

М. І. Бешлей, М. О. Селюченко, О. А. Лаврів,
А. Р. Масюк, Г. В. Холявка
Національний університет “Львівська політехніка”

ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОГРАМНОГО МАРШРУТИЗАТОРА У ПРОЦЕСІ ОБСЛУГОВУВАННЯ МУЛЬТИМЕДІЙНОГО ТРАФІКУ

© Бешлей М. І., Селюченко М. О., Лаврів О. А., Масюк А. Р., Холявка Г. В., 2015

Проведено дослідження імовірісно-статистичних властивостей трафіку експериментальної мультисервісної телекомунікаційної мережі для підтвердження адекватності моделі програмного маршрутизатора та згенерованого трафіку. Ефективність запропонованого підходу особливо чітко виявляється в умовах значних навантажень на комунікаційне ядро мережі, оскільки навіть незначне зниження затримок потоків реального часу суттєво підвищує якість обслуговування, а в деяких випадках є визначальним фактором для забезпечення оперативності реагування мережевої системи на кризові ситуації.

Ключові слова: адекватність, програмний маршрутизатор, мультимедійний трафік, часова затримка

M. I. Beshley, M. O. Seliuchenko, O. A. Lavriv,
A. R. Masyuk, H. V. Kholiavka,
Lviv Polytechnic National University

ESTIMATING THE ADEQUACY OF SOFTWARE ROUTER PERFORMANCE UNDER MULTIMEDIA TRAFFIC PROCESSING

© Beshley M. I., Seliuchenko M. O., Lavriv O. A., Masyuk A. R., Kholiavka H. V., 2015

In this paper we perform a study of probabilistic and statistical properties of experimental traffic of multiservice telecommunication network to confirm the adequacy of the developed software router model and simulated traffic profiles. The effectiveness of the proposed approach may be investigated the best under the conditions of significant load on the communication network core, because even a slight reduction in streaming delay substantially increases the service quality, and in some cases it is a major determining factor that ensures the efficiency of the system response on critical situations. The investigations are performed using developed virtual software router. The development was carried under the Qt5.2 programming environment. It uses the programming language C++ (C++ standard 11, 2011). The main advantage of this environment is that the code that has been written on it can be compiled on different platforms (e.g. Windows, Linux, Mac OS). Quality control of the traffic generator is performed to determine the maximum rate of IP packets generation with regular inter-packet spacing. The lower the standard deviation of inter-packet spacing, the less error and the more adequate simulation results are observed. We perform a series of tests to determine the quality of generator. Each stage of the experiment is determined by different inter-packet spacing and packet size. In the first test the packets flow rate is selected to ensure normal router functioning mode. In each subsequent test the flow rate is increased until the

rate value when the length of the emerging queue begins significantly affects the delay of IP packets. Selected The size of software routers incoming buffer is 24 packets. We performed an experiment on comparison of processing delays by hardware router (Cisco 2800 series) and the developed software router to confirm the adequacy of the latter. We have obtained in real time sets of data that are represented as graphs which depict the range of the round trip time for all packets and density of distribution probability. We have used Wireshark network analyzer to fix the fragmentation and grouping of packets in transmitted information flow. Experimental studies have confirmed the adequacy of the results obtained during the simulation of software router. The experiment was performed using 2 and 3 routers for a more accurate assessment of the delay of the real router.

Key words: adequacy, software router, multimedia traffic, time delay.

Вибір середовища розроблення моделі програмного маршрутизатора для дослідження ефективності алгоритмів обслуговування черг

Сьогодні існує велика кількість програмних засобів [1, 2], що дають змогу проводити моделювання як окремих пристроїв, так і всієї мережі. Основними засобами моделювання, які використовують науковці у всьому світі для тестування гіпотез та розробок, є: NS, OPNET, NetSim, OmNET++. Згадані засоби моделювання дають можливість досліджувати параметри функціонування мережевих вузлів, систем, протоколів та впроваджувати власні зміни у конфігурацію моделі того чи іншого пристрою. Такі засоби ґрунтуються на принципі моделювання дискретних подій [2]. Істотним недоліком цих засобів є те, що вони використовують статистичні методи та аналітичні залежності для розрахунку стану системи в певний момент часу. Тому година роботи реальної мережі може моделюватися протягом десятків секунд, що неефективно, коли моделювання виконується у реальному часі, наприклад, моделювання алгоритмів роботи з пам'яттю мережевого пристрою чи формування та обслуговування черг пакетів у маршрутизаторі [1, 2].

З цієї причини у статті дослідження виконано з використанням розробленого віртуального програмного маршрутизатора. Розробка у [3–10] здійснювалася із застосуванням середовища програмування Qt5.2, яке використовує мову програмування C++ (стандарт C++11, 2011 р.). Основною перевагою цього середовища є те, що написаний у ньому код може бути скопільований на різні платформи (наприклад, Windows, Linux, Mac OS).

Розгортання тестової моделі мережі та конфігурування параметрів її компонентів

Для розгортання тестової мережі та отримання адекватних результатів моделювання спочатку необхідно протестувати розроблені програмні компоненти (маршрутизатор та генератор). Тестування максимальної продуктивності таких моделей здійснюється відповідно до рекомендації RFC 2544. На основі цього документа спеціалісти з робочої групи EtherNet/IP (Асоціація зі стандартизації ODVA) розробили детальніший опис процедур тестування мережевих пристроїв, які функціонують на першому та другому рівнях TCP/IP моделі, та дещо розширений комплекс тестів.

Перевірка якості генератора трафіку полягає у визначенні того, з якою максимальною швидкістю генератор може здійснювати генерацію IP пакетів з постійним міжпакетним інтервалом. Що менше середньоквадратичне відхилення значень міжпакетного інтервалу, то менша похибка та більша адекватність результатів моделювання. Дослідження якості генератора проводиться за допомогою серії тестів. Кожна серія відрізняється величиною міжпакетного інтервалу та розміром самого пакета.

На рис. 1 відображена послідовність значень міжпакетних інтервалів для 100 000 пакетів. Параметри генерації потоку із постійною інтенсивністю (31,25 кбіт/с): міжпакетний інтервал 10 мс, розмір пакета – 2500 байт.

У результаті моделювання отримані такі статистичні характеристики послідовності значень міжпакетного інтервалу: середнє значення – $1.00845E+07$ нс; дисперсія – $1.73237E+12$ нс; середньоквадратичне відхилення – $1.3162E+06$ нс; похибка середнього значення – 4163.33 нс.

Кількісні характеристики процесу обслуговування трафіку мережевим пристроєм, що реалізований як програма, так само, як і для апаратного мережевого пристрою, залежать від його продуктивності. Проте у випадку програмного маршрутизатора його продуктивність суттєво залежить від продуктивності апаратної частини.

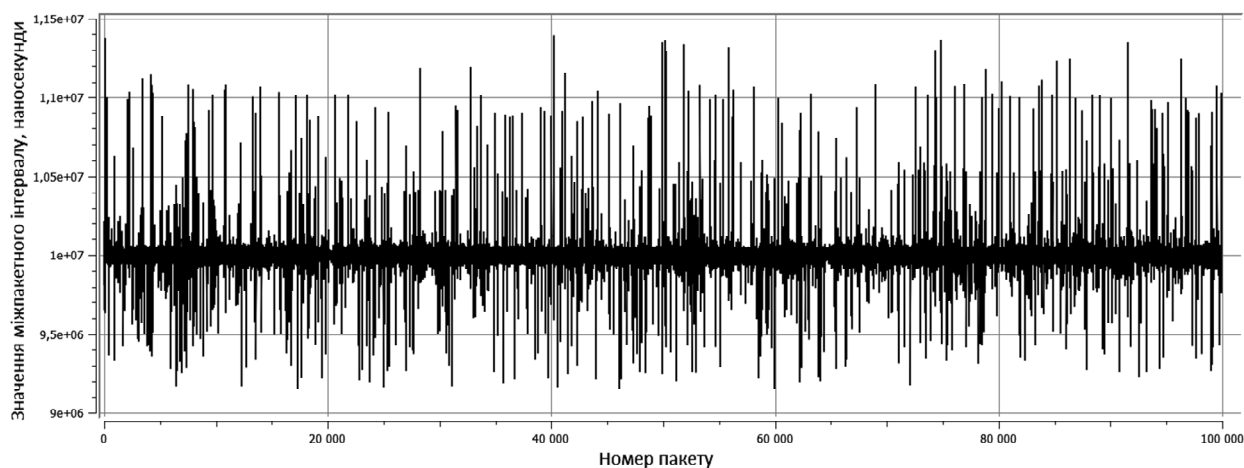


Рис. 1. Характеристика стабільності інтервалу між двома послідовно згенерованими пакетами

Той самий програмний маршрутизатор на серверах з різними апаратними характеристиками може обслуговувати пакети з різною затримкою. Для тестування максимальної продуктивності програмний маршрутизатор встановлено на апаратному сервері з такими параметрами: центральний процесор – Intel Core i5-2410M 2.30 GHz, оперативна пам'ять – DDR3 6 Gb, мережева карта – Realtek PCIe FE Family Controller 1 Gbit/s. На сервері встановлена операційна система Windows 7 Ultimate Service Pack 1.

Для дослідження максимальної продуктивності розробленого програмного маршрутизатора проведено серію експериментів. У кожному експерименті змінювався розмір пакета, кількість пакетів становила 100 000, а міжпакетний інтервал – 10 мс.

Таблиця 1

Дослідження середньої тривалості обробки пакета програмним комутатором на вибраному апаратному сервері

Серія, №	Розмір пакета, байт	Середня затримка, мкс
1	64	1,24
2	128	1,79
3	512	1,98
4	1024	2,12
5	2048	2,2

Методика визначення продуктивності програмного маршрутизатора

Оскільки тестування потребує введення маршрутизатора в режим перевантаження, то необхідно визначити максимальну продуктивність програмного маршрутизатора. Для дослідження вибрано два комп'ютери, апаратна конфігурація кожного з яких складається з 64-розрядного центрального процесора Intel i5-2410M, тактова частота якого становить 2,3 ГГц, та оперативної пам'яті типу DDR3, обсяг якої становить 6 ГБ, а частота – 1300 МГц. На обох комп'ютерах встановлена операційна система Microsoft Windows 7 Ultimate. На одному з комп'ютерів

встановлено генератор трафіку, який одночасно може приймати трафік і, отже, обчислювати різницю між моментами відправлення та отримання кожного пакета. За рахунок цього генератор обчислює тривалість проходження пакетів по мережі та їх оброблення на маршрутизаторі. Структурна схема експерименту відображена на рис. 2.

У першому тесті задано потік пакетів, за якого маршрутизатор нормально функціонує. У кожному наступному тесті інтенсивність потоку збільшувалася, і так до того моменту, коли почали формуватися черги, які істотно впливають на затримку пакетів. Вибране значення розміру вхідного буфера програмного маршрутизатора становить 24 пакети.

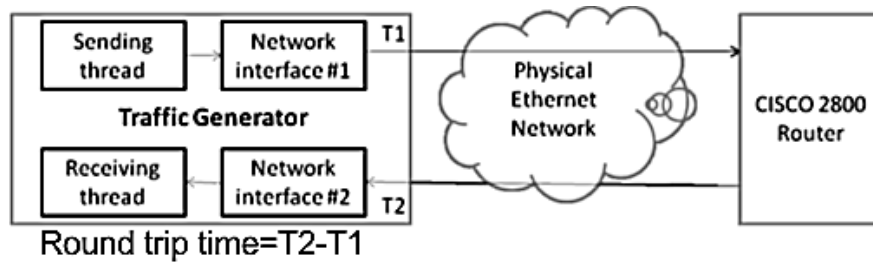


Рис. 2. Схема проведення експерименту для визначення продуктивності програмного маршрутизатора

Для першого тесту вибрані такі параметри потоку: розмір пакетів – 1460 байт та міжпакетна затримка 1,25 мс. В результаті інтенсивність згенерованого потоку становила 800 пакетів за секунду. Часова характеристика інтенсивності згенерованого потоку відображена на рис. 3.

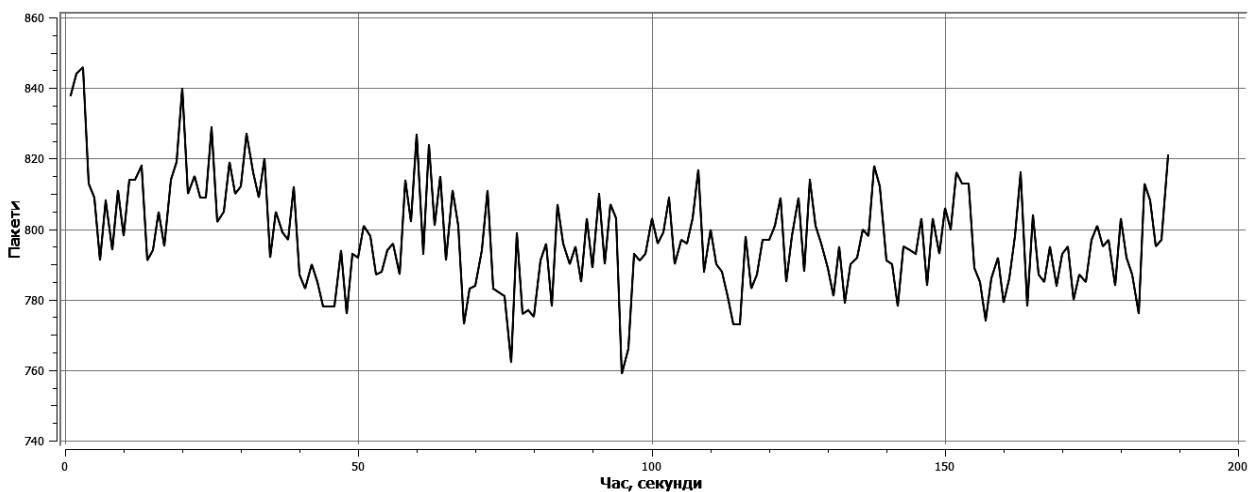
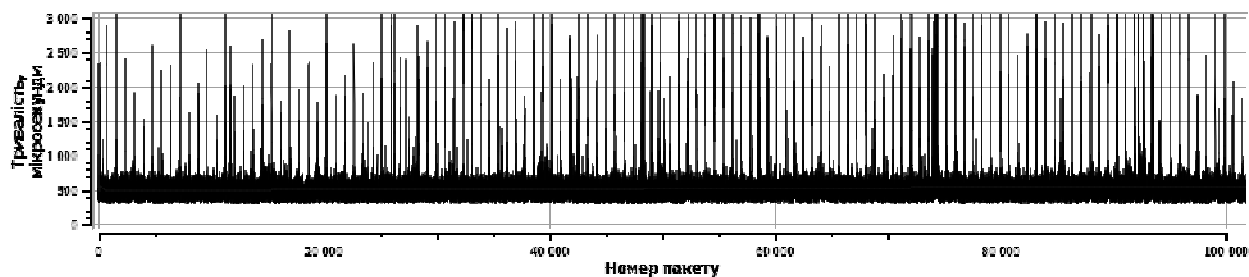


Рис. 3. Часова характеристика інтенсивності згенерованого потоку з параметрами: розмір пакета – 1460 байт, міжпакетний інтервал – 1,25 мс

Як видно з графіка на рис. 3, хоча інтенсивність згенерованого потоку не є стабільною і характеризується розмахом значень, що становить близько 40 пакетів, середнє значення все ж становить 800 пакетів за секунду. Така нестабільність виникає внаслідок багатопотоковості та особливостей реалізації операційної системи.

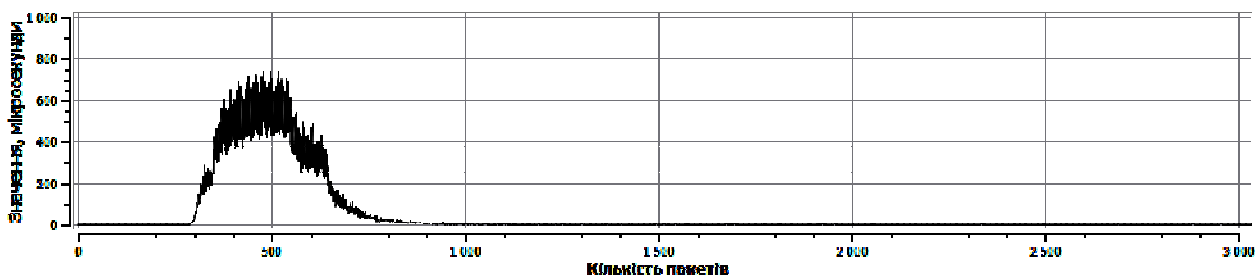
На рис. 4 представлені графіки, що відображають ряд значень часу проходження петлі усіма пакетами потоку та частота розподілу цих значень за кількістю.

Аналізуючи отримані графіки, можна сказати, що середнє значення обігу петлі становить 544 мкс, а розмах значень не перевищує 400 мкс. Отже, маршрутизатор функціонував у нормальному режимі, у якому не відбувалося формування черг та не було втрат – тобто без перевантаження.

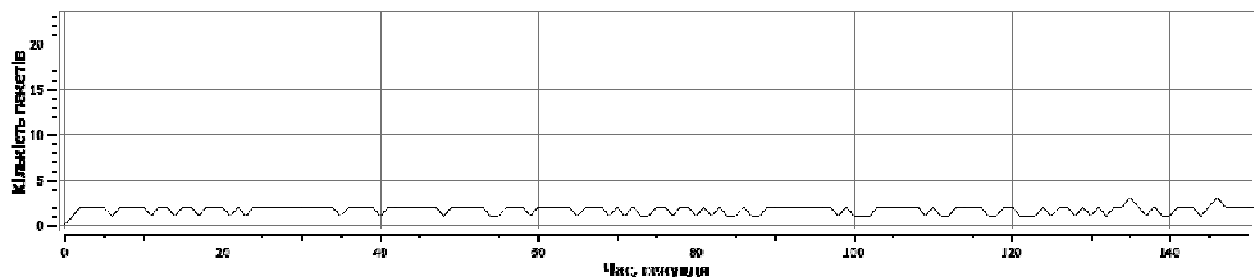


RTT Середнє значення: 594,536 мкс; Стандартне відхилення: 499,933 мкс;
 Дисперсія: 0,753, 963 мкс;
 Точність середнього значення: 1,746,44%

а



б



в

Рис. 4. Характеристика тривалості затримки пакетів згенерованого потоку:
 а – ряд значень тривалості обігу петлі; б – розподіл цих значень за частотою появи; в – завантаженість буфера

Результати проведення подальших тестів відображено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати дослідження продуктивності програмного маршрутизатора

Середня інтенсивність потоку, пакетів за секунду	Середній час обігу петлі, мс	Втрати, %	Середня довжина черги, пакетів
800	0,544	0	1
1000	0,568	0	2
1175	0,560	0	2
1400	0,530	0	5
1750	0,745	0	8
1925	1,273	0	9
1975	5,370	7	15
2375	11,897	15	24

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що максимальна продуктивність програмного маршрутизатора на вибраних апаратній та програмній платформах становить 1925 пакетів за секунду під час реалізації алгоритму обслуговування черг FIFO.

Оцінка точності та адекватності імітаційної моделі програмного маршрутизатора рівня агрегації

Експеримент з одним апаратним та програмним маршрутизатором

Для підтвердження адекватності моделі в роботі проведено експеримент з порівняння тривалостей оброблення пакетів з використанням апаратного (серії CISCO 2800) маршрутизатора та розробленого програмного.

Протягом 30 хвилини (50000 пакетів) велося спостереження за інтенсивністю вхідного трафіку на інтерфейс маршрутизатора серії CISCO 2800 (схема проведеного дослідження зображена на рис. 5). В режимі реального часу побудовано графіки, що відображають ряд значень тривалості обігу петлі усіма пакетами потоку та густину розподілу цих значень. Одночасно мережевим аналізатором Wireshark фіксувалась фрагментація, групування пакетів переданого інформаційного потоку та підтвердження їх доставки. Було зафіксовано значення часової затримки під час фрагментації та групування пакетів. Використання програми Wireshark дало змогу спостерігати за процесом передавання даних через маршрутизатор на мережевому рівні з виявленням пакетів сигналізаційних даних та фіксуванням мережевих аномалій, які впливають на часові параметрів якості обслуговування трафіку реального часу.

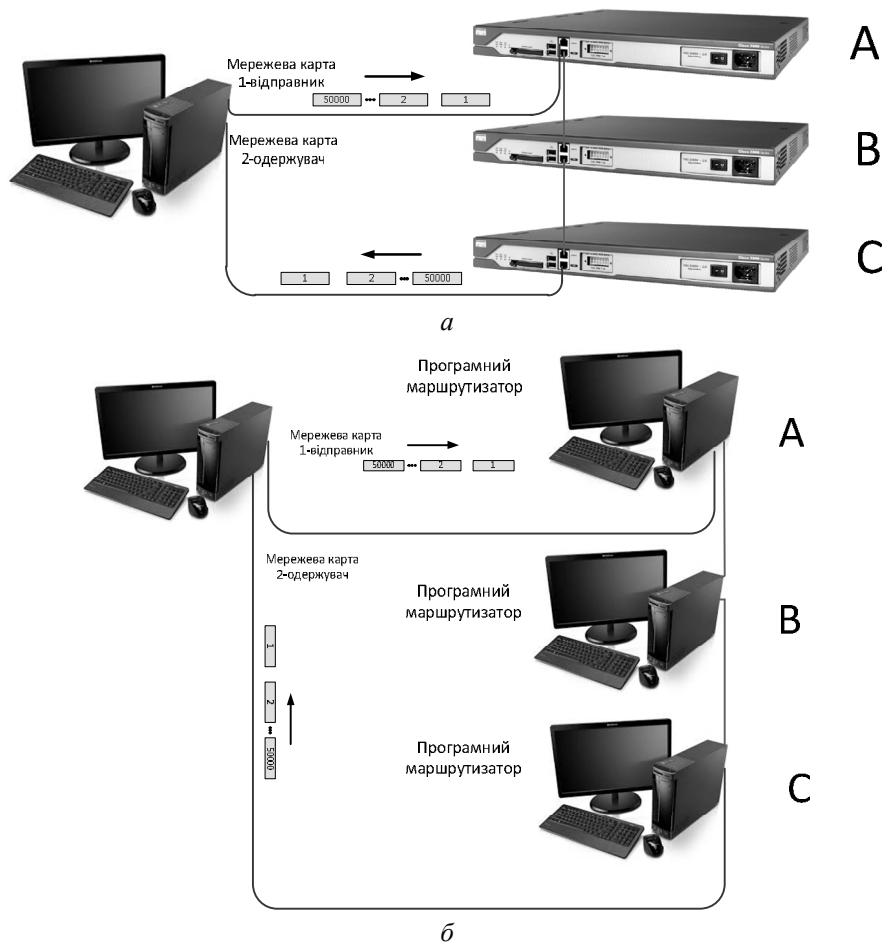


Рис. 5. Схема проведення експерименту для визначення тривалості оброблення пакетів:
а – апаратним маршрутизатором; б – програмним маршрутизатором

Для оцінки значень часової затримки пакетів, внесеної маршрутизатором CISCO 2800, проведено експеримент, коли інформаційний потік проходив через маршрутизатори А, А-В та А-В-С.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність апаратному маршрутизатору серії CISCO 2800 результатів, отриманих у ході імітаційного моделювання програмного маршрутизатора.

Середнє значення тривалості затримки пакетів у апаратному маршрутизаторі А становить 695.91 мкс, а у програмному – 693.47 мкс (рис. 8) під час оброблення того самого інформаційного

поток. Як бачимо, похибка розробленого програмного маршрутизатора становить 2.44 мкс. Достовірність отриманих результатів підтверджується порівнянням розподілів затримок (рис. 9).

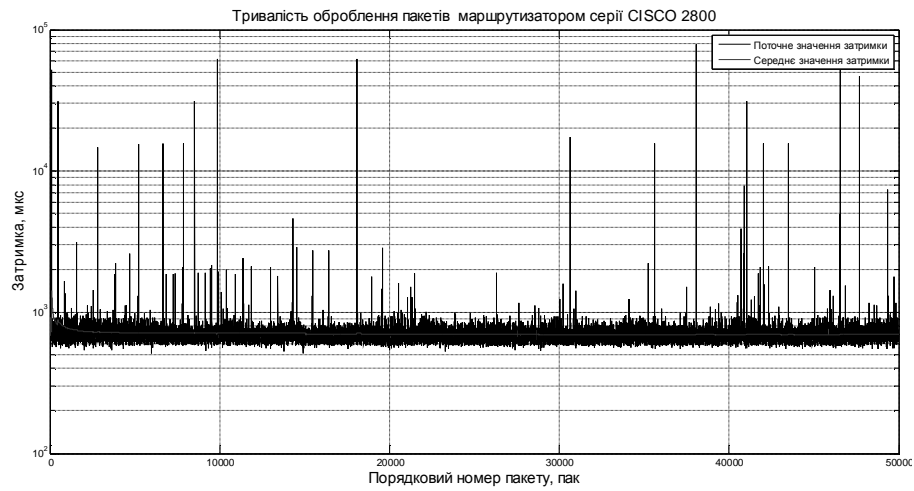


Рис. 6. Ряд значень тривалості затримки пакетів у маршрутизаторі серії CISCO 2800

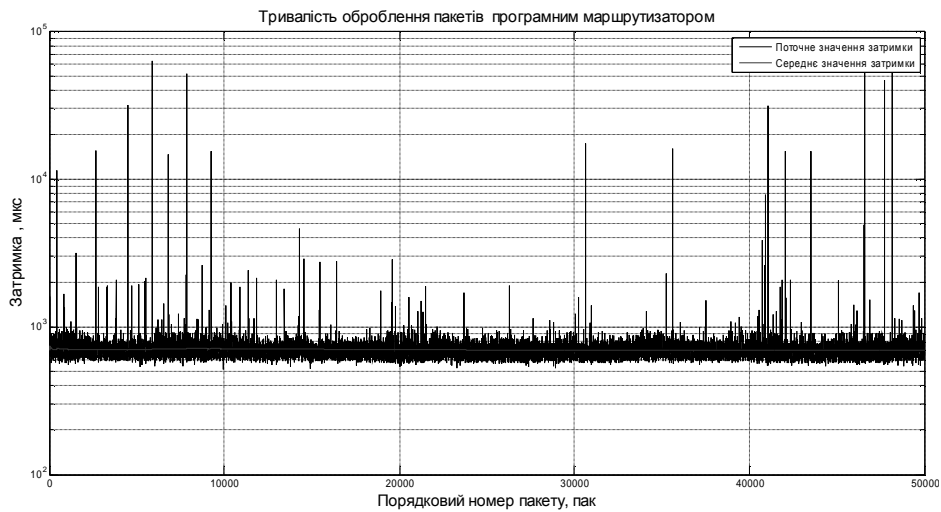


Рис. 7. Ряд значень тривалості затримки пакетів у програмному маршрутизаторі

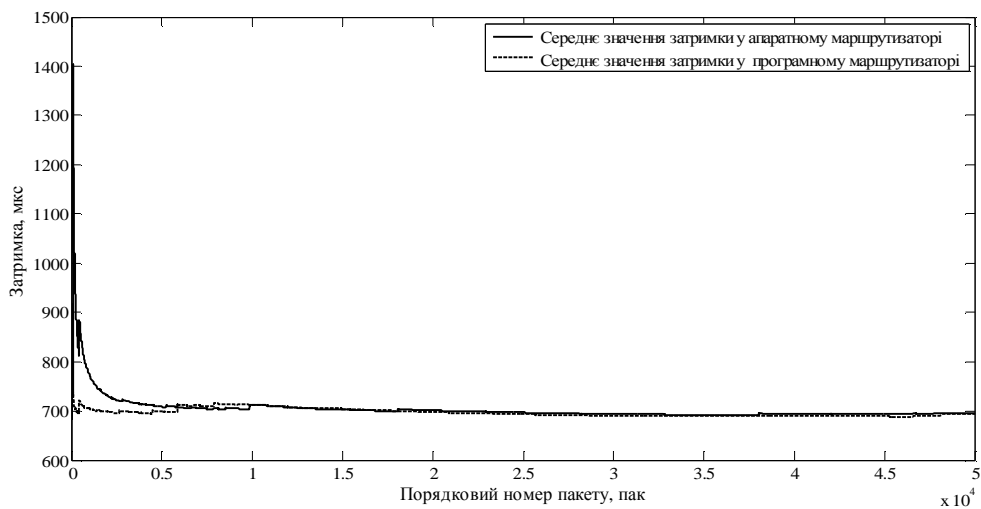


Рис. 8. Порівняння середніх значень тривалостей оброблення пакетів програмним та апаратним маршрутизаторами

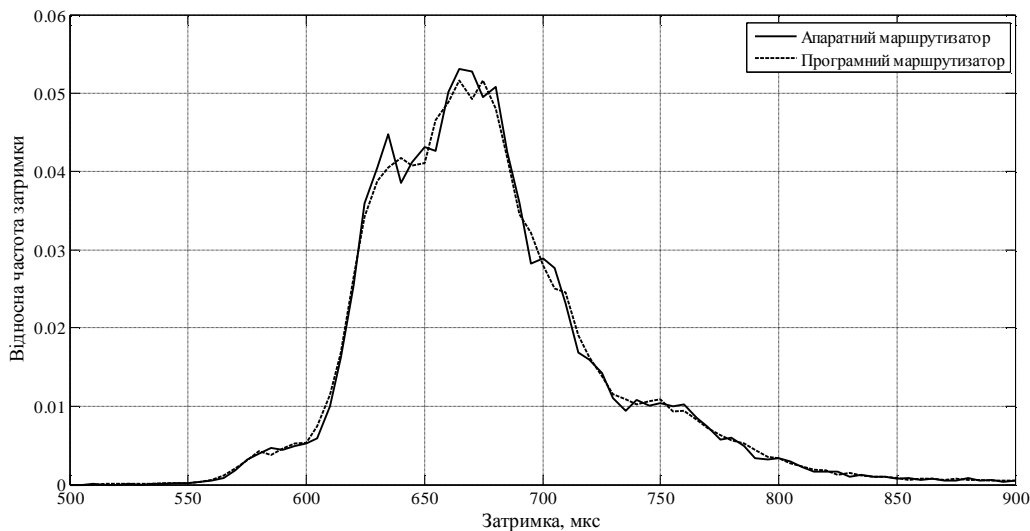


Рис. 9. Порівняння густини розподілу тривалостей оброблення пакетів апаратним та програмним маршрутизатором

Експеримент з двома апаратними та програмними маршрутизаторами

Для дослідження часової затримки у маршрутизаторах А-В в експерименті утворено мережу з двох маршрутизаторів CISCO 2800 та підключеного до них генератора трафіку, встановленого на персональному комп'ютері із двома мережевими картами для обчислення різниці між моментами відправлення та отримання кожного пакета.

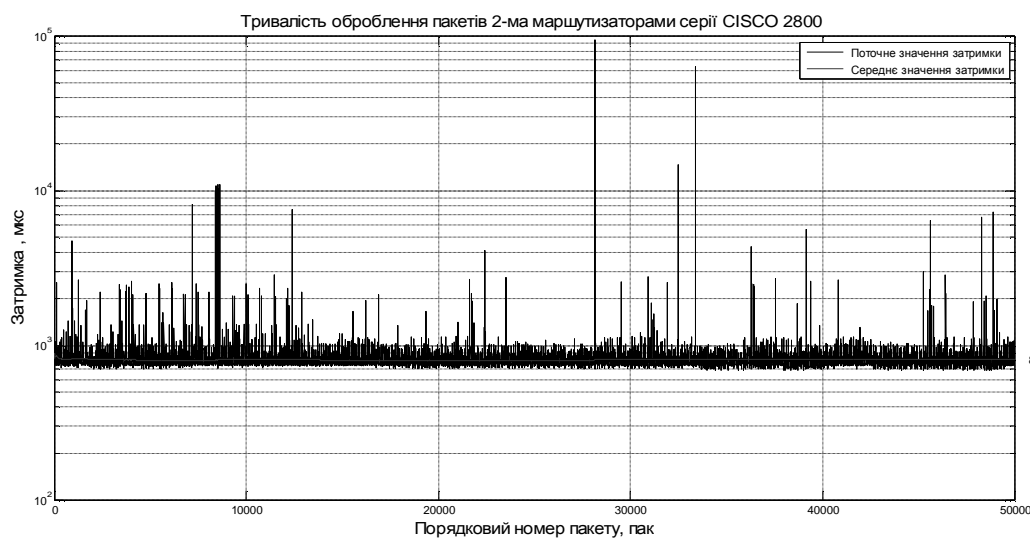


Рис. 10. Ряд значень тривалості затримки пакетів у двох маршрутизаторах серії CISCO 2800

В експериментальному дослідженні встановлено, що у процесі передавання цього ж трафіку через два апаратні маршрутизатори середня тривалість оброблення пакетів становить 805.4 мкс, відповідно тривалість оброблення пакетів двома програмними маршрутизаторами становить 803.46 мкс (рис. 12). Як бачимо, похибка становить 1.94 мкс, що співвідноситься із першим експериментом.

Проте потрібно зосередити увагу на середніх значеннях затримок пакетів у першому і другому досліді, оскільки значення затримки, внесені апаратними маршрутизаторами під час проведення другого досліді, відрізняються на $805.4 - 695.91 = 109.49$ мкс. В результаті встановлено, що затримка одним маршрутизатором серії CISCO 2800 становить 109,49 мкс, а затримка 586,42 вноситься операційною системою комп'ютера та залежить від його продуктивності.

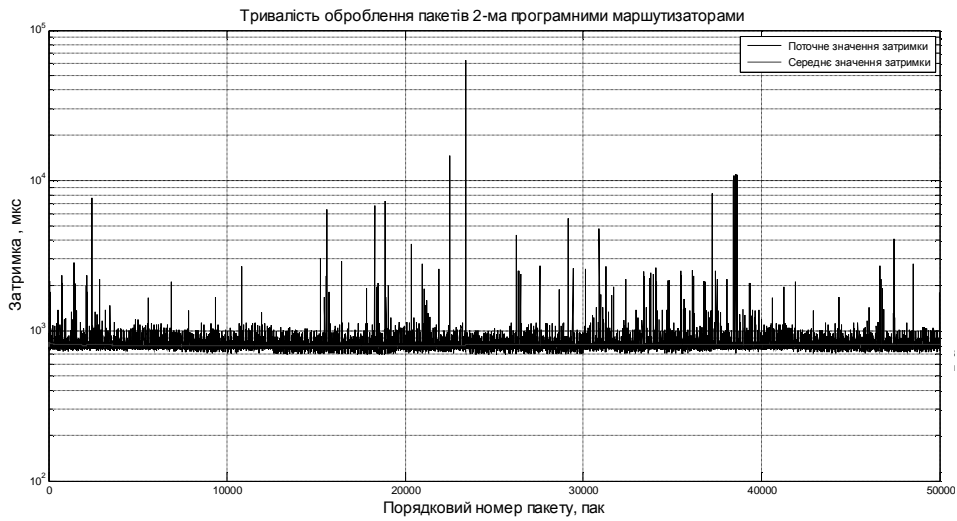


Рис. 11. Ряд значень тривалості затримки пакетів у двох програмних маршрутизаторах

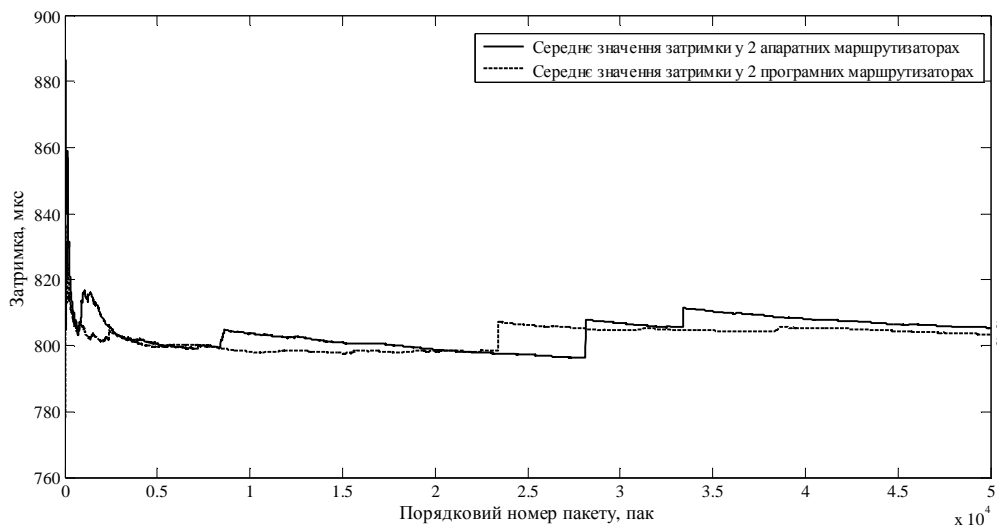


Рис. 12. Порівняння середніх значень тривалостей оброблення пакетів двома програмними та апаратними маршрутизаторами

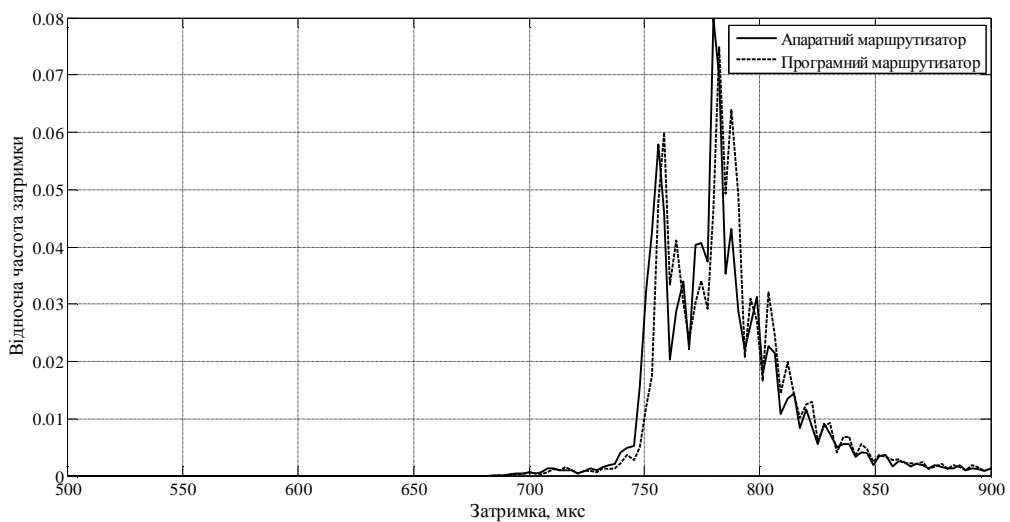


Рис. 13. Порівняння густини розподілу тривалостей оброблення пакетів двома апаратними та програмними маршрутизаторами

Коли дослід проводився на менш потужному персональному комп'ютері з одноядерним процесором частотою 2.4 ГГц та з 1 Гб RAM, системна затримка зростає у 1,8 разу. З рис.13 бачимо, що функція густини розподілу тривалостей оброблення пакетів програмними маршрутизаторами наближається до функції густини розподілу тривалостей оброблення пакетів апаратними маршрутизаторами серії CISCO 2800.

Експеримент з трьома апаратними та програмними маршрутизаторами

Для точнішої оцінки тривалості оброблення пакетів реальним маршрутизатором та визначення часової затримки з кінця в кінець проведено експеримент з використанням трьох маршрутизаторів, через які проходив згенерований інформаційний потік. Мережу налаштовано в лабораторії 215 XI навчального корпусу Національного університету "Львівська політехніка". Маршрутизатори сконфігуровано через консоль у режим функціонування із застосуванням алгоритму обслуговування черг FIFO. Після налаштування мережі проводилося спостереження за тривалістю оброблення пакетів протягом 30 хв.

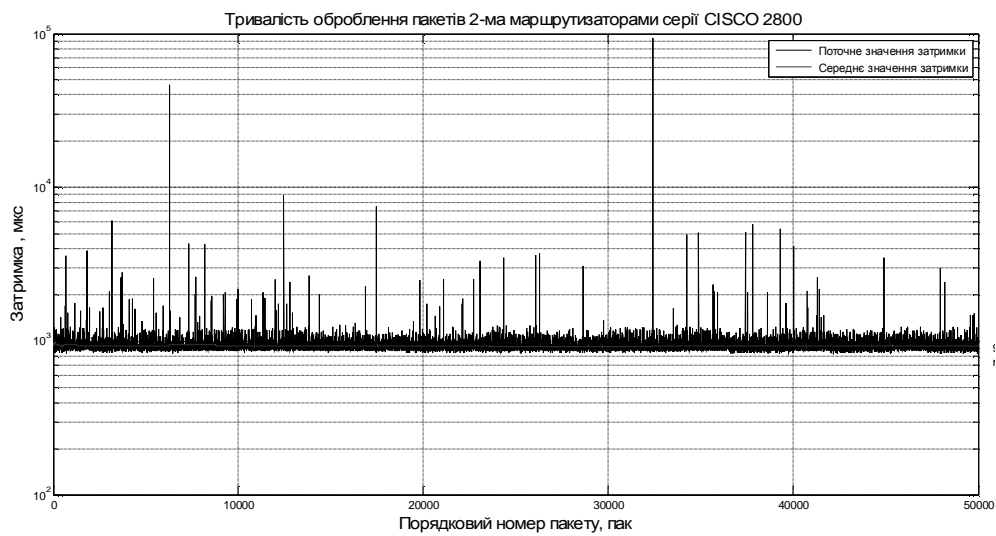


Рис. 14. Ряд значень тривалості затримки пакетів трьома маршрутизаторами серії CISCO 2800

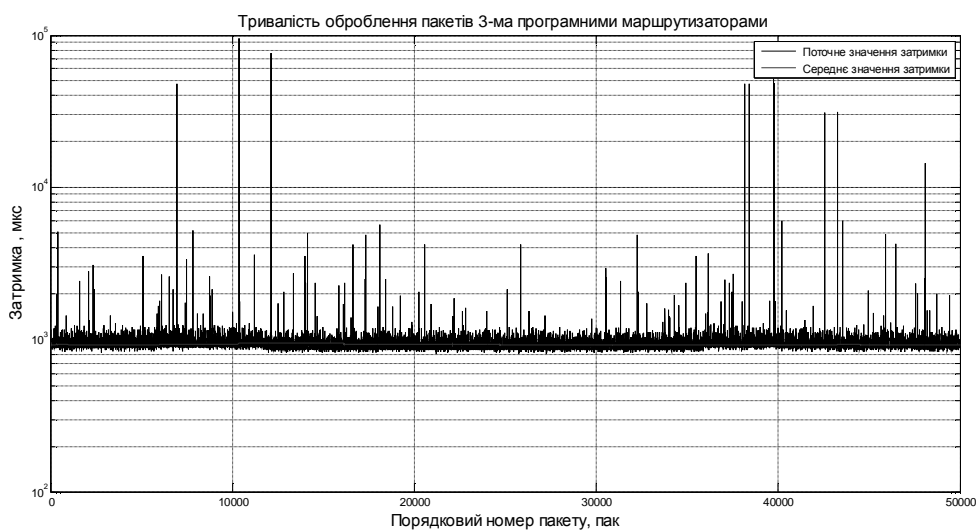


Рис. 15. Ряд значень тривалості затримки пакетів трьома програмними маршрутизаторами

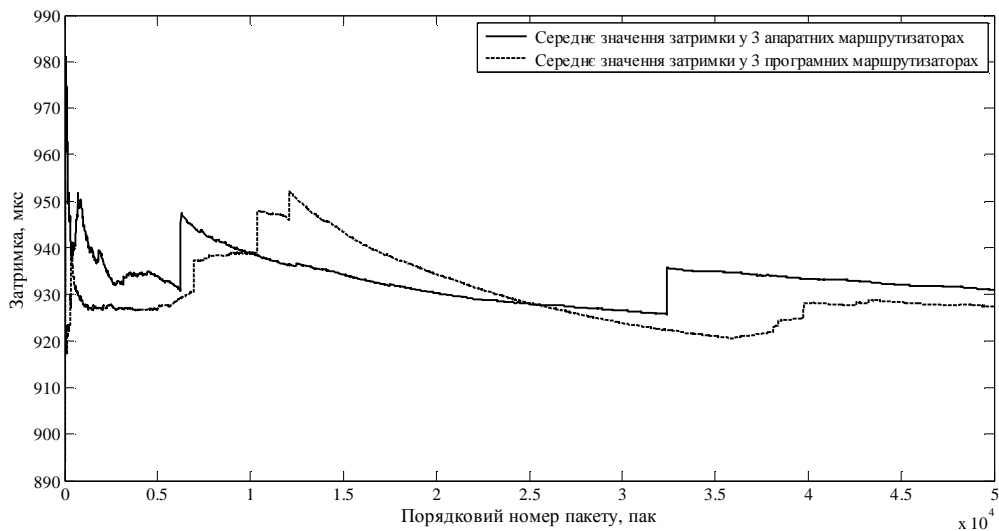


Рис. 16. Порівняння середніх значень тривалостей оброблення пакетів трьома програмними та апаратними маршрутизаторами

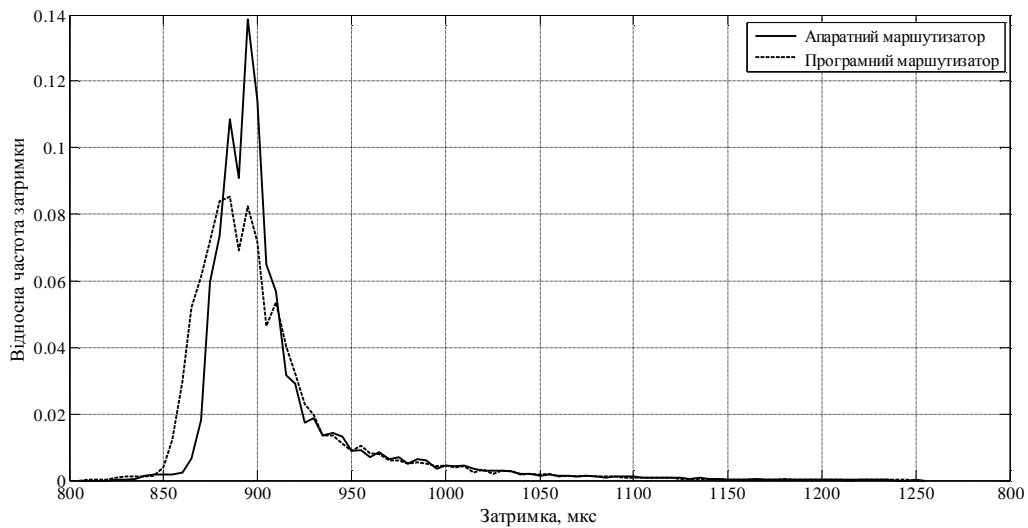


Рис. 17. Порівняння густини розподілу тривалостей оброблення пакетів трьома апаратними та програмними маршрутизаторами

Середні значення тривалостей затримки пакетів апаратними маршрутизаторами – 930,97 мкс, програмними – 927,4 мкс. Похибка становить 3,57 мкс. Густина розподілу тривалостей оброблення пакетів програмними маршрутизаторами наближається до густини розподілу тривалостей оброблення пакетів реальними маршрутизаторами. Середню тривалість затримки пакетів апаратними маршрутизаторами під час проведення трьох експериментів визначено як

$$T_{cp} = \frac{(T_{(A-B)_2} - T_{(A)_1}) + (T_{(A-B-C)_3} - T_{(A-B)_2})}{2}.$$

Підставивши отримані значення у цю формулу, отримаємо $T_{cp} = ((805,4 - 695,91) + (930,97 - 805,4))/2 = 117,53$ мкс.

Висновки

У статті проведено дослідження процесу обслуговування мультимедійних інформаційних потоків апаратним та програмним маршрутизаторами для підтвердження адекватності розробленої моделі останнього. Визначено максимальну продуктивність програмного маршрутизатора у режимі

без утворення черг з метою формування вхідних тестових інформаційних потоків, які призводять до формування черг у маршрутизаторі, які суттєво впливають на затримку пакетів. Підтвердження адекватності здійснено на основі порівняння тривалостей затримки пакетів у програмному та апаратному маршрутизаторах. Для підвищення точності оцінок затримки проведено експеримент із двома та трьома маршрутизаторами. На підставі проведених досліджень визначено затримку формування потоку програмним генератором та її частку в тривалості обігу петлі окремим пакетом. Встановлено, що максимальне відхилення тривалості затримки пакетів програмним маршрутизатором від апаратного не перевищує 0,4 % за однакових умов проведення експерименту. Аналіз густини розподілу тривалостей затримки, внесеної апаратним та програмним маршрутизаторами, підтверджує адекватність розробленої моделі.

1. Чернихівський Є. М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж: навч. посіб. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 272 с. 2. Евсеєва О. Ю. Методика експериментального дослідження методів управління трафіком в мережі [Електронний ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2011. – № 3 (5). – С. 89–104. – Режим доступу до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_yevseyeva_experiment.pdf. 3. Beshley M. Increasing the efficiency of real-time content delivery by improving the technology of priority assignment and processing of IP traffic / M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Lavriv, V. Chervenets, H. Kholiavka, and M. Klymash // Smart Computing Review, vol. 5, no. 2, April 2015. PP. 1–13. 4. Demydov Ivan Analysis of service workflows distribution and service delivery platform parameters / Ivan Demydov, Orest Lavriv, Yuriy Dobush, Bohdan Buhyl and Mykhailo Klymash // Int. J. Services, Economics and Management, Vol. 5, No. 4, 2013. – P. 280–290. 5. Лаврів О.А. Дослідження якості надання послуг абонентам мобільного зв'язку в IMS-мережі / О. А. Лаврів, М. І. Бешлей, Б. А. Бугиль // Національна академія наук України. Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова: зб. наук. праць. – Київ, 2012. Вип. 65. – С. 132–140. 6. Beshley M. SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets / M. Beshley, M. Klymash, B. Strykhalyuk, O. Shpur, B. Bugil, I. Kagalo // International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE). – 2015. – Volume 4. – Issue 1. – P. 10–21. 7. Beshley M. Research and development the methods of quality of service provision in mobile cloud systems / M. Beshley, T. Maksymyuk, B. Stryhaluk, M. Klymash // International Black Sea Conference on Communications and Networking IEEE BlackSeaCom'2014 (Odessa, Ukraine – Chisinau, Moldova, May 27–30), 2014. – P. 163–169. 8. Климаш М. М. Вдосконалення методів та алгоритмів управління інформаційними потоками в конвергентних телекомунікаційних мережах / М. М. Климаш, М. І. Бешлей, І. О. Кагало, Л. М. Готра // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки: матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конф. (23–25 жовтня 2014 р. м. Чернівці), 2014. – С. 106–107. 9. Beshley M. M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network test bed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko, A. Masiuk // Proceedings of XIIIth international conference “The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics” CADSM'2015 (24–27 February, Lviv–Poljana, Ukraine), 2015. – P. 1–4. 10. Стрихалюк Б. М. Дослідження статистичних параметрів та характеристик інформаційних потоків в гетерогенних мережах / Б. М. Стрихалюк, І. В. Демидов, В. І. Романчук, М. І. Бешлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. – № 6(34) – С. 82–92.