

УДК 004.7:004.9

DOI: 10.31673/2786-8362.2025.022538

Галаган Н.В., к.т.н.; Беркман Л.Н., д.т.н.;

Каток В.Б., к.т.н.; Скрипник В.В., PhD;

Зіненко Ю.М., к.т.н.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАТРИМКИ ІНФОРМАЦІЇ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Halahan N.V., Berkman L.N., Katok V.B., Skrypnik V.V., Zinenko Yu.M. Analysis of methods for determining information delay in infocommunication networks. In packet-switched networks, one of the most important parameters is the average delay required for delivering the information requested by a subscriber to its destination. The main methodological basis for analyzing delay is queuing theory. However, its application often requires proposals to simplify the complex mathematical apparatus. Therefore, in some cases, accurate quantitative calculations of delay are impossible to perform. The models of the mentioned theory often become the basis for sufficiently accurate approximations of delay, as well as allowing positive and qualitative results to be obtained. In this article, based on the analysis of options for defining delay in information networks, methods for minimizing delay in packet-switched networks with diverse structures have been developed. The results of mathematical modeling confirmed that to study the impact on the network of such parameters as the number and length of packets, the number of calls received by the network within a given time, the duration of occupation, and the receiving of respective data.

Keywords: infocommunication network, information delay, probabilistic methods, service mass theory, packet switching

Галаган Н.В., Беркман Л.Н., Каток В.Б., Скрипник В.В., Зіненко Ю.М. Аналіз методів визначення затримки інформації в інфокомунікаційних мережах. В мережі з комутацією пакетів одним з найбільш важливих параметрів є середня затримка, необхідна для доставки інформації, яку запросив абонент, до місця призначення. Головною методологічною основою для аналізу затримки є теорія масового обслуговування. Проте, її використання найчастіше потребує пропозицій для спрощення складного математичного апарату. Тому в деяких випадках точні кількісні розрахунки затримки виконати неможливо. Моделі згаданої теорії нерідко стають основою для достатньо точних апроксимацій затримки, а також дозволяють одержати позитивні та якісні результати. В статті на основі аналізу варіантів визначення затримки в інформаційних мережах розроблено методи мінімізації затримки в мережах з комутацією пакетів з різноманітною структурою. Результати математичного моделювання підтвердили, що для вивчення впливу на мережу таких параметрів, як кількість та довжина пакетів, кількість викликів, що надходять до мережі за заданий час, тривалість зайняття та одержання відповідних кількісних характеристик системи, повинні застосовуватися ймовірнісні методи. Ключову роль в аналізі мереж відіграє теорія черг або теорія масового обслуговування.

Ключові слова: інфокомунікаційна мережа, затримка інформації, ймовірнісні методи, теорія маси обслуговування, комутація пакетів

Вступ

У статті представлено метод розрахунку затримки проходження інформації в інфокомунікаційній мережі, що дозволяє знайти залежність цієї затримки від різних параметрів, які визначають характеристику мережі:

Як відомо, при дослідженні мереж із комутацією пакетів проблеми черг виникають абсолютно природно. Пакети, що надходять на вхід мережі або проміжного вузла на шляху до пункту призначення, накопичуються, обробляються з метою вибору відповідного каналу передачі до наступного вузла, а потім зчитуються каналом у визначений час їх передачі. Час, затрачений на очікування передачі в накопичувачі, є важливим показником, що характеризує роботу мережі, оскільки затримка передачі, тобто час очікування, входить як складова до однієї з основних характеристик, що безпосередньо відчуються користувачем. Час очікування звичайно залежить від часу обробки у вузлі і довжини пакета, а також від пропускної спроможності каналу передачі, який виражається кількістю пакетів, переданих за секунду, інтенсивністю надходження пакетів у вузол (кількість пакетів за секунду), і дисципліни обслуговування, що застосовується при обробці пакетів.

Теорія черг виникає також при дослідженнях мереж із комутацією каналів, і не тільки при вивченні обробки викликів, але і з аналізу залежності між кількістю доступних каналів (кожний з яких одночасно може обробляти один виклик) і ймовірністю того, що виклик, який потребує встановлення з'єднання буде заблокований або поставлений в чергу для очікування на обслуговування. Зазначимо, що велика частина сучасної теорії черг була розроблена в ході дослідження телефонних повідомлень. Для знаходження методів розрахунку затримки необхідно здійснити дослідження інтегральних мереж, в яких задачі комутації пакетів і комутації каналів об'єднуються.

Аналіз останніх досліджень. В [1] розглянуто методи та моделі розрахунку затримки інформації яка передається в мережах з комутації пакетів. Ці методи та моделі є основою розрахунку затримки в мультисервісних мережах з комутацією пакетів.

В [2] представленні моделі мереж з комутацією пакетів різноманітних структур на основі теорії масового обслуговування.

В [3,5] досліджено конвергентні мережі, де вхідні повідомлення які поступають в мережу описані законом Пуасона.

В [6,8] розглядаються моделі мереж на основі теорії масового обслуговування для яких вхідний потік повідомлень описаний нестационарними законами.

Постановка завдання. У даній статті представлено методику розрахунку затримки отримання інформації в інфокомунікаційній мережі, за допомогою якої знаходять залежність затримки від різних параметрів, що визначають характеристику та структуру мережі.

На основі розрахунку отримано залежності затримки одержання інформації від інтенсивності надходження вимог, від вартості, від пріоритету, а також від методу обслуговування. Ці дані дозволяють мінімізувати затримку при різних умовах.

Запропоновано методику визначення параметрів мережі, яка дозволяє вирішити задачу оптимального проектування для різних умов реалізації мережі (кількість абонентів, спектр послуг, які надаються тощо).

Метою роботи є визначення методів мінімізації затримки надання послуг сучасних інфокомунікаційних мереж.

Виклад основного матеріалу дослідження

Визначення системи обслуговування з відносними пріоритетами. При обслуговуванні користувачів часто виникає необхідність у наданні певним категоріям системи послуг за пріоритетами. Класи пріоритетів вводяться для різних послуг і різних категорій абонентів.

Звичайно використовуються два типи пріоритетів: відносний і абсолютний. У першому випадку користувачі (пакети або виклики послуг) вищого пріоритету стають попереду користувачів (пакетів) нижчого пріоритету в черзі, але не витісняють їх. У разі абсолютного пріоритету, обслуговування користувачів з нижчим пріоритетом припиняється і продовжується лише після того, коли всі користувачі, що надійшли з вищим пріоритетом будуть обслужені. В даному випадку розглядається тільки відносні пріоритети.

Передбачимо, що в черзі очікують обслуговування $2r$ класи користувачів. Інтенсивність потоків, що створюються ними – $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$, причому кожний з цих потоків – пуасонівський. Середній час обслуговування для k -того класу, $k = 1, 2, \dots, r$, дорівнює $1/\mu_k$.

Будемо вважати, що вищий пріоритет має клас 1, нижчий – клас r із спаданням пріоритетів у послідовності зростання номера. Представимо розрахунок середнього часу очікування для будь-якого класу в припущенні, що пріоритети є відносними. Візьмемо для прикладу клас p ($1 \leq p \leq k$). Нехай типовий виклик цього класу надходить в довільний момент часу t_0 . Його випадковий час очікування W_p , що вимірюється від моменту надходження до початку обслуговування, залежить від трьох параметрів. Користувач, запит якого очікує на обслуговування, повинен чекати протягом випадкового проміжку часу T_0 , поки закінчитися

поточний час обслуговування користувача. Крім того, він повинен чекати випадкове число T_k одиниць часу, поки закінчиться обслуговування всіх користувачів класу k , що вищий або дорівнює класу p , які вже знаходилися у черзі в момент часу t_0 . Нарешті, він повинен чекати випадковий час T'_k обслуговування користувачів кожного класу k , вищого за клас p , і вимоги яких надійшли протягом часу очікування W_p .

Об'єднуючи разом ці параметри, отримаємо:

$$W_p = T_0 + \sum_{k=1}^p T_k + \sum_{k=1}^{p-1} T'_k. \quad (1)$$

Для визначення середнього часу очікування:

$$E(W_p) = E(T_0) + \sum_{k=1}^p E(T_k) + \sum_{k=1}^{p-1} E(T'_k). \quad (2)$$

Для того, щоб знайти три середніх значення часу в рівності (2), зазначимо, що $E(T_k)$ виникає за рахунок середнього числа $E(m_k)$ користувачів класу k , які очікують в системі. Кожний з них потребує, в середньому, $1/\mu_k$ одиниць часу, тому безпосередньо отримаємо:

$$E(T_k) = E(m_k) / \mu_k. \quad (3)$$

Але на основі формули Літтла величина $E(m_k)$ пов'язана із середнім очікуванням $E(W_k)$, а саме

$$E(m_k) = \lambda_k E(W_k). \quad (4)$$

Тому отримаємо:

$$E(T_k) = \rho_k E(W_k), \quad \rho_k \equiv \lambda_k / \mu_k. \quad (5)$$

Розглянемо тепер параметр $E(T_k)$, який отримали за рахунок надходження, в середньому, $E(m_k)$ користувачів класу k протягом проміжку часу $E(W_p)$.

Оскільки інтенсивність надходжень дорівнює λ_k і кожен користувач потребує в середньому $1/\mu_k$ одиниць часу обслуговування, безпосередньо отримаємо:

$$E(T_k) = \lambda_k E(W_p) / \mu_k = \rho_k E(W_p). \quad (6)$$

Отже, маємо $E(T_0)$ – це залишковий час обслуговування користувача, який знаходиться на обслуговуючій лінії.

Для системи обслуговування з відносними пріоритетами, які зберігають функціонування (тобто коли обслуговуюча лінія знаходиться в режимі нормальної роботи, а користувач чекає обслуговування), вказаний час не залежить від дисципліни обслуговування. Він повинен бути одним і тим же, якщо користувачі всіх k класів обслуговуються з однаковим пріоритетом за надходженням. Для середнього часу очікування в системі M/G/1, знаходимо:

$$E(T_0) = \lambda E(\tau^2) / 2 = \sum_{k=1}^r \lambda_k E(\tau_k^2) / 2. \quad (7)$$

Це узагальнює описаний вище приклад з двома пріоритетними класами.

Зазначимо особливість систем з пріоритетами, яка полягає в тому, що деякі класи пріоритетів (високі) покращують характеристики, інші - навпаки. Цікаво, що тут має місце закон збереження. Можна показати, що зважена сума часів очікування завжди зберігає своє значення.

Зокрема:

$$\sum_{k=1}^r \rho_k E(W_k) = \rho E(W), \quad (8)$$

де $E(W)$ – час очікування в системі M/G/1 (яка обслуговує чергу за надходженням), і цей час знаходиться досить просто. При зменшенні деяких періодів очікування інші в порядку

компенсації повинні збільшитися. Цей закон збереження є окремим випадком більш загального закону для систем із збереженням функціонування, який вперше був відкритий Клейнроком.

Скориставшись результатами теорії масового обслуговування і теоремою Літтла, можна обчислити середню затримку проходження інформації в мережі.

Наприклад, середня затримка виклику в системі:

$$T = \frac{1}{\mu} + \frac{P_Q}{m\mu - \lambda}, \quad (9)$$

де μ – швидкість обслуговування (даний параметр показує, з якою швидкістю працює обслуговуючий прилад, тобто кількість викликів, що обслуговуються в одиницю часу, коли він зайнятий);

P_Q – імовірність події: вимога, яка надійшла, визначає, що в системі всі обслуговуючі прилади зайняті, і буде поставлена у чергу для очікування (визначається за формулою Ерланга);

m – кількість обслуговуючих пристроїв.

Застосовуючи теорему Літтла, знаходимо середнє число вимог у системі:

$$N = T\lambda = \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda P_Q}{m\mu - \lambda}. \quad (10)$$

Аналогічно за допомогою відомих співвідношень у теорії масового обслуговування визначається середній час проходження інформації в мережі в залежності від різних умов.

Розрахунок затримки інформації в інфокомунікаційній мережі. Розрахунок затримки інформації в інфокомунікаційній мережі дозволяє кількісно оцінити якість структурної схеми, визначити оптимальну структуру мережі передачі інформації для різної кількості абонентів та спектра послуг, які надаються.

Розроблене програмне забезпечення призначене для отримання даних щодо часу затримки інформації в різних умовах і надає можливість зробити висновки про оптимальність структури інфокомунікаційної мережі.

Опис програмного забезпечення представлено в додатку 1. Залежність затримки від інтенсивності надходження вимог на послуги, представлена на рис. 1

Як і передбачалося, на рисунку видно, що затримка збільшується пропорційно інтенсивності. Як наслідок, для забезпечення її величини, яка не перевищує заданої, необхідно при збільшенні інтенсивності потреб, які надходять від користувачів, збільшити продуктивність комутаційних вузлів.

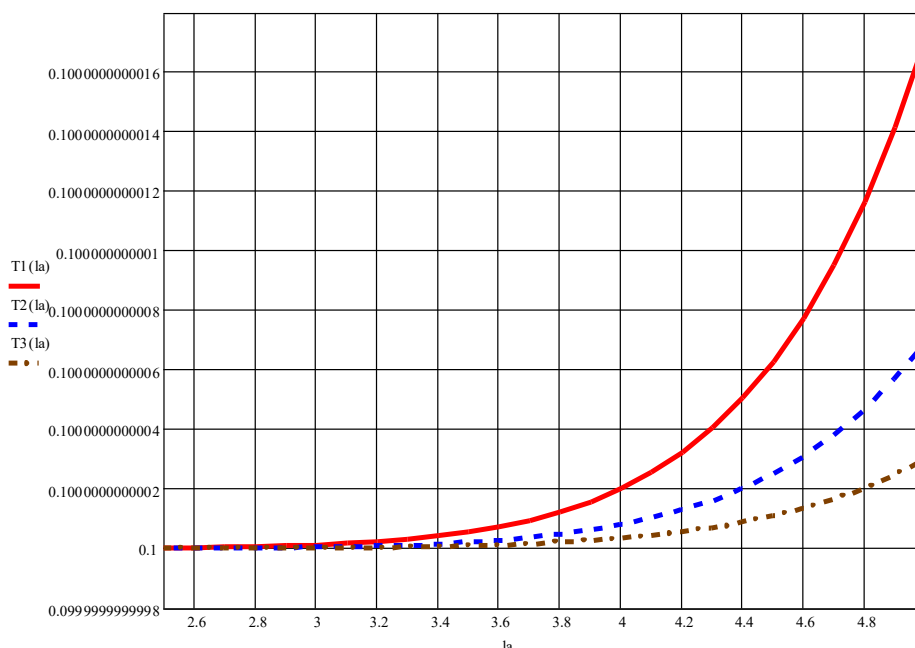


Рис. 1. Залежність затримки від інтенсивності надходжень вимог

На рис. 1 представлено залежність затримки інформації від продуктивності вузла комутації при різних інтенсивності надходження вимог.

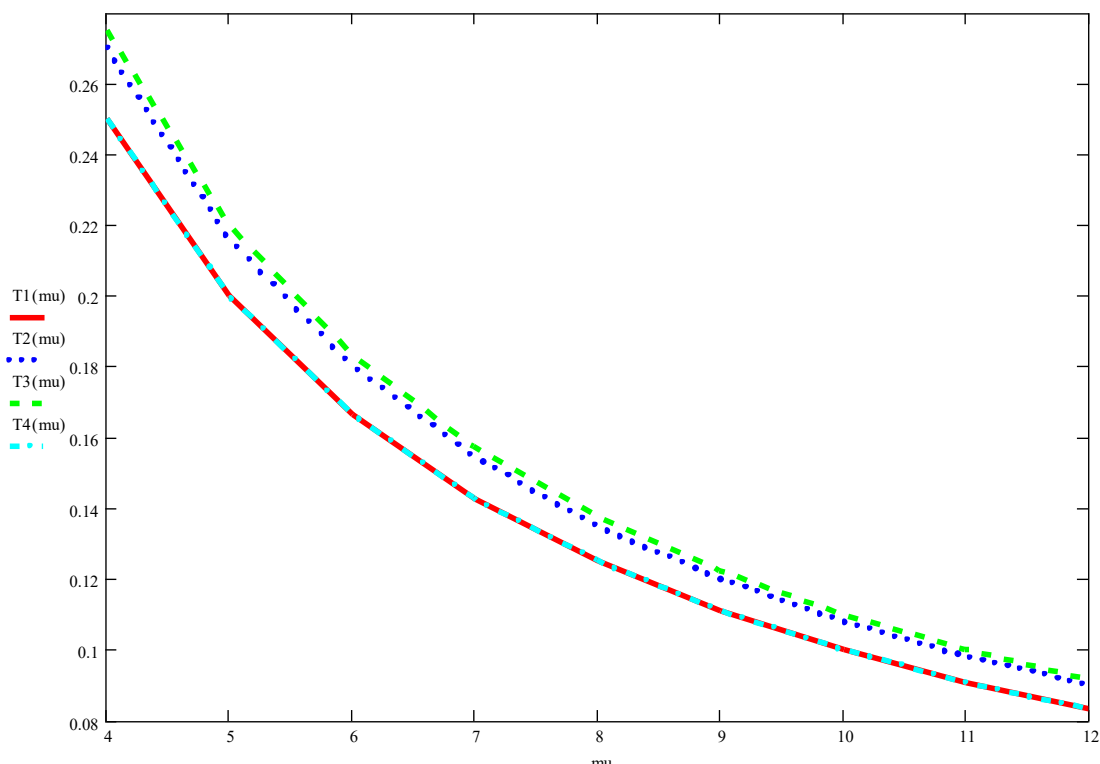


Рис. 2. Залежність затримки інформації від продуктивності вузла комутації

Таблиця 1

Залежність затримки інформації від кількості транзитних комутаційних вузлів при заданій кількості обслуговуваних пристроїв

Кіл-сть транзитів Кіл-сть пристроїв	Час затримки інформації в вузлах мережі (секунди)				
	1	2	3	4	5
1	1.2000000	2.4000000	3.6000000	4.8000000	6.0000000
2	0.2666667	0.5333333	0.8000000	1.0666667	1.3333333
3	0.2085561	0.4171123	0.6256684	0.8342246	1.0427807
4	0.2010870	0.4021739	0.6032609	0.8043478	1.0054348
5	0.2001263	0.4002526	0.6003789	0.8005052	1.0006315
6	0.2000132	0.4000264	0.6000396	0.8000527	1.0000659
7	0.2000012	0.4000025	0.6000037	0.8000049	1.0000062
8	0.2000001	0.4000002	0.6000003	0.8000004	1.0000005
9	0.2000000	0.4000000	0.6000000	0.8000000	1.0000000
10	0.2000000	0.4000000	0.6000000	0.8000000	1.0000000

Можна зробити висновок, що при проектуванні інфокомунікаційної мережі необхідно враховувати фактор, що при підвищенні продуктивності вузла комутації до певного рівня затримка несуттєво залежить від інтенсивності надходження потреб. Тому найефективнішим способом зменшення затримки є підвищення продуктивності комутаційних вузлів, а не зниження навантаження на комутаційний вузол.

Таблиця 1 представляє результат розрахунку затримки інформації від кількості транзитних комутаційних вузлів при заданій кількості обслуговуючих пристроїв.

Аналізуючи дані представлені в табл. 1., зробимо висновок, що затримка значно залежить від кількості транзитів.

На рис. 3 приведено залежність затримки від вартості (вартість визначається продуктивністю вузла і його функціональною спроможністю). При збільшенні вартості затримка зменшується. Проте на графіку видно, що є області, в яких збільшення вартості призводить до незначного зменшення затримки.

Це відбувається тому, що вартість обладнання визначається не тільки продуктивністю, як зазначалося вище, але ефективною маршрутизацією та іншими функціональними перевагами вузла. При збільшенні вимог до такого параметру як затримка, необхідно вибирати обладнання з максимальною продуктивністю і функціональними властивостями.

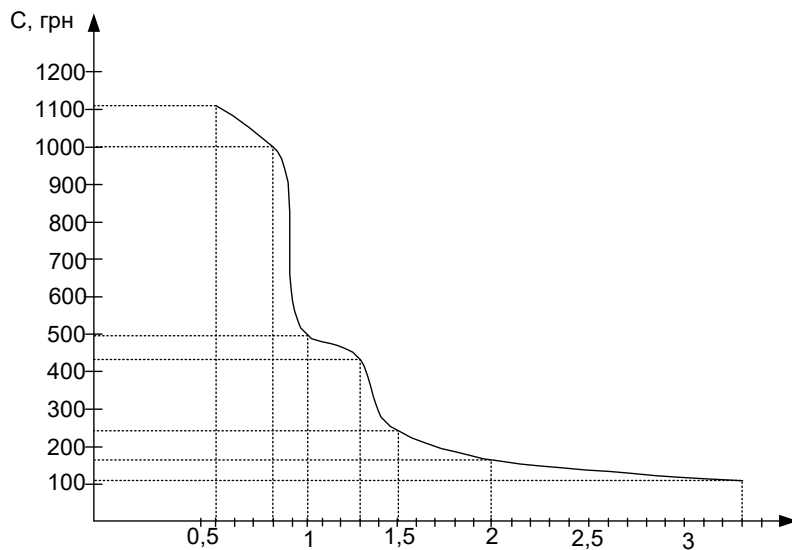


Рис. 3. Залежність затримки від вартості

Вибрати оптимальні умови (затримка/вартість), відповідно наведеного графіку, дозволяє наступний метод:

Постановка задачі при знаходженні оптимального співвідношення затримка/вартість може мати наступні питання:

- 1) Яка оптимальна затримка буде досягтися при допустимій вартості?
- 2) Яка оптимальна вартість досягається при затримці, яку задає користувач?

Використання даного методу наведемо для другого випадку.

Нехай для оптимізації вартості задано деякий великий інтервал $C_{\max}$ та $C_{\min}$. На i -му кроці оптимізації отримаємо інтервал L_{i-1} (рис. 4).

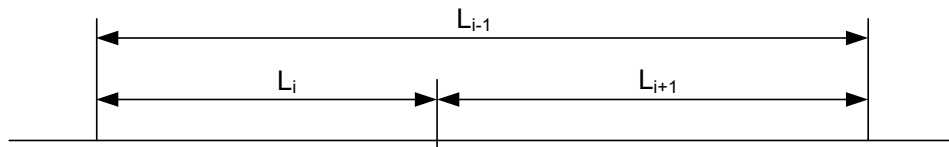


Рис. 4. Інтервал оптимізації

Звідки:

$$\frac{L_{i-1}}{L_i} = \frac{L_i}{L_{i+1}} = \dots = R$$

$$\frac{L_i + L_{i+1}}{L_i} = \frac{L_i}{L_{i+1}}$$

$$1 + \frac{L_{i+1}}{L_i} = \frac{L_i}{L_{i+1}} \rightarrow 1 + \frac{1}{R} = R$$

$$R + 1 = R^2$$

$$R^2 - R - 1 = 0$$

$$R = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1.618$$

$$R = 1.618$$

Знаходимо точки оптимізації C_1 та C_2 :

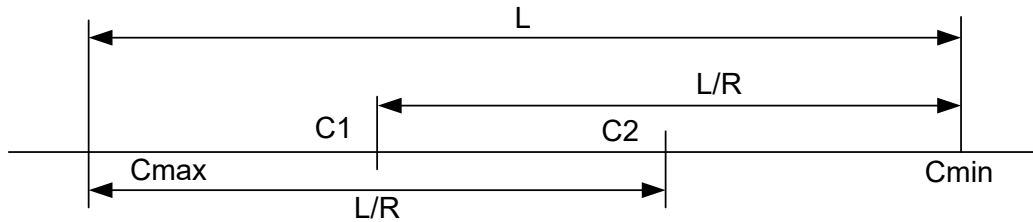


Рис. 5. Точки оптимізації

$$C_1 = C_{\max} + \frac{C_{\max} - C_{\min}}{R}, \quad (11)$$

$$C_2 = C_{\min} + \frac{C_{\max} - C_{\min}}{R}. \quad (12)$$

Знаходимо значення функції в цих точках:

$$T_1 = f(C_1), T_2 = f(C_2)$$

$$f(C) = \frac{Y}{K_i * C_i}, \quad (13)$$

де Y – загальна кількість інформації, яка повинна бути оброблена при наданні послуги;

C_i – вартість обладнання, що використовується;

K_i – функціональний коефіцієнт, який визначається співвідношенням продуктивності керуючого процесора до його вартості.

$$a) f(C_1) < f(C_2)$$

$$C_{\min} n < C_{\min} n$$

$$C_{\max} n < C_2 n$$

$$C_2 n < C_1 n$$

$$C_1 n = C_{\min} + \frac{C_2 n - C_{\min}}{R^2}$$

$$b) f(C_1) > f(C_2)$$

$$C_{\min} n = C_1 n$$

$$C_{\max} n = C_{\max} n$$

$$C_1 n = C_2 n$$

$$C_2 n = C_1 n + \left(1 - \frac{1}{R^2}\right)(C_{\max} - C_1 n)$$

Якщо отриманий діапазон результату не задовольняє заданому T , знаходимо нову $C_1 n$ та $C_2 n$. Оптимізація продовжується до тих пір, поки не буде досягнуто заданого T , не виключаючи деякої похибки розрахунку. Похибка теж повинна мати задану точність.

Представлено розрахунок, згідно якого була побудована графічна залежність ρ від μ при різних λ та пріоритетах послуг, яка наведена на рис. 5.

На рисунку 5 наведена залежність коефіцієнту використання системи від швидкості обслуговування комутаційної системи при надходженні послуг, які мають різний пріоритет та інтенсивність надходження. Із графіка видно, що послуги, які мають нижчий пріоритет,

збільшують коефіцієнт використання системи, що в свою чергу, як наслідок, веде до збільшення середньої затримки повідомлень в комутаційній системі.

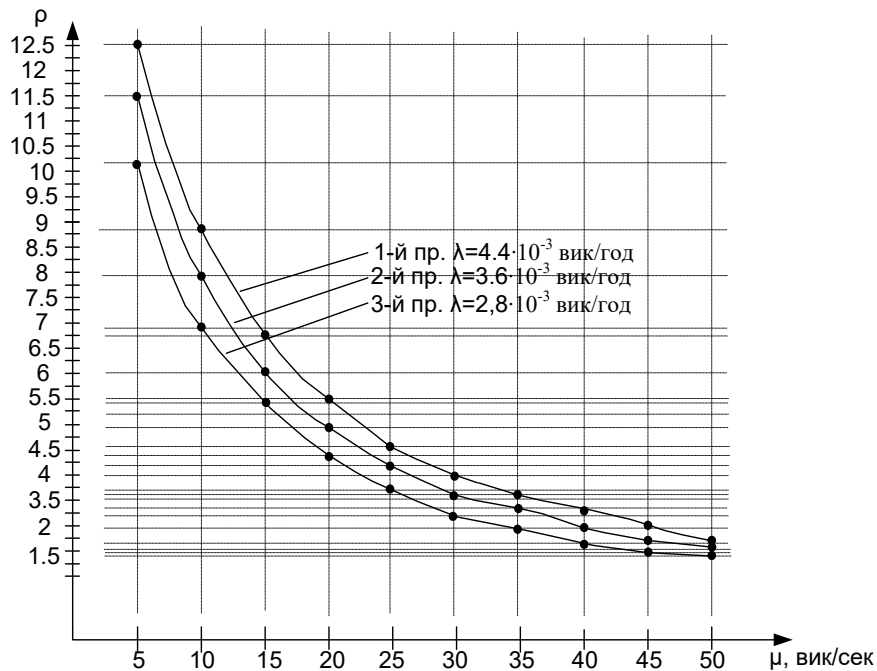


Рис. 5. Залежність ρ від μ при різних λ та пріоритетах послуг

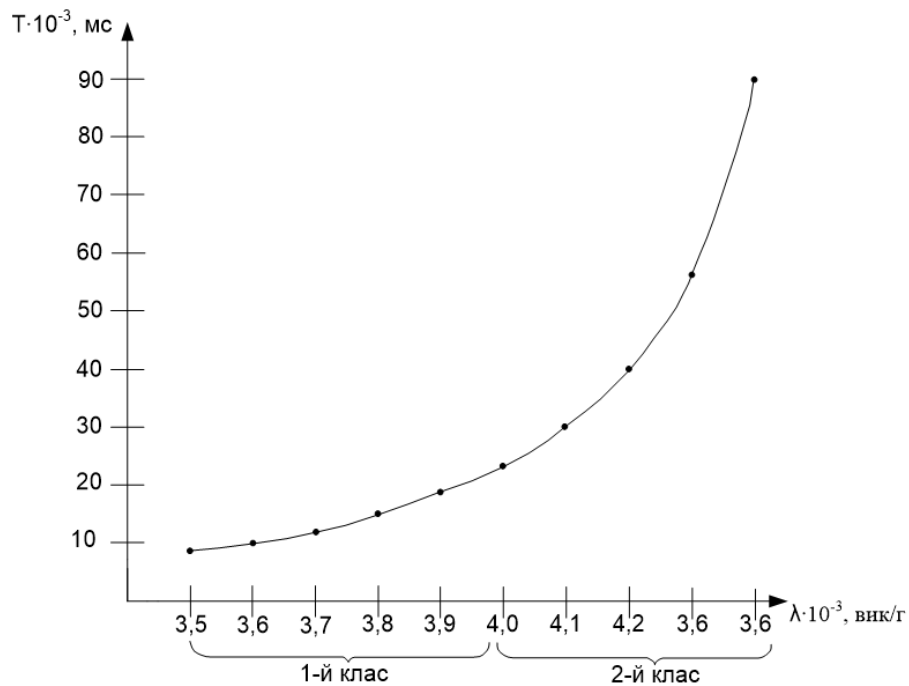


Рис. 6. Залежність середньої затримки від послуг, які мають різні пріоритети

На рисунку 6 показана залежність середньої затримки від послуг, які мають різні пріоритети. Послуги умовно поділені на два класи: перший клас має найвищий пріоритет, а другий – найнижчий. Із графіка видно, що послуги, які мають нижчий пріоритет, вносять більш суттєву затримку в системи комутації, ніж послуги з високим пріоритетом.

Висновки

В статті запропоновано методи визначення найважливішого параметру інфокомунікаційної мережі – затримку отримання послуги користувачем. Для ефективного

зменшення затримки необхідно: при збільшенні інтенсивності надходження вимог – збільшувати продуктивність комутаційних вузлів, а не кількість обслуговуючих пристроїв; структура мережі повинна бути вибрана таким чином, щоб при заданій інтенсивності та продуктивності було якнайменше транзитних вузлів; якщо послуги поділяються за пріоритетами, то треба обирати відповідний пріоритет послуги; на підставі розрахунку можна отримати залежність затримки отримання послуг від вартості та апроксимувати її відповідною функцією.

Список використаної літератури:

1. Л.Н. Беркман, Л.О. Комарова, О.І. Чумак. Системи електров'язку та сигнали Навчальний посібник. – Київ: ДУТ, 2015.
2. Л.Н. Беркман, О.Г. Варфоломеева, А. Г. Захаржевський, М. Г. Твердохліб, В. П. Ярцев. Управління якістю обслуговування в мережах NGN. Телекомунікаційні та інформаційні технології. Київ: ДУТ. № 2. 2015.
3. Л.Н. Беркман, В. В. Жебка. Розрахунок часу затримки проходження інформації з врахуванням структури мережі з комутацією пакетів. Телекомунікаційні та інформаційні технології. Київ: ДУТ. № 2. 2014.
4. В.Г. Кривуца, Л.Н. Беркман, В. В. Лапінський. Основи Інфокомунікацій. – Київ: ДУІКТ 2011.
5. Antonyuk Y. M., Shyyak B. A., Antonyuk M. I. Performance evaluation of computer campus network segments. *Telecommunication and information technologies*. 2019. No. 4. P. 111–119. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2019.041119>.
6. Wang, J., Li, X., & Chen, Y. Advances in 6G Wireless Communication Systems: Theory and Application. *IEEE Communications Magazine*, 2023.
7. Zhang, H., & Shi, Q. Deep Learning for Signal Processing: A Comprehensive Overview. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2023.
8. Liu, Y., & He, B. Quantum Communications: Challenges and Future Directions. *Journal of Quantum Information Science*, 2023.

Автори статті

Галаган Наталія – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-8582-3126

Беркман Любов – доктор технічних наук, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-6772-1596

Каток Віктор – кандидат технічних наук, головний радник з питань науково-технічної політики АТ «Укртелеком», Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-2063-7872

Скрипнік Вікторія – PhD, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-9854-8039

Зіненко Юрій – кандидат технічних наук, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-7019-9949

Authors of the article

Halahan Nataliia – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-8582-3126

Berkman Liubov – Doctor of Sciences (technical), Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-6772-1596

Katok Viktor – Candidate of Sciences (technical), Chief Advisor on Scientific and Technical Policy of JSC “Ukrtelecom”, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-2063-7872

Skrypnyk Viktoriia – PhD (technical), State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-9854-8039

Zinenko Yurii – Candidate of Sciences (technical), State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-7019-9949