

А.Л. Литвинов, В.М. Бредіхін, Д.В. Дегтяр

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВУЗЛА КОМУТАЦІЇ МЕРЕЖІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З КОМУТАЦІЄЮ ПАКЕТІВ

Розроблено модель функціонування вузла комутації мережі передачі даних з комутацією пакетів у дейтаграмному режимі як система масового обслуговування. Особливістю моделі є кілька вхідних потоків заявок, кілька обслуговуючих пристроїв і загальний буфер. Виведено систему рівнянь для ймовірностей станів та основні характеристики функціонування залежно від інтенсивності надходження пакетів та швидкості їх обробки.

Ключові слова: мережа передачі даних, вузол комутації, модель масового обслуговування, ймовірність втрати

Постановка проблеми

Мережі передачі даних з розбиттям їх на пакети – це такі системи, де кілька джерел одночасно можуть передавати свої повідомлення по мережі. Повідомлення розбиваються на більш дрібні фрагменти, іменовані пакетами, і відправляються по мережі від одного комутаційного вузла до іншого незалежно один від одного, у так званому дейтаграмному режимі. Кожен пакет містить службову інформацію, де вказано адреса його джерело, адреса приймача та контрольна сума. Для кожного пакета може формуватися свій маршрут передачі по мережі. Одержувачі потім збирають оригінальні повідомлення із цих пакетів. У таких системах кілька джерел та одержувачів можуть обмінюватися даними через одну фізичну лінію зв'язку. Використання пакетної комутації дозволяє найефективніше задіяти пропускну спроможність мережі. Тим не менш, якщо обсяг даних, що надходять від джерел, перевищує певну границю, що залежить від пропускну спроможності окремих сегментів мережі, у вузлах комутації виникають черги пакетів, що може призвести до затримок передачі і навіть втрати інформації [1]. У якості вузлів комутації використовуються комутатори і маршрутизатори. Головна особливість пакетних комутаторів, що застосовуються в мережах з комутацією пакетів, полягає в тому що пакети спочатку біт за бітом записуються у буферну пам'ять, де вони тимчасово зберігаються. Пакетний комутатор не може ухвалити рішення про просування пакета без розміщення його в пам'яті для наступної обробки. Кожен пакет забезпечується заголовком, у якому вказується адреса, необхідна доставки пакета вузлу призначення. Наявність адреси в кожному пакеті дає змогу комутатору

обробляти пакет незалежно від інших пакетів інформаційного потоку. Крім заголовка пакет має ще одне додаткове поле, в якому розміщується контрольна сума. Комутатор перевіряє контрольну суму, і тільки якщо вона свідчить про те, що дані пакета не спотворені, починає обробляти пакет та за адресою призначення визначає наступний приймач пакета. Тому кожен пакет послідовно біт за бітом міститься у вхідний буфер. Маючи на увазі цю властивість, кажуть, що мережі з комутацією пакетів використовують техніку збереження з просуванням (store-and-forward). В залежності від виду трафіка розмір пакету може бути різним. При передачі голосу розмір пакета може бути 64 байти, при передачі відео або текстової інформації розмір пакета може досягати 1500 байт і вище. Відповідно час обробки та комутації пакетів варіюється в широких межах, що зумовлює стохастичний характер функціонування вузлів комутації, для дослідження якого можна використовувати апарат теорії масового обслуговування.

Найбільш досліджуваними в теорії масового обслуговування є однолінійні системи з довільними потоками подій (G/G/1 в нотаціях Кендала) та багатолінійні системи з пуасонівськими потоками подій (M/M/n/1 в нотаціях Кендала) [2], але вони не враховують ситуації, коли на вхід системи надходять декілька потоків заявок і вони обробляються з різними інтенсивностями. Таким чином з аналізу особливостей функціонування вузлів комутації мереж передачі даних з комутацією пакетів випливає необхідність розробки моделей масового обслуговування, які враховують особливості їх функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Важливим інструментом при розробки мереж передачі є моделювання. За його допомогою можна розрахувати обсяг буферної пам'яті, розмір пакета, час затримки, ймовірність втрати пакетів. На практиці використовується як аналітичне, так і імітаційне моделювання. В роботі [3] використана аналітична модель на основі відкритої мережі черга G/G/m для оцінки часу відповіді програмних мережеслужб. Але не враховано особливості комутації пакетів. Стаття [4] присвячена застосуванню моделей мереж черг у формі потоку запитів для аналізу продуктивності мереж комутації пакетів з проміжним зберіганням. Також не врахована особливості комутації пакетів. Пост [5] фокусується на детальному опису механізму черг в сучасних мережеслужбах комутаторів. Гарно підходить для побудови їх моделей масового обслуговування, які враховують різні аспекти функціонування вузлів комутації. В роботі [6] розроблено модель багаторівневої локальної мережі, яка використовувалася для передачі даних у тригери другого рівня системи ATLAS Великого адронного колайдера. Ключовим компонентом мережеслужби моделі є модель окремого комутатора, що відтворює поведінку, вимірю у реальних пристроях. Невелика кількість параметрів, що вимірюються, використовується для моделювання різних комерційних комутаторів Ethernet. Використовуючи параметри, які були виміряні у реальних пристроях, моделюється їх вплив на загальну продуктивність мережі. Стаття [7] присвячена аналізу системи масового обслуговування G/G/1/K як моделі взаємодії протоколів, коли протокол CSMA/CA прийнято для керування рівнем MAC. Проведено масштабне моделювання, і результати показують, що запропонована модель масового обслуговування G/G/1/K перевершує M/M/1/K і G/G/1 за високого навантаження на мережу, при цьому забезпечує конкурентоспроможні результати, коли мережа мало завантажена. У роботі [8] викладено результати моделювання перспективного мережного комутатора, реалізованого на одному чипі. Як інструмент моделювання було обрано імітаційне на базі SystemC та Superlog. Моделювання проводилося в рамках проекту, метою якого було забезпечити максимальну пропускну здатність з урахуванням обмежень, що накладаються параметрами чіпа та забезпечити задану якість обслуговування (QoS). У [9] запропоновано обчислювальний інструмент для оцінки ймовірності тимчасових характеристик інфокомунікаційної мережі як показників якості при виборі ефективних проектних рішень. Для оцінки ймовірно-часових

характеристик інфокомунікаційних мереж застосовано імітаційне моделювання, що дозволяє врахувати динамічні та стохастичні аспекти їх функціонування. Запропоновано підхід до зниження розмірності імітаційної моделі, що ґрунтується на декомпозиції інфокомунікаційної мережі на безлічі віртуальних каналів. Показано, що застосування об'єктного підходу дозволяє будувати варіації структур та параметрів віртуального каналу, що відповідають реальним сегментам інфокомунікаційної мережі. У статті [10] було проаналізовано продуктивність комутатора ATM, що використовує архітектуру MCTG на основі моделі черги dAI/D/c/~ з дискретним часом. Для вхідного трафіку із загальним розподілом масового розміру було розглянуто випадки як нескінченного, так і кінцевого буфера. Виявилося що як вихідна черга, так і повна спільна буферизація досягають оптимальної продуктивності затримки в комутаторі ATM з одноканальними групами передачі. Затримку у комутаторі та/або ймовірність втрати можна додатково зменшити за допомогою запропонованої архітектури MCTG у комутаторі ATM із частково спільними вихідними буферами.

З проведеного аналізу випливає, що теорія ймовірного моделювання процесів функціонування вузлів комутації мереж передачі даних з комутацією пакетів розвита не повно. Наприклад нема досліджень про функціонування комутаторів із загальним буфером для проміжного зберігання пакетів потоку інформації.

Мета та завдання статті

Продуктивність мереж передачі даних з комутацією пакетів в значній мірі залежить від продуктивності роботи вузлів комутації та їх ефективності. Мета статті є дослідження продуктивності вузлів комутації мереж передачі даних з декількома вхідними потоками та загальним буфером для проміжного зберігання пакетів потоку інформації.

В процесі виконання дослідження вирішуються наступні завдання:

- проаналізувати наукові підходи та існуючі методики щодо аналізу функціонування вузлів комутації мереж передачі даних;
- розробити математичну модель процесу функціонування вузла комутації на прикладі мережеслужби комутатора та дослідити її.

Виклад основного матеріалу

Досліджується процес функціонування вузла комутації на прикладі мережеслужби комутатора, на який поступають потоки пакетів інформації з вхідних каналів. При цьому пакети, що надходять обробляються на спеціалізованих процесорах.

Для підвищення ефективності обробки інформації використовується загальний буферний запам'ятовуючий пристрій асоціативного типу, який виконує функції прийому пакетів від вхідних каналів, сортування, тимчасового зберігання та видачі на відповідний процесор. Пакети, що поступають з j -го вхідного каналу ($j = 1, 2, \dots, m$) утворюють j -й інформаційний потік. Будемо вважати інформаційні потоки в системі стаціонарними і незалежними, а обсяг асоціативної пам'яті обмеженим і рівним N . В якості моделі функціонування системи можна використовувати п-лінійну систему масового обслуговування (СМО) з числом місць очікування N , заявками в якій є повідомлення, що утворюють m вхідних потоків запитів n видів (по числу спеціалізованих процесорів), причому запити є орієнтованими, тобто повинні стати предметом обробки на відповідних процесорах.

Інтенсивності надходження пакетів до процесорів обробки описуються наступною матрицею надходжень

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix},$$

де елементами є середні числа заявок j -го виду, які поступають до системи у складі i -го потоку в одиницю часу. Припускаючи порядок приходу заявок у кожному потоці випадковим, можна використовувати теорему для рідючих потоків [2], в силу якої потік заявок, що утворюється в результаті випадкового розрядження деякого вихідного стаціонарного потоку, прагне до пуасонівського зі збільшенням числа розрядження. Тоді можна стверджувати, що потік заявок j -го виду, які надійшли у складі i -го порядку буде за формою ближчий до пуасонівського, ніж весь i -й потік.

Підсумовуючи однойменні потоки заявок, що надходять у складі всіх вхідних потоків, отримаємо систему масового обслуговування з n вхідними потоками запитів на обслуговування. В силу граничної теореми [2] сумарний потік буде пуасонівським і його інтенсивність дорівнює сумі інтенсивності складових потоків, тобто

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^m f_{ij}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Як результат отримали марківську багатолінійну систему масового обслуговування з загальним буфером кінцевого обсягу на N запитів, пуасонівськими вхідними і обслуговуваними потоками з функцією розподілу

$$B_i(t) = 1 - \exp(-\mu_i t), i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

Її поведінку для наочності можна зобразити графом станів і переходів. Нехай $n = 2, N = 3$. Позначимо через $S_{ij}, i = \overline{0,4}, j = \overline{0,4}$, що в системі знаходиться i заявок першого виду і j заявок другого виду. Відповідний граф станів і переходів представлений на рис. 1.

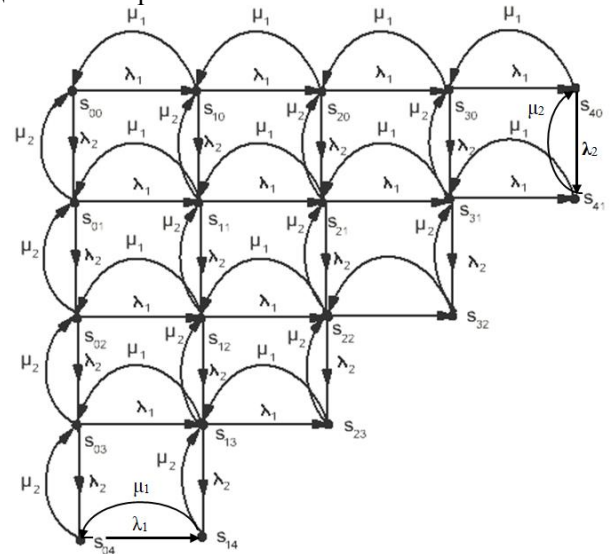


Рис. 1. Граф поведінки системи при $n = 2, m = 3$

Позначимо через $S_{ij}, \dots, kr..$ стани системи, коли в ній знаходяться i запитів першого виду, j запитів другого виду, ..., r запитів n -го виду, і $p_{ij}, \dots, kr..$ відповідні ймовірності стаціонарних станів. Їм відповідає система лінійних рівнянь

$$\begin{aligned} -p_{i,j,\dots,kr} \sum_{i=1}^n (\lambda_i + \mu_i) + \lambda_1 p_{i-1,j,\dots,kr} + \lambda_2 p_{i,(j-1),\dots,kr} + \dots \\ + \lambda_n p_{i-1,j,\dots,k(r-1)} + \mu_1 p_{i+1,j,\dots,kr} + \mu_2 p_{i,(j+1),\dots,kr} + \dots \\ + \mu_n p_{i,j,\dots,k(r+1)} = 0, \\ i = 0, 1, \dots; j = 0, 1, \dots, N - i; \dots; \\ r = 0, 1, \dots, N - i - j - \dots - k, \end{aligned} \quad (3)$$

при умові

$$p_{i,j,\dots,kr} = 0, \text{ при } N < i, j, \dots, r < 0.$$

Систему рівнянь (3) потрібно доповнити наступною умовою

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} \dots \sum_{r=0}^{N-i-j-\dots-k} p_{i,j,\dots,kr} = 1. \quad (4)$$

При розв'язку системи рівнянь (3) і (4) потрібно брати до уваги, що ймовірнісні події взаємонезалежні і підпорядковується геометричному розподілу.

Позначимо через $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$ завантаження системи запитами i -го виду класу.

Тоді можна записати

$$p_{(i+a)(j+b)\dots(k+c)(r+d)} = \rho_1^a \rho_2^b \dots \rho_{n-1}^d p_{i,j,\dots,kr}, i = 1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

$$a, b, \dots, d = 0, 1, \dots,$$

Коли $n = 2$ розв'язок рівнянь (3), (4) з урахуванням (5) має вид:

$$p_{ij} = \frac{(1-\rho_1)(1-\rho_2)(\rho_2-\rho_1)\rho_1^{i+1}\rho_2^{j+1}}{(1-\rho_1^{N+1}-\rho_2^{N+1})(\rho_2-\rho_1)-(1-\rho_2)\rho_1^2\rho_2^{N+1}+(1-\rho_1)\rho_1^{N+1}\rho_2^2}$$

Використовуючи отримані ймовірності станів, можна знайти основні показники функціонування вузла комутації системи передачі даних. Так, функція розподілу часу очікування для пакетів з першого каналу має вид:

$$W_1 = \frac{(1-\rho_1)(\rho_2-\rho_1) \left[1 - \rho_2^{N+2} + \sum_{i=1}^{N+1} \rho_1^{i+1} (1 + \rho_2^{N-i+2}) \times \left(1 - \sum_{k=0}^i \frac{(\mu_1 x)^k}{k!} e^{-\mu_1 t} \right) \right]}{(1-\rho_1^{N+2}-\rho_2^{N+2})(\rho_2-\rho_1)-(1-\rho_2)\rho_1^2\rho_2^{N+2}+(1-\rho_1)\rho_1^{N+2}\rho_2^2}$$

Ймовірність втрати пакетів можна обчислити за наступною формулою:

$$P_{vidm} = p_{dN} + p_{N0} + \sum_{i=0}^N p_{i,N-i} \quad (6)$$

Коли всі процесори вузла комутації будуть мати рівне навантаження ($\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_n = \rho$), то ймовірності станів будуть мати більш простий вид:

$$p_{ij} = \frac{(1-\rho^2)\rho^{N+2}}{(1-\rho^{N+1})((2+N\rho)-(N+1)\rho^2)} \dots \quad (7)$$

Відповідно ймовірність втрати пакетів дорівнює:

$$P_{vidm} = \frac{(N+2)(1-\rho^2)\rho^{N+2}}{(1-\rho^{N+1})((2+N\rho)-(N+1)\rho^2)} \quad (8)$$

Висновки

На рис. 2 зображений графік залежності ймовірності втрати пакетів залежно від обсягу буфера та інтенсивності надходження пакетів у мільйонах кадрів на секунду. Видно що обсяг буфера меншою мірою впливає на ймовірність втрати пакетів ніж інтенсивність надходження пакетів. Ймовірність втрати пакетів різко зростає, коли інтенсивність надходження пакетів наближається до швидкості їх обробки.

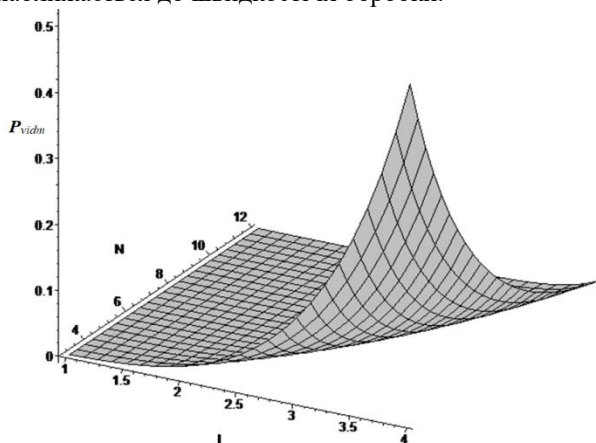


Рис. 2. Ймовірність втрати пакетів залежно від обсягу буфера та інтенсивності надходження пакетів

Література

1. Network Switches: What Are They and How Do They Work. URL. <https://www.coursera.org/articles/network-switches/>. (дата звернення: 07.02.2025).
2. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування : навч. посібник / А. Л. Литвинов. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 141 с.
3. Performance Modeling of Softwarized Network Services Based on Queuing Theory With Experimental Validation / J. Prados-Garzon, P. Ameigeiras, Juan J. Ramos-Munoz and others // IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021. – Vol. 20. – Pp. 1558-1573.
4. Wong J.W., Lam S.S. Queuing Network Models of Packet Switching Networks Part 1: Open Networks / J.W. Wong, S.S. Lam // Performance Evaluation, 1982. – №2(3). – Pp. 11–21.
5. Queuing Mechanisms in Modern Switches. URL. <https://blog.ipSPACE.net/2014/05/queuing-mechanisms-in-modern-switches/>. (дата звернення: 20.01.2025).
6. Testing and Modeling Ethernet Switches and Networks for Use in ATLAS High-level Triggers / R. W. Dobinson, S. Haas, K. Korcyl and others // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001. – Vol. 48(3). – Pp. 607–612.
7. Queuing modeling for delay analysis in mission oriented sensor networks under the protocol interference model. / PictureBowu Zhang, PictureWei Cheng, PictureLimin Sun and others // MiSeNet '13: Proceedings of the 2nd ACM annual international workshop on Mission-oriented wireless sensor networking.– 2013.– Pp. 11–20.
8. System-Level Modeling of a Network Switch SoC. / J.M. Paul, C.P. Andrews, A.S. Cassidy, D. E. Thomas // Proceedings of the 15th International Symposium on System Synthesis (ISSS 2002), October 2-4, 2002, Kyoto, Japan. – 2002. – Pp. 62–67.
9. Гуляев К.Л., Кантур К.Л., Степаненко О.В. Імітаційне моделювання процесу інформаційного обміну на базі мережної технології зі змінним розміром мережної адреси / К.Л. Гуляев, В.А. Кантур, О.В. Степаненко // Проблеми телекомунікацій, 2014. – № 3(15). – С. 86–94.
10. Lin Arthur Y. M., Silvester J. A. Queueing Analysis of an ATM Switch with Multichannel Transmission Groups / Arthur Y.M. Lin, J.A. Silvester // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. – 1990. Vol. 8, №. 1. – Pp. 96–105.

References

1. Network Switches: What Are They and How Do They Work. Retrieved from
2. Litvinov, A. L. (2018). Theory of mass service systems: Tutorial. Kharkiv: KHNUM named after O.M. Beketov. – 141 p.

3. Jonathan Prados-Garzon, Pablo Ameigeiras, Juan J. Ramos-Munoz, Jorge Navarro-Ortiz, Pilar Andres-Maldonado and Juan M. Lopez-Soler (2021). Performance Modeling of Softwarized Network Services Based on Queuing Theory With Experimental Validation. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 20, 1558-1573.

4. Wong, J.W. & Lam S.S. (1982). Queuing Network Models of Packet Switching Networks Part 1: Open Networks. *Performance Evaluation*, №2(3), 11 – 21.

5. Queuing Mechanisms in Modern Switches. Retrieved from <https://www.coursera.org/articles/network-switches/>.

6. Dobinson, R.W., Haas, S., Korcyl, K., LeVine, M.J., Lokier, J. and Martin, B. (2001). Testing and Modeling Ethernet Switches and Networks for Use in ATLAS High-level Triggers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 48(3), 607 – 612.

7. PictureBowu Zhang, PictureWei Cheng, PictureLimin Sun, Mznah A. Al-Rodhaan. (2013). Queuing modeling for delay analysis in mission oriented sensor networks under the protocol interference model. *MiSeNet '13: Proceedings of the 2nd ACM annual international workshop on Mission-oriented wireless sensor networking*, 11 – 20.

8. Paul, J.M., Andrews, C.P., Cassidy, A.S. and Thomas, D.E. (2002). System-Level Modeling of a Network Switch SoC. *Proceedings of the 15th International Symposium on System Synthesis (ISSS 2002)*, October 2-4, 2002, Kyoto, Japan, 62 – 67.

9. Gulyaev K.L., Kaptur K.L. and Stepanenko O.V. (2014). Simulation modeling of the information exchange process based on network technology with

variable network address size. *Problems of telecommunications*, № 3(15), 86 – 94.

10. Arthur Y. M. Lin & John A. Silvester (1990). Queueing Analysis of an ATM Switch with Multichannel Transmission Groups. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, Vol. 8, №. 1, 96 – 105.

Рецензент: д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій О. Є. Федорович, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Автор: ЛИТВИНОВ Анатолій Леонідович
доктор технічних наук, професор
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
Email – litan6996@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7063-7814>

Автор: БРЕДІХІН Володимир Михайлович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – bredixinv@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6063-5046>

Автор: ДЕГТЯР Дмитро Віталійович
студент гр. ІСмТ 2021
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова
E-mail: dmytro.degtyarov@kname.edu.ua

SWITCHING NODE MODELING OF A PACKET-SWITCHED DATA TRANSMISSION NETWORK

A. Litvinov, V. Bredikhin, D. Degtyar

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The article considers probabilistic modeling of the information transfer process in a packet-switched data network in datagram mode. In such networks, messages are divided into smaller fragments called packets and sent over the network from one switching node to another independently of each other. So-called smart switches and routers with the appropriate software are considered as switching nodes. Each packet is provided with a header, which specifies the address required to deliver the packet to the destination node. The presence of an address in each packet allows the switch to process the packet independently of other packets in the information flow. In addition to the header, the packet has another additional field, which contains the checksum. The switch checks the checksum, and only if it indicates that the packet data is not distorted, begins to process the packet and determines the destination address in the next switch. Therefore, each packet is sequentially placed bit by bit in the input buffer. Depending on the type of traffic, the packet size may be different. When transmitting voice, the packet size can be 64 bytes, while when transmitting video or text information, the packet size can reach 1500 bytes and higher. Accordingly, the processing and switching time of packets varies widely, which leads to the stochastic nature of the switching nodes' operation, which can be studied using the apparatus of the mass service theory. The paper proposes to use a multi-line mass service system with several input streams and a common buffer as a model of the switching node's operation process. A system of linear equations with respect to the state probabilities is derived for it, the solution to which is obtained in analytical form. The most important characteristic is derived - the probability of packet loss depending on the packet incoming rate and the buffer memory size. It is proven that the buffer size has a lesser effect on the probability of packet loss than the packet incoming rate, which requires the corresponding power from the switching node's processors.

Keywords: data network, switching node, queuing model, loss probability