то мережа запозичує ресурси у наступних пакетів (потоків) власного тунелю.

## II. Метод обробки пакетів на основі розподілу запасу ресурсів

Керуючись теорією запасів [3], є можливість пріоритетної обробки пакетів, зменшуючи час їх перебування в буфері, якщо затримка пакету перевищує деякий показник. Іншими словами, пакет, який приходить у вузол, класифікується за класом еквівалентності пересилки, що визначає його пріоритет, однак через затримку в буфері, яка є мало регульованою, може погіршити допустимі параметри якості контенту. Натомість, теорія запасів передбачає, що на опрацювання кожного пакету повинен відводитися строгий час, при його перевищенні пакет видаляється з черги, або ж використовує запас і обробляється з найвищим пріоритетом для забезпечення параметрів якості контенту. В конкретний момент часу кожен наступний пакет, що надходить, зменшує наявний запас маршрутизатора на певну величину, а кожен відправлений пакет збільшує запас на певну величину, як це показано у залежності

$$\Delta Z d_k = (C - C_k) + (T - T_k) + f(P_0) \pm f(J_0), \quad (1)$$

де  $\Delta Z d_k$  – визначає запас доставки пакету на  $k$ -ому маршрутизаторі;  $C$  – загальний запас ресурсу пропускної здатності маршрутизатора;  $C_k$  – частина ресурсу пропускної здатності, витрачена на обробку пакету на  $k$ -ому маршрутизаторі;  $T$  – загальний запас ресурсу затримки пакету на  $k$ -ому маршрутизаторі;  $T_k$  – частина ресурсу затримки пакету, витрачена на обробку пакету на  $k$ -ому маршрутизаторі;  $f(P_0)$  – функція імовірності втрат, яка впливає на запас при втраті чи видаленні пакету;  $f(J_0)$  – джитер при доставці пакету.

Кожен маршрутизатор повинен мати таблицю, яка регламентує відповідність параметрів якості кожному із видів трафіка.

Для передавання інформації про поточний запас ресурсів для  $i$ -го пакету запропоновано використовувати спеціальну мітку запасу. Доцільність її використання визначається тим, що в технології MPLS [1, 2] тривалість обробки окремої мітки стеку несуттєво впливає на продуктивність обчислювальної системи маршрутизатора, тому внесенням додаткової затримки за рахунок опрацювання мітки запасу можна знехтувати. Структура мітки запасу ідентична структурі мітки комутації, однак із зміною цілей використання її фрагментів.

Час життя (поле TTL мітки) визначає кількість маршрутизаторів, які може пройти пакет до того, як буде видалений. Це поле може приймати значення від 1 до 255 в залежності від протяжності вибраного маршруту. Воно заповнюється протоколами маршрутизації, які, маючи оптимальний маршрут, встановлюють його з невеликим запасом щодо довжини. Чим довший маршрут, тим менше часу припадає на обробку пакету, оскільки затримка між кінцевими користувачами чітко визначена і при збільшенні кількості вузлів маршруту ставляться жорсткіші вимоги до швидкості опрацювання пакету. Кожен маршрутизатор декрементує це поле при опрацюванні пакету, а також може визначити, скільки маршрутизаторів залишилося до кінцевого абонента.

Для використаної спеціальної мітки запасу пропонується не здійснювати декрементацию цього поля, оскільки дана мітка не бере участі у маршрутизації. Таким чином, маршрутизатор буде знати, скільки вузлів пакет встиг пройти (віднявши від значення поля TTL мітки запасу значення поля TTL мітки комутації) та скільки вузлів йому залишилося подолати. Схема обробки пакету за методом розподілу запасу ресурсів мережі представлена на рис. 2.

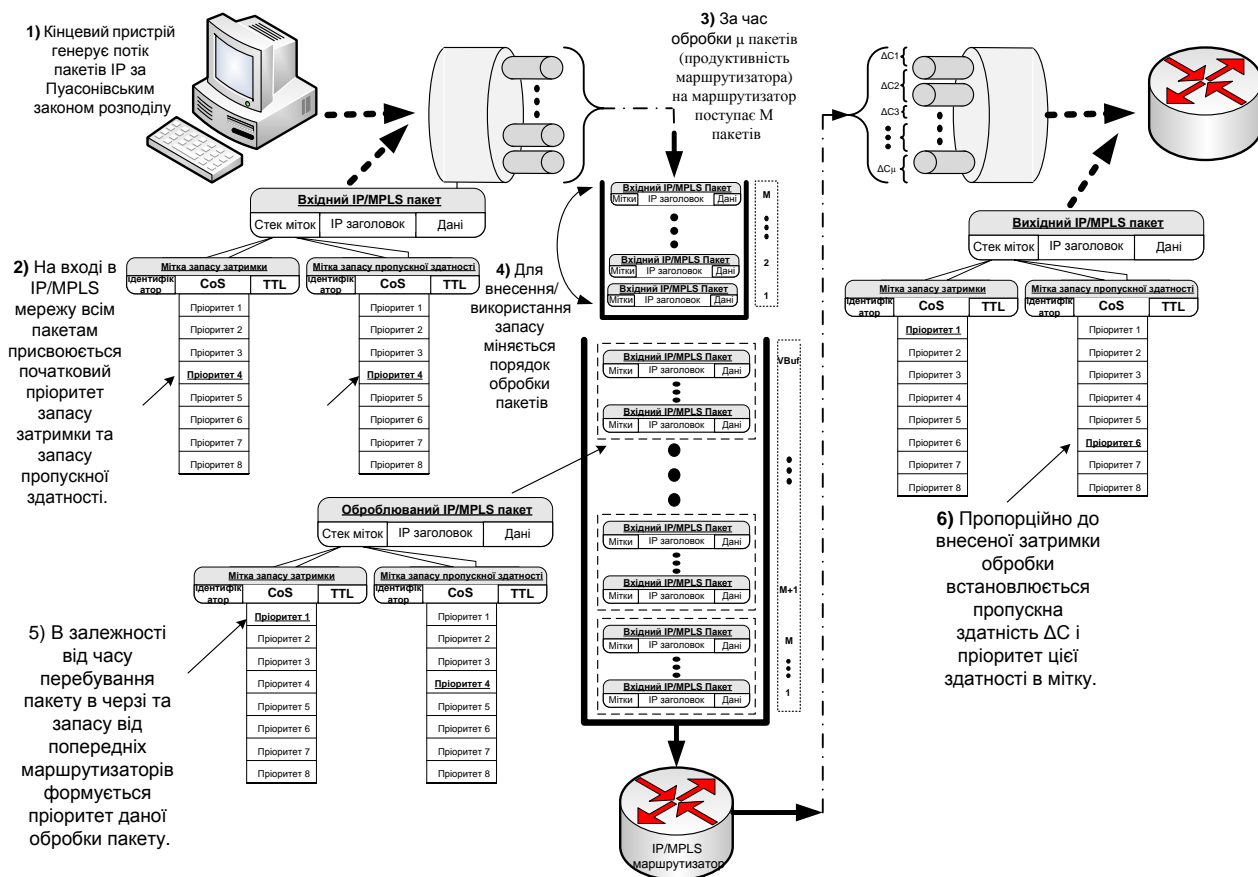


Рис. 2. Схема обробки пакету за методом розподілу запасу ресурсів мережі

Для кожного із видів трафіка встановлені межі затримки, які можуть бути присутніми при передачі інформації без її спотворення для кінцевого споживача та відповідний пріоритет, що регулює вимоги затримки. Так, маючи стандартизований час затримки, пріоритет, довжину маршруту та кількість пройдених вузлів, можна визначити загальну тривалість затримки, яка вже внесена у передавання пакету

$$\Delta t_{\text{внесена}} = \frac{\tau_{\text{в.к.}}}{255} \cdot (k - N) + \tau_{\text{к.з.}} \cdot [(k + 1) - N] \quad (2)$$

та запас тривалості затримки для наступних маршрутизаторів при обробці пакету

$$\Delta t_{\text{запас}} = \tau_{\text{в.к.}} - \Delta t_{\text{внесена}} \quad (3)$$

де  $\tau_{\text{в.к.}}$  – регламентована затримка у вузлі комутації для конкретного виду трафіку (ця константа записується у пам'ять маршрутизатора та обирається відповідно до

поля CoS мітки маршрутизації, наприклад для VoIP – 35% від 150 мс),  $k$  – параметр поля TTL мітки запасу, що визначає загальну кількість вузлів у маршруті,  $k+1$  – кількість ребер у маршруті;  $N$  – параметр поля TTL мітки комутації, що визначає скільки маршрутизаторів повинен пройти пакет, доки не буде видалений;  $\tau_{к.з.}$  – затримка в каналі зв'язку між двома пристроями розподілу інформації, що визначається як відношення корисної інформації до швидкості каналу, аналогічна величині, оберненій до пропускної здатності, зайнятої даним тунелем.

Дані залежності дозволяють визначити умовний час затримки і запасу для пакету у випадку, коли кожен маршрутизатор гарантовано обробляє пакет за встановлений час, а також стовідсотково резервується потрібна пропускна здатність. Однак пакет може обробитися як із запізненням, так і швидше. Може використати меншу пропускну здатність або більшу. Звідси виходить необхідність ввести додатковий параметр, що враховує запас або дефіцит в обробці та транспортуванні.

Даним параметром виступає поле CoS мітки запасу. У звичайній мітці воно визначає клас сервісу та, як описано вище, для передачі запасів виділяється окрема мітка, і це поле може бути використане для пріоритезації в обробці пакету або ж всього тунелю. Маршрутизатор, обробляючи мітку, яка прийшла від попереднього вузла, визначає пріоритет, за яким обробився даний пакет на попередньому вузлі. Якщо пріоритет низький, значить попередні вузли внесли запас затримки в обробку пакету, тобто обробили його швидше. Якщо пріоритет високий, то попередні маршрутизатори є сильно завантаженими і використали запас. Восьмирівнева шкала дозволяє визначити умовні межі запасу, який внесли або ж використали маршрутизатори на шляху. На першому маршрутизаторі для пакету встановлюється середня межа запасу: у випадку, коли маршрутизатор не є завантаженим і обробляє пакет за час, менший допустимого (виходячи із технічних показників обладнання і часу, визначеного за допомогою TTL), він зменшує пріоритет обробки пакету, в протилежному випадку – збільшує.

Оскільки регульованих параметрів є два: затримка і пропускна здатність, то пропонується використати дві мітки. Поле CoS першої мітки характеризує запас затримки при обробці, другої – запас пропускної здатності. Використовуючи показники обох полів міток, маршрутизатор, на якому в поточний момент обробляється пакет, може розрахувати затримку, яка вже присутня для даного пакету, тобто

$$\Delta T_{\text{внесена}} = \sum_{i=N}^k \left( \frac{\tau_{\text{в.к.}}}{255} \cdot \frac{p_i - p_0}{8} \right) + \sum_{j=N}^{k+1} \left( \tau_{\text{к.з.}} \cdot \frac{p_j - p_0}{8} \right) \quad (4)$$

та запас, який можна використати при доставці пакету,

$$\Delta T_{\text{запас}} = \tau_{\text{в.к.}} - \Delta T_{\text{внесена}}, \quad (5)$$

$p_0$  – пріоритет поля CoS, встановлений за замовчуванням для даного виду трафіка першим маршрутизатором у мережі (для прикладу, за замовчуванням пріоритет 4 за восьмирівневою шкалою);  $p_i$  та  $p_j$  – пріоритет поля CoS міток запасу затримки та



пропускної здатності відповідно. Ці два параметри є різними на кожному вузлі і визначаються у залежності від завантаженості вузла комутації.

Для реалізації методу розподілу запасу ресурсів розроблено алгоритм, представлений на рис. 3. Даний алгоритм реалізовано у вигляді імітаційної моделі в середовищі MATLAB. Запропонований алгоритм підлягає реалізації як додатковий програмний модуль операційної системи маршрутизатора мультисервісної мережі. Його швидкодія залежить від якості апаратного забезпечення, продуктивності процесора, швидкості доступу до постійної пам'яті, об'єму оперативної пам'яті та відлагодження програмного коду, у якому реалізовано алгоритм, на конкретному мережному обладнанні. Алгоритм розроблено із застосуванням запропонованого методу розподілу запасу ресурсів мережі на основі евристичного синтезу, виходячи з існуючих особливостей статичної маршрутизації та принципів передавання пакетизованих даних по мережі з комутацією віртуальних каналів.

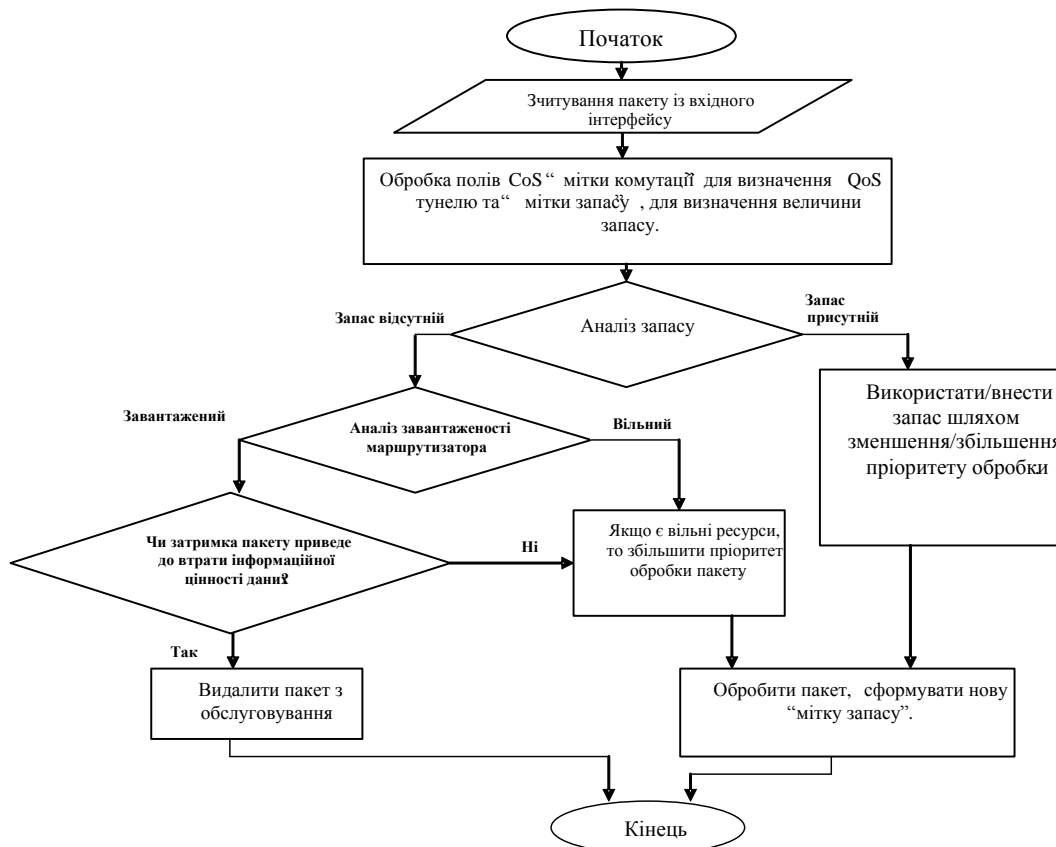


Рис. 3. Алгоритм обробки трафіка за методом розподілу запасу ресурсів мережі

### III. Дослідження ефективності методу розподілу запасу ресурсів

Виходячи із (4), кожен маршрутизатор може затримати пакет або ж внести запас на величину  $n \cdot 0,125$  від комбінації параметрів затримки  $T$  та пропускної здатності  $C$ , де  $n \in (0,7)$ . Таким чином, функція  $\Delta T_{запас}$  представляє собою спадаючу криву, представлену на рис. 4, коли пріоритети обробки пакетів на маршрутизаторах розподілені за Броунівським законом.

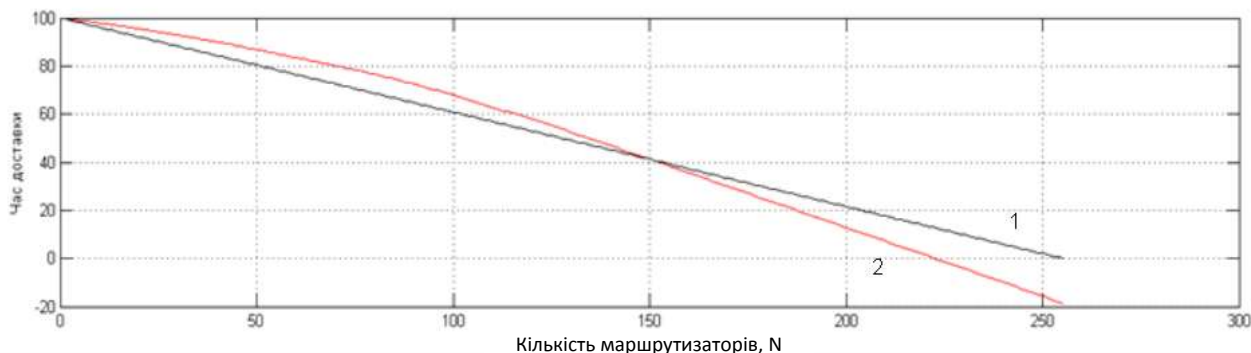


Рис. 4. Передавання пакету по мережі з 255 маршрутизаторів методом запасів (1 – рівномірний і 2 – Броунівський розподіл пріоритетів обробки пакету)

Броунівський розподіл із параметром Херста 0,7 вибрано тому, що такий трафік найбільш характерний для мультисервісних мереж. Результати моделювання представлені на гістограмі (рис. 5), аналізуючи яку можна побачити, що більша частина маршрутизаторів вносили додаткову затримку в доставку пакету у розмірі до 0,22 умовних одиниць часу, хоча були і такі маршрутизатори, які компенсували цю затримку на 0,15 умовних одиниць. Розкид отриманих параметрів запасу ресурсів є незначним і становить  $0,22 + |-0,15| = 0,37$ . Ця величина є порівняно невеликою, однак свідчить про нераціональне використання ресурсів деяких мережних пристроїв. Як видно із гістограми (рис. 5), велика частина пристроїв або сильно завантажена (крайні праві стовпці), або недовантажена (крайні ліві стовпці), тільки незначна частина пристроїв працюють у нормальному режимі (два середні стовпці). Пакетні потоки в мережі не є оптимально розподіленими між маршрутами, що може призвести до перевантаження деяких мережних пристроїв та їх виходу з ладу, що негативно позначиться на роботі мережі. Саме такий розподіл потоків потребує оптимізації виділених ресурсів та буде використаний в наступних експериментах.

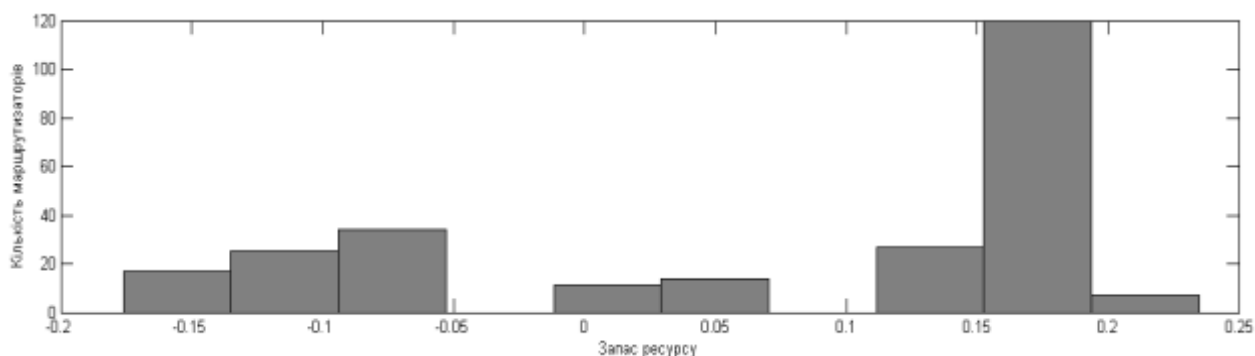


Рис. 5. Внесення/використання запасу маршрутизаторами за умови, що пріоритети обробки пакету розподілені за Броунівським законом

Як видно із графіка (рис. 4), пакет запізнюється до місця призначення майже на 20 умовних одиниць часу у порівнянні з рівномірним розподілом ресурсів, не встигаючи пройти близько 25 маршрутизаторів шляху із 255. Через нерівномірну заван-

таженість мережі на початку свого шляху пакет отримує додаткові ресурси та випереджає час доставки.

Однак після 150-го маршрутизатора починається завантажена ділянка мережі, і пакет отримує менше ресурсів, ніж потрібно, спочатку витрачаючи запас ресурсів попередніх маршрутизаторів, а після його закінчення, на 225-му маршрутизаторі шляху, витрачає ресурс наступних маршрутизаторів. У такій ситуації, для своєчасної доставки пакету до місця призначення, маршрутизатори, що слідують після 150-го, повинні гарантовано виділяти необхідний об'єм ресурсів.

В даному експерименті маршрутизатори через власну завантаженість були не в змозі надати необхідного ресурсу. В результаті, на 220-му маршрутизаторі пакет вичерпав рекомендовану затримку доставки та запізнився до одержувача. Даний дослід показує, як неефективно витрачено ресурси мережі, які можуть бути використаними для інших потоків. Відстеження та видалення пакетів із обслуговування при вичерпанні їх рекомендованої затримки доставки дозволить заощадити ресурси та використати їх для доставки інших пакетів.

На основі запропонованого методу проведено моделювання для розгалуженого домену мережі, що представлений на рис. 6. Кожен з кінцевих користувачів генерував пакети, які поступали на відповідні маршрутизатори і підлягали статичній маршрутизації з застосуванням методу розподілу запасу ресурсів. Результати моделювання наведено в таблиці.

Таблиця. Результати моделювання

Кількість пакетів, що поступили в мережу	7991086
Кількість вчасно доставлених пакетів	7402994
Частка доставлених пакетів, %	92,64
Кількість втрачених пакетів в буфері	88090
Частка втрачених пакетів в буфері, %	1,10
Кількість видалених неактуальних пакетів	499999
Частка видалених неактуальних пакетів, %	6,25
Математичне сподівання:	
- частки втрат в буфері	0,0110043
- частки видалених за методом запасів	0,0625143
Дисперсія:	
- частки втрат в буфері	0,0000184
- частки видалених за методом запасів	0,0002592
Середньоквадратичне відхилення:	
- частки втрат в буфері	0,0042905
- частки видалених за методом запасів	0,0161003
Загальний час моделювання, с.	1846,46



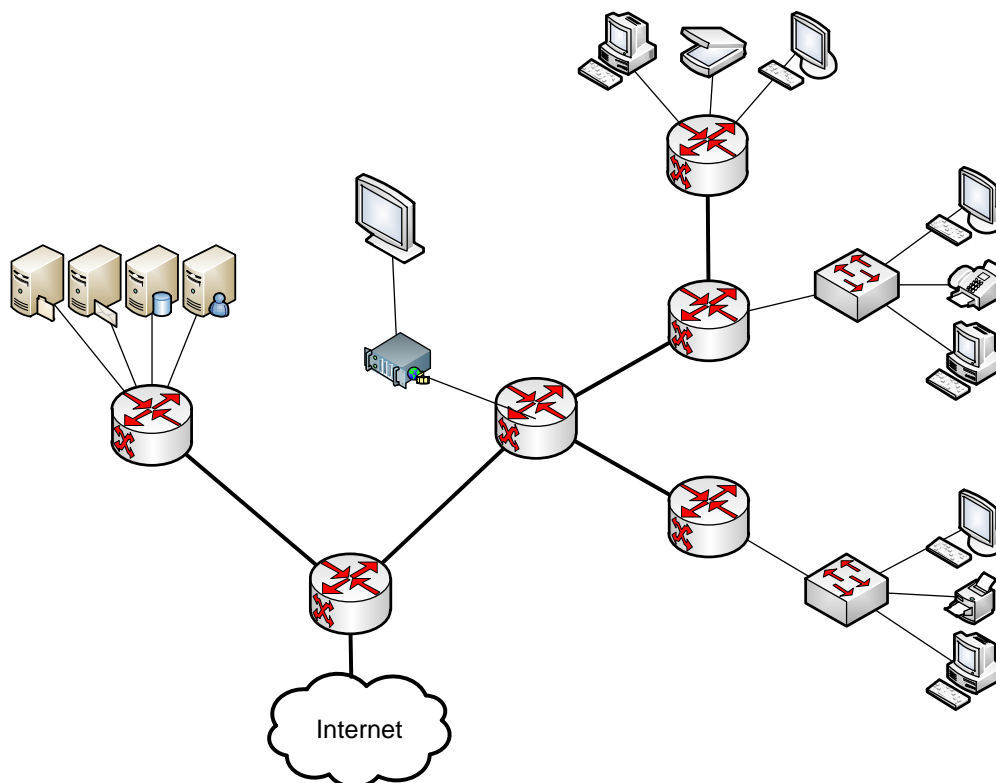


Рис. 6. Структура досліджуваної мультисервісної мережі

На основі розробленої імітаційної статистичної моделі було проведено дослідження імовірності втрат пакетів в буфері (рис. 7).

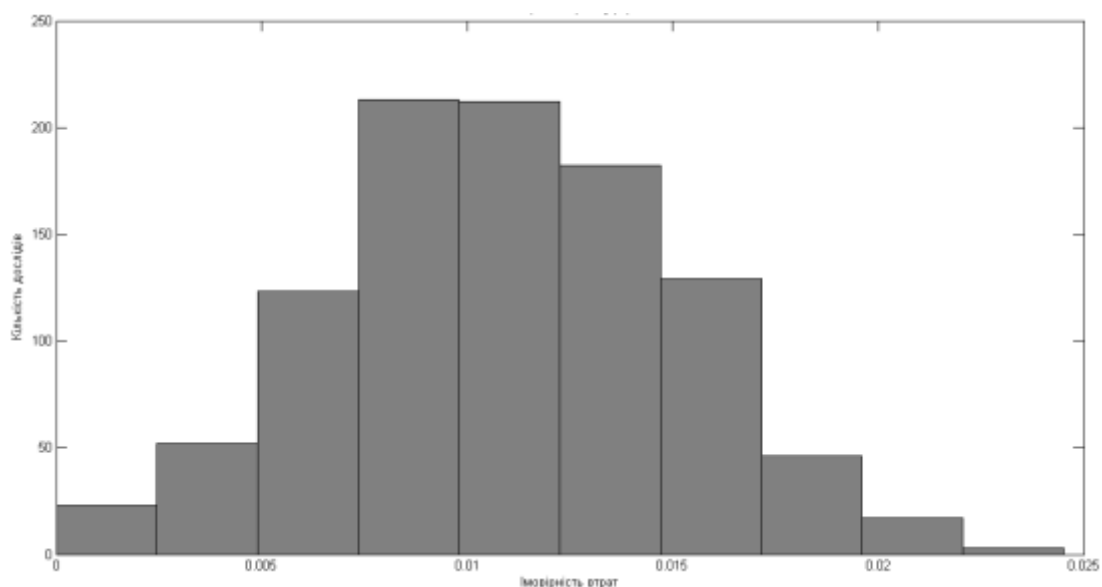


Рис. 7. Імовірність втрат пакетів в буфері для проведених дослідів

Встановлено, що максимальні втрати в буфері становили 2,5% в п'яти дослідях з 1000. Найбільше ж дослідів дали результат 1% втрат в буфері при маршрутизації в мережі за методом розподілу запасу ресурсів (рис. 7).

За методом запасів було видалено близько 7% неактуальних пакетів на шляху їх слідування (в 500 дослідах з 1000). Максимальне значення кількості видалених пакетів склало 10%, що дозволило вивільнити додаткові ресурси пропускної здатності та затримки на наступних маршрутизаторах шляху (рис. 8).

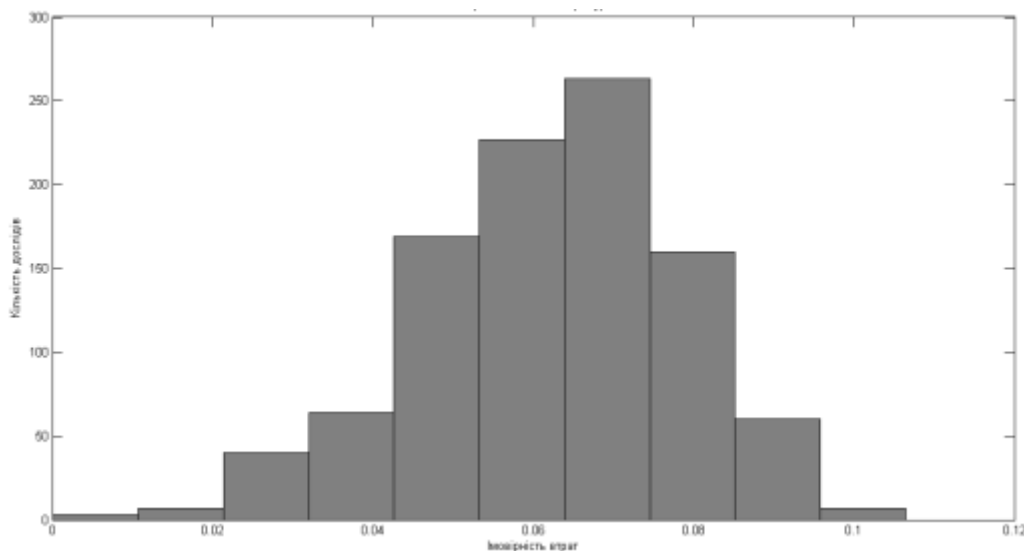


Рис. 8. Імовірність втрат пакетів при використанні запропонованого методу для проведених дослідів

На рис. 9 приведено графік, що демонструє співвідношення завантаженості буфера, кількості пріоритетних пакетів (крива 1) та кількості пріоритетних пакетів після видалення неактуальних пакетів за методом запасів (крива 2). Залежність отримана при проведенні 1000 дослідів, але, для кращої візуалізації, представлено масштабований варіант (100 дослідів).

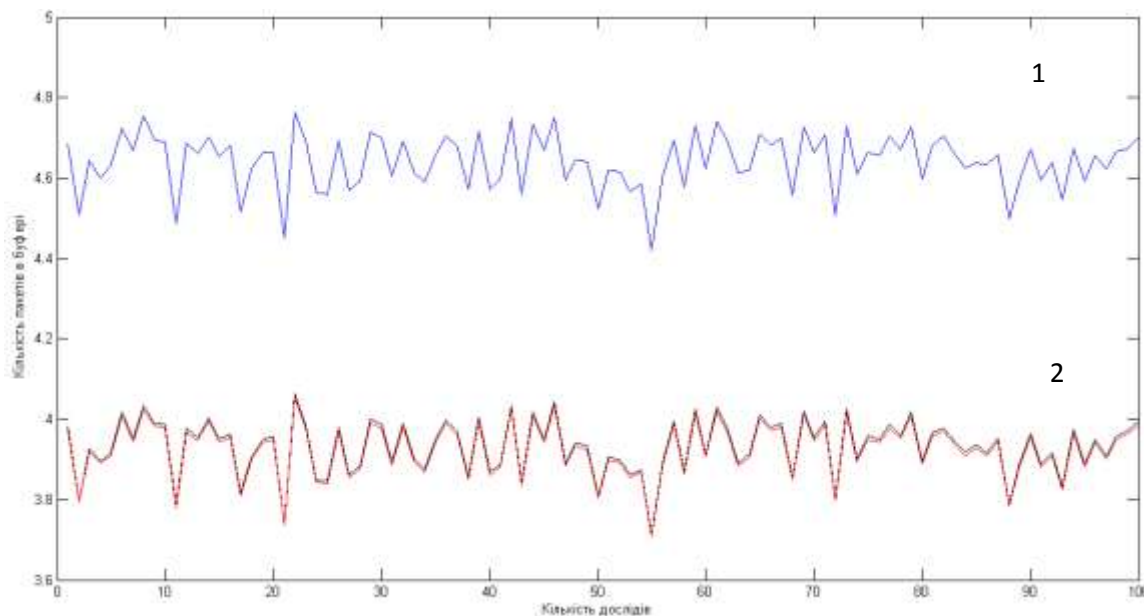


Рис. 9. Виграш від застосування методу розподілу запасу ресурсів мережі (зниження довжини середньої довжини черги для проведених дослідів)

## Висновки

В сучасних телекомунікаційних мережах всі пакети, що надходять від відправника, приходять на пункт призначення і втрачаються лише у випадку виникнення помилок в пакеті. До одержувача доставляються всі пакети, в незалежності від того, чи потрібні вони йому. Вся корисна інформація, яку потребує абонент, доставляється йому вчасно, задовольняючи вимоги якості сервісу. Пакети, котрим по будь-якій причині не надалася якість сервісу, абонент вважає просто “сміттям”.

Метод запасу ресурсів здійснює очищення мережі від пакетів, які втрачають інформаційну цінність для користувача ще під час проходження домену між відправником та одержувачем. Коли пакет транспортується мережею та отримує незадовільну якість сервісу, він, в певний момент, стає непотрібний абоненту. Решта часу, протягом якого пакет перебуває в мережі – це безцільно зайняті ресурси, що є додатковим навантаженням. Видалення даних пакетів дозволить звільнити певну кількість ресурсів, що можуть використовуватися в інших цілях.

В роботі запропоновано метод управління ресурсами мультисервісної мережі, згідно з яким інформація відправника повинна бути доставлена кінцевому користувачу з певними параметрами якості, які визначають запас, що наданий певному трафіку. По мірі проходження інформації мережею запас зменшується, тому завданням мережі є доставити дані, доки для них існує запас. Відсутність запасу свідчить про неможливість мережею надати задовільну якість сервісу, що у свою чергу призводить до втрати актуальності передачі пакету для кінцевого користувача. Запропонований метод дозволяє здійснювати регулювання параметрів контенту в мультисервісних мережах з метою забезпечення необхідного рівня якості.

## Список літератури:

1. *Evans J., Filsfils C.* Deploying IP and MPLS QoS for Multiservice Networks. Theory and Practice. – London: Elsevier Science, 2007. – 456 p.
2. *Олвейн В.* Структура и реализация современной технологии MPLS: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 480 с.
3. *Стивенсон Дж.* Управление производством: Пер. с англ. – М.: БИНОМ, Лаборатория базовых знаний, 2002. – 928 с.