

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ У ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ

© Кайдан М.В., Думич С.С., Максимюк Т.А., Бурачок Р.А., Готра Л.М., 2014

Проектування фотонних транспортних мереж є надзвичайно складним завданням, оскільки необхідно забезпечити ефективне передавання кількох черг трафіку з різними пріоритетами. Завдання ускладнюється ще більше, якщо необхідне наскрізне забезпечення якості сервісу. Тому виникає потреба в розрахунку впливу параметрів вузлів фотонної транспортної мережі на якість сервісу. Загалом наявні моделі теорії телетрафіку та систем масового обслуговування можна використати для аналізу мереж з пакетною комутацією. Проте складність кільцевих структур фотонних транспортних мереж та їх надзвичайно висока пропускна здатність суттєво зменшують продуктивність таких моделей. У статті запропоновано використовувати метод діакоптики, який полягає у декомпозиції крайового вузла на декілька ізольованих підсистем. Це дозволяє провести дослідження та враховувати взаємодію між підсистемами. Використання методу діакоптики дає змогу розрахувати оптимальні параметри крайового вузла для забезпечення необхідних вимог до якості сервісу. Результати моделювання показують, що точність класичних методів СМО за середнього значення завантаженості та складної структури мережі становить 21 %, тоді як в аналогічних умовах в мережі з використанням методу діакоптики – 83 %.

Ключові слова: фотонна транспортна мережа, діакоптика, крайовий вузол, якість обслуговування (QoS).

M.V. Kaidan, S.S. Dumych, T.A. Maksymyuk,
R.A. Burachok, L.M. Hotra
Lviv Polytechnic National University

RESEARCH ON QUALITY OF SERVICE PARAMETERS FOR PHOTONIC TRANSPORT NETWORKS

© Kaidan M.V., Dumych S.S., Maksymyuk T.A., Burachok R.A., Hotra L.M., 2014

Designing the photonic transport networks is the task of great complexity, because of variety traffic queues should be transmitted with different priorities. Task of dynamic supporting the different quality of service (QoS) requirements during transmission over optical channel is even more complex. The most significant aspect for effective transport network designing from economic point of view is the network parameters optimization. In general, the methods and models for quality parameters estimation, developed in teletraffic theory are useful for packet networks as well. However, the complexity of photonic transport network and tremendous traffic intensity sufficiently decrease the performance of existing estimation methods. Therefore, developing the new methods for (QoS) parameters estimation is an actual task for modern photonic transport networks. The most interesting research object in photonic transport networks is edge node, which is responsible for traffic aggregation from different access networks such passive optical networks, regional ring networks and wireless access networks (GSM, UMTS, LTE). During traffic aggregation the multiple queues with different priorities and QoS requirements must be processed in edge node. This paper

considers the queuing system with three types of service: voice over IP (VoIP), IPTV and data over IP (DoIP). Theoretical simulation for edge node of photonic transport network was provided by using mathematical fundamentals of queuing theory. Simulation is simplified by total queue decomposition onto several independent single channel queues system M/G/1. These queues processed separately and simultaneously. Thus, for edge node analyzing the prioritized M/G/1 with non-uniform packets income is used as basic queue model. However, using this model is very difficult for complex structures with ring topology. Therefore, the diakoptic method proposed for analysis of photonic transport networks. This method assumes tensor representation of analyzed network parameters. By using diakoptic method the edge node divides onto several subsystems, which must be completely isolated from each other. It is necessary to avoid any connectedness between these subsystems in order to eliminate influences between separated subsystems. This approach allows analyzing of each subsystem independently. During the analysis of each subsystem all interconnected loops inside are eliminated. Thus, no connections are left between analyzed subsystem and others subsystems, from which it is possible to determine interrelation between them. Namely, it assumes that separated branches are not belonging to any basic subsystem. Since these branches cannot be neglected, they affiliated to additional subsystem, which are created for them. After that, each subsystem analyzed independently by creating and solving the system of equation called – circle of intersections. Proposed method assembly separated procedures in proper sequence for analyzing the photonic transport network with complex structure. Diakoptic allows simplifying the complex network analysis, by separate calculation for elementary branches. Simulation results prove the advantage of diakoptic method. Precision of diakoptic method for average traffic intensity and complex network structure is 83 %, while for classic queues models precision is just 21 % for similar network conditions.

Key words: photonic transport network, diakoptic, edge node, quality of service (QoS).

Вступ. Важливою проблемою під час проектування фотонних транспортних мереж [1] є розрахунок параметрів вхідного трафіку від мереж доступу та прогнозування поведінки вузлів при агрегації трафіку. Суттєво ускладнює необхідність пріоритезації трафіку та необхідність наскрізного забезпечення необхідних параметрів якості сервісу [2]. З економічного погляду необхідно вибирати оптимальні параметри для всіх компонентів мережі, які впливають на параметри якості сервісу. Загалом наявні методи та моделі, розроблені в класичній теорії телетрафіку та систем масового обслуговування, придатні й для мереж з пакетною комутацією. Проте складність структури фотонної транспортної мережі та надзвичайно високі значення пропускної здатності в таких мережах суттєво зменшують продуктивність та точність наявних методів. Тому розроблення нових методів оцінки та прогнозування параметрів якості сервісу є надзвичайно цікавим та актуальним завданням для сучасних фотонних транспортних мереж. Враховуючи тенденцію поширення повністю оптичних транспортних мереж, одним з основних об'єктів дослідження стає процес агрегації трафіку в крайовому вузлі такої мережі, який виконує функції термінального мультиплексора вводу–виводу [3]. Під час агрегації в крайовому вузлі виконуються функції пріоритезації та класифікації трафіку, який надходить від мереж доступу [4]. Тому в цій статті основна увага приділяється процесам, які відбуваються у крайовому вузлі фотонної транспортної мережі, та розрахунку їхнього впливу на наскрізне забезпечення параметрів якості сервісу.

Модель крайового вузла фотонної транспортної мережі. Як зазначено вище, крайовий вузол фотонної транспортної мережі відповідає за агрегацію інформаційних потоків з мереж доступу. Причому, враховуючи повністю оптичну природу фотонної транспортної мережі, цей вузол є визначальним також під час розгляду проблеми наскрізного забезпечення параметрів якості сервісу, оскільки саме у ньому закладені функції класифікації та пріоритезації трафіку. Виконання цих функцій вимагає наявності чітких механізмів та політик обслуговування, які закладаються на етапі проектування фотонної транспортної мережі. Крім того, необхідно провести аналіз харак-

теристик типового трафіку від мереж доступу, який агрегується цим вузлом. Це дасть змогу визначити типові мережеві застосування, які використовують цей вузол для передавання своїх данограм, а також розрахувати параметри якості сервісу, яких вони вимагають. Одним з найпоширеніших засобів для аналізу процесів, які відбуваються в крайовому вузлі, є математичний апарат теорії систем масового обслуговування [5]. Розглянемо типову архітектуру мережі, яка складається із сегментів доступу та транспортної магістралі (рис. 1). Транспортний сегмент представлений фотонною транспортною мережею. Сегментами доступу можуть бути як пасивні оптичні мережі, зонові кільцеві мережі нижчих рівнів ієрархії, сегменти мереж радіодоступу (GSM, WCDMA, LTE), міські мережі Metro Ethernet та інші.

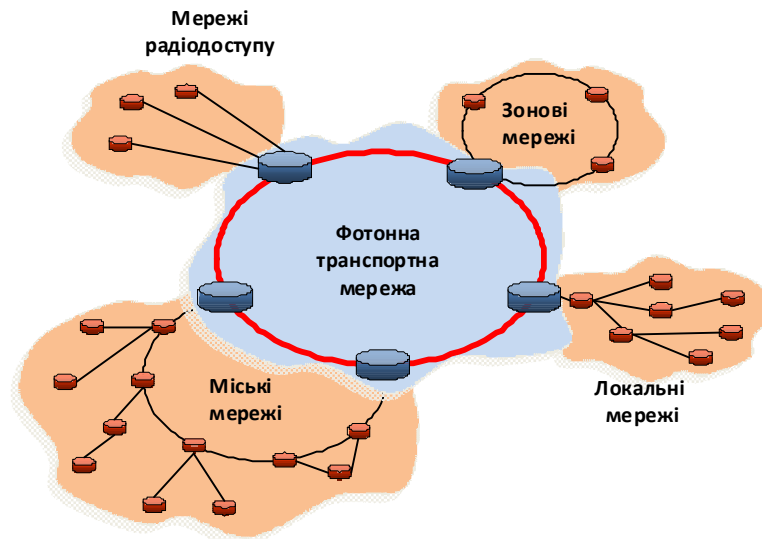


Рис. 1. Концептуальна модель структури фотонної мережі

Модель крайового вузла можна подати у вигляді розімкнутої трифазної мережі масового обслуговування (МеМО) (рис. 2). У фазі 1 виконується прийом заявок від сегментів мереж доступу з інтенсивністю Λ кадрів у буфер обслуговуючого пристрою, аналіз ідентифікаторів кожної заявки і розподіл цих заявок по відповідних чергах:

- трафік голосових даних (VoIP);
- трафік відеоданих (IPTV, VOD);
- трафік даних (DoIP).

У фазі 2 здійснюється передавання кадрів у вихідні порти крайового вузла відповідно до маршрутної таблиці та пріоритету кожної черги. У фазі 3 здійснюється передавання агрегованого інформаційного потоку заявок у фотонну транспортну мережу.

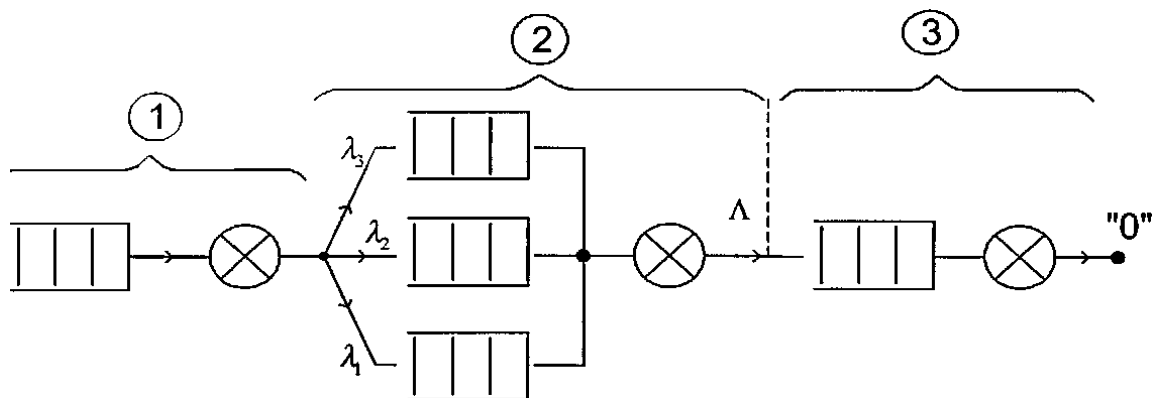


Рис. 2. Модель крайового вузла фотонної транспортної мережі на основі СМО

Використовуючи математичний апарат теорії систем масового обслуговування (СМО), проводять аналітичне моделювання процесу функціонування крайового вузла, зведенням до розрахунку незалежних одноканальних систем класу M/G/1.

Отже, як базову математичну модель, що відображає обробку кадру в одній фазі вузла, достатньо розглядати СМО типу M/G/1 з неоднорідним потоком заявок і, в загальному випадку, пріоритетним обслуговуванням.

Середня затримка кадрів типу k ($k = 1, 2, 3$) у пріоритетній фазі i визначається як середній час перебування заявок у СМО типу M/G/1 з відносними пріоритетами [6]:

$$u_{ik} = w_{ik} + b_{ik},$$

де b_{ik} – середній час обробки кадрів; w_{ik} – середній час очікування в черзі:

$$w_{ik} = \frac{\sum_{i=1}^3 l_{ij} b_{ij}^{(2)}}{2(1 - R_{ik-1})(1 - R_{ik})}, \quad (1)$$

де λ_{ij} – інтенсивність потоку заявок типу j ; $b_{ij}^{(2)}$ – другий початковий момент часу обслуговування заявок типу j у фазі i ; R_{ik} – часткове сумарне завантаження, створюване першими k класами ($k=1, 2, 3$), причому $R_0 = 0$. Середньоквадратичне відхилення (с.к.в.) часу перебування заявок типу k ($k = 1, 2, 3$) визначається за такою формулою:

$$\sigma_{ik} = \sqrt{w_{ik}^{(2)} + 2w_{ik} b_{ik}^{(2)} + b_{ik}^{(2)} - u_{ik}^2}, \quad (2)$$

де $b_{jk}^{(2)}$ і $w_{jk}^{(2)}$ – другі початкові моменти часу обслуговування та очікування в чергах, відповідно:

$$w_{ik}^{(2)} = \frac{\sum_{i=1}^H l_i b_i^{(2)}}{3(1 - R_{ik-1})^2(1 - R_{ik})} + \frac{\sum_{j=1}^k l_{ij} b_{ij}^{(2)} \sum_{j=1}^3 l_{ij} b_{ij}^{(2)}}{2(1 - R_{ik-1})^2(1 - R_{ik})^2} + \frac{\sum_{i=1}^{k-1} l_{ij} b_{ij}^{(2)} \sum_{i=1}^H l_{ij} b_{ij}^{(2)}}{2(1 - R_{ik-1})^3(1 - R_{ik})}, \quad (3)$$

де $b_{ik}^{(3)}$ – третій початковий момент часу обслуговування заявок типу j у фазі i . Часткове сумарне завантаження R_{ik} визначається за виразом:

$$R_{ik} = \sum_{i=1}^k r_{ij} = \sum_{i=1}^k l_{ij} b_{ij}. \quad (4)$$

де ρ_j – коефіцієнт завантаження СМО для j класу трафіку у фазі i , який визначається:

$$\rho_j = \lambda_j / \mu_j. \quad (5)$$

Для фаз, в яких реалізується безпріоритетна обробка кадрів, середнє значення і с.к.в. затримки заявок типу k визначається як [7]:

$$u_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^3 l_{ij} b_{ij}^{(2)}}{2(1 - R_i)} + b_{ij}; \quad \sigma_{ik} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^3 l_{ij} b_{ij}^{(3)}}{3(1 - R_i)} + \left(\frac{\sum_{j=1}^3 l_{ij} b_{ij}^{(2)}}{2(1 - R_i)} \right)^2 + b_{ik}^{(2)} - b_{ik}^2}.$$

Тоді середнє значення і с.к.в. затримки заявок у вузлі розраховують за формулами:

$$u_y = \sum_{i=1}^3 u_{ik}, \quad \sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^3 s_{ik}^2},$$

Відповідно, середня мережева затримка та її с.к.в. обчислюються через відповідні значення вузлових характеристик:

$$u_y = \sum_{i=1}^3 a_i u_i, \quad \sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^3 a_i s_i^2},$$

де N – кількість вузлів у мережі; σ_j – с.к.в. затримки у вузлі j ; u_j – середня затримка заявки у вузлі j ; α_j – коефіцієнт передачі для вузла МеМО.

Модель розрахунку параметрів крайового вузла фотонної транспортної мережі. Як вже згадувалось вище, для дослідження складних структур та структур з кільцевою топологією використання класичної теорії СМО є доволі складним рішенням. Тому для дослідження фотонних транспортних мереж пропонується використовувати метод діакоптики на основі тензорного представлення мережевих параметрів. Для прикладу розглянемо порівняно просту структуру, наведену на рис. 2, що складається з різних фаз, які з погляду діакоптики відповідатимуть підмножині J_1 (фаза 1 та 3), які пов'язані між собою підмножиною J_2 (фаза 2) [7]. Згідно з діакоптикою [8, 9] об'єднана структура являє собою всю мережу і математично подається множиною J . В структурах множин J_1 та J_2 об'єднані в структурну множину $J=J_1 \times J_2$.

Згідно з методологією досліджень мереж, запропонованих в роботі [10], досліджуватимемо коефіцієнт завантаження, який визначається за формулою (5). Для прикладу розглянемо порівняно просту модель, зображену на рис. 2, з позиції діакоптики (рис. 3).

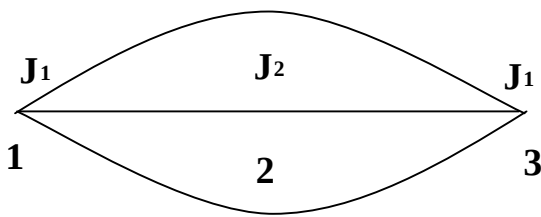


Рис. 3. Досліджувана вихідна модель крайового вузла на основі діакоптики

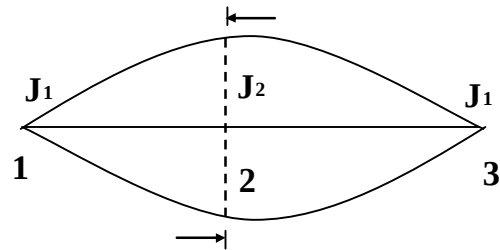


Рис. 4. Декомпозиція моделі крайового вузла на дві частини

Етап перший. Декомпозиція моделі.

Нехай модель розділяється на кілька ізольованих частин підмножин J_1 . В нашому випадку підмножині J_1 відповідає фаза 1 та 3, тому модель розділяється на дві ізольовані частини, як показано на рис.4. Відділення частин повинне бути настільки повним, що їх взаємодія має бути виключена. Важливо, щоб між підсистемами не існувало жодних зв'язних компонентів.

Другий етап. Видалення розділених зв'язків.

З досліджуваної системи видаляються усі цикли міжз'єднання (рис. 5). У підсистемах не залишається ніяких зв'язків з іншими підсистемами, за якими можна було б визначити, як вони були пов'язані один з одним, тобто передбачається, що розділені гілки не належать до жодної з n підсистем початкової системи. Оскільки ними не можна нехтувати, їх слід віднести до додаткової $n+1$ -ї підсистеми, яка спеціально для них створюється.



Рис. 5. Розділення моделі крайового вузла на дві ізольовані підсистеми

Найочевидніша перевага видалення зв'язків між структурами полягає в тому, що невідомі затримки для структури J_2 не будуть додатковими невідомими для кожної підсистеми J_1 . Отже, кількість невідомих у кожній підсистемі суттєво зменшується.

Третій етап – отримання і розв'язання рівняння (5) для кожної підсистеми.

Четвертий етап полягає в отриманні та розв'язанні рівнянь системи, що називається колом перетинів.

Коли початкова система розділяється на n підсистем J_1 , можна вважати, що кожна з них характеризується інтенсивністю трафіку λ . Для цього випадку розв'язання коло перетинів утворює N -вимірний абстрактний простір. Ці N -вимірні простори в початковій з'єднаній системі не будуть незалежними один від одного, а будуть перетинатися або накладатися.

Оскільки $(n+1)$ -а система перетинів (на рис. 2 представлена структурою J_2) відіграє центральну роль в методі розділення, виділяємо чотири стадії її побудови.

I стадія. З повних схем підсистем виділяються лише ті фрагменти, які важливі для взаємодії з іншими підсистемами. Для цих фрагментів записується спрощена матриця середнього часу обробки кадрів $F^1 = b$, яка є основою для побудови “опорного” кола перетинів. Далі визначаємо $C_1^{(1)}$, $C_1^{(2)}$ – матриці перетворення переходу F^1 до $F_{(1)}^1$, $F_{(1)}^2$, які відповідають кожній з підсистем J_1 . В такому випадку отримуємо:

$$F^1 = C_{1t} F^1 C_1,$$

де $C_1^{(1)}=1$, $C_1^{(2)}=1$.

II стадія. Видалені зв'язки відновлюються, але без врахування середнього часу обробки пакетів. Відновлення гілки здійснюється за допомогою матриці C_2 , яка відповідає за кількість зв'язків, приєднаних до вузла. Вона дозволяє відновити гілки в тому вигляді, в якому вони були після розподілу, але до їх видалення.

$$C_2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1' & 2' & 3' & 4' & 5' & 6' \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

III стадія. Фрагменти підсистем об'єднуються і утворюють “опорну” систему перетинів f' .

Об'єднання підсистем виконується за допомогою матриці C_3 . В нашому випадку матрицю C_3 можна записати так:

$$C_3 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1'4' & 2'5' & 3'6' \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1' \\ 2' \\ 3' \\ 4' \\ 5' \\ 6' \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Тоді об'єднання підсистем буде відбуватись, як показано на рис. 6.

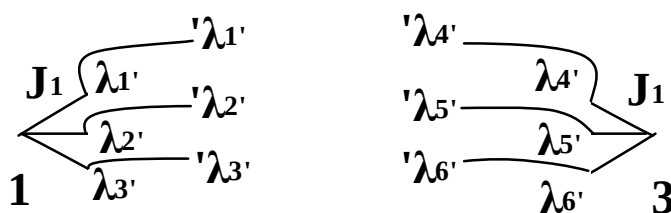


Рис. 6. Процес об'єднання гілок підсистем моделі крайового вузла

Маючи три перетворюючі матриці, можемо за їх допомогою отримати матрицю з'єднаної системи f з “опорної” матриці кола перетинів F^1 , двома різними способами. У першому методі краще почати зі зменшеної матриці підсистеми і використовувати лише дві перетворюючі матриці:

$$C_{23} = C_2 C_3,$$

Перетворюючи примітивну матрицю F^1 , на основі якої будується матриця кола перетинів, маємо:

$$f' = (C_{23})_t F^1 C_{23},$$

де f' – матриця, яка описує опорне коло перетинів.

Другий спосіб знаходження матриці виконують одним підходом, використовуючи добуток трьох матриць:

$$C = C_1 C_2 C_3.$$

де C має вигляд:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Матриця C має нульові елементи в тих рядках, які відповідають змінним, що не відносяться до гілок. Проте ці елементи повинні входити в матрицю, щоб її розміри відповідали розмірам матриці F_1 , на яку матриця C повинна множитися і в якій є відповідні елементи.

Отже, матрицю f' для “опорного” кола перетинів можна визначити за формулою:

$$f' = C_t F^1 C.$$

IV стадія. Вводяться середній час обробки кадрів видалених раніше гілок і остаточно формується матриця F .

Відновлення розділених гілок. Далі потрібно буде використовувати розділені гілки і їх діагональну матрицю пропускових здатностей, що відповідає підсистемі J_2 .

Кінцева стадія полягає в об'єднанні “опорного” кола перетинів і розділених гілок:

$$F = f' + I = C_t F^1 C + I.$$

Просте збільшення розділених гілок матриці I може бути завжди виконане навіть в найскладніших типах з'єднань, оскільки кількість рядків і стовпців в матриці F дорівнює кількості розділених гілок.

Перетворення матриці F . Матриця F має кількість рядків і стовпців, що дорівнює кількості розміжених контурів.

V етап. Алгоритм розрахунку матриці значень часових затримок.

Для виконання цього алгоритму задані матриці F^1 і C телекомунікаційної системи, що складається із $n+1$ підсистем. Коли середня інтенсивність потоку у вузлах в кожній підсистемі J_1 є однаковою, то спостерігається баланс потоків, а загальний час затримки під час передавання пакетів дорівнюватиме часу затримки в ізольованих підсистемах J_1 .

Необхідно знайти вектор ρ коефіцієнта завантаження СМО у вузлах вихідної системи. Для оптимізації усі розрахунки подано у транспонованому вигляді.

Вектор, який одержують на кожному етапі підрахунку, має відповідний фізичний зміст, а саме:

1. $\rho_1 = F^1 \lambda$ – коефіцієнт завантаження СМО в ізольованих підсистемах, за заданої середньої інтенсивності потоку на вузлах.

2. $\rho^* = -C_t \rho_1$ – час затримки передавання пакетів у перерізі j .

3. $\lambda^* = L' \rho^*$ – середня інтенсивність потоку, що проходить через J_2 .

4. $\lambda^t = C \lambda^*$ – додаткова середня інтенсивність потоку в підсистемах J_1 , що виникає за рахунок навантаження у зв'язках між підсистемами J_2 .

5. $\rho_2 = F_1 \lambda^t$ – коефіцієнт завантаження СМО у вузлах, внаслідок взаємодії з додатковим навантаженням системи J_2 .

6. $\rho = \rho_1 + \rho_2$ – результуюче значення величини коефіцієнта завантаження СМО в об'єднаній системі.

В описаному алгоритмі уже відомі процедури поєднуються разом у новій послідовності для розрахунку складних топологій телекомунікаційних мереж, зокрема й повністю оптичних. Метод діакоптики, застосований до складної топологічної структури, описаної рівнянням (5), дозволив знайти розв'язки складної системи загалом, розрахувавши її елементарні компоненти. Аналогічно в співвідношеннях (1) та (3) добутки $\lambda_{ij} b_{ik}^{(2)}$ і $\lambda_{ij} b_{ik}^{(3)}$ також визначаються методом діакоптики.

Прогнозування параметрів якості обслуговування методом діакоптики та звичайними методами СМО для транспортної фотонної мережі. Моделювання проводиться для випадку агрегації трьох типів трафіку в крайовому вузлі фотонної транспортної мережі: VoIP, IPTV та DoIP. Для моделювання задаємо необхідну кількість джерел трафіку, середні розміри пакета, швидкість передавання даних для кожного типу трафіку та тривалість моделювання. Вихідні дані для моделювання подано в таблиці.

Вихідні дані для моделювання трафіку у крайовому вузлі фотонної транспортної мережі

Назва параметра	VoIP	IPTV	DoIP
Кількість джерел	1000	200	500
Середній розмір пакета, байт	64	512	1024
Швидкість передавання, кбіт/с	128	4096	2048
Тривалість моделювання, год	50	50	50

Моделювання проводиться для двох різних методів: СМО та з урахуванням діакоптики. У разі моделювання методом діакоптики для спрощення припускається, що розділені гілки моделі крайового вузла не належать до жодної базової підсистеми. Метод діакоптики реалізований шляхом програмної реалізації алгоритму об'єднання кола перетинів з використанням матриці переходу. Профілі та густини розподілу ймовірності для модельованого голосового трафіку, відеотрафіку та трафіку передавання даних у фотонній транспортній мережі подано на рис. 7–9, відповідно.

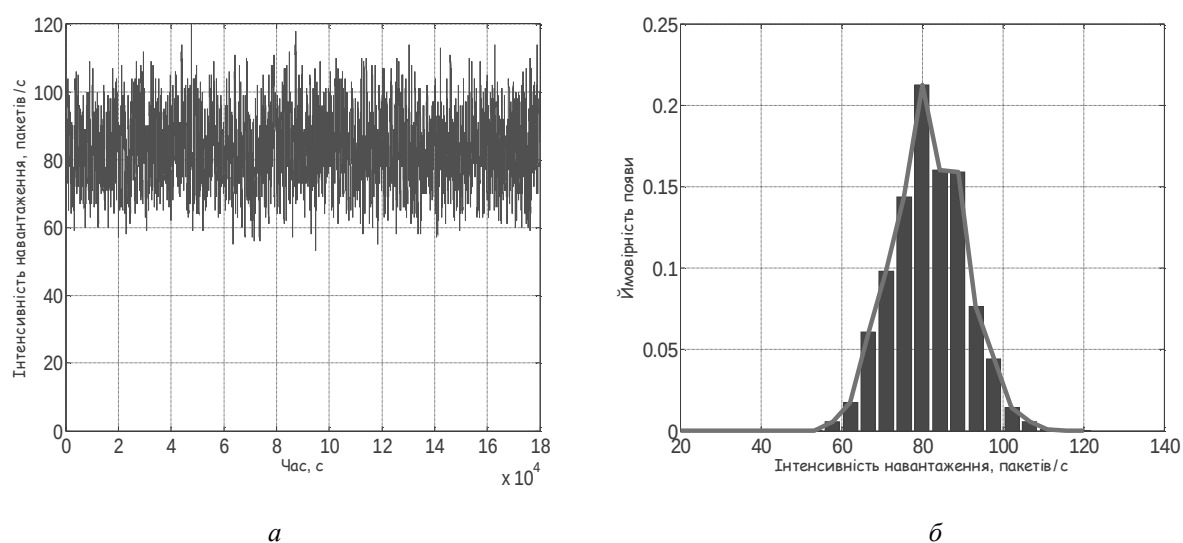


Рис. 7. Профіль (а) та густина розподілу ймовірності (б) для голосового трафіку

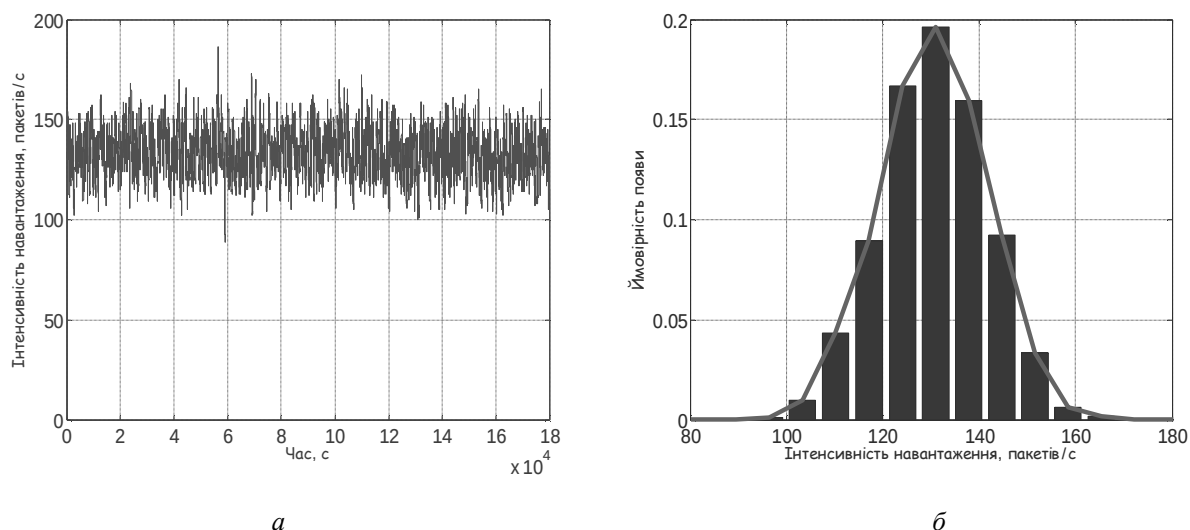


Рис. 8. Профіль (а) та густина розподілу ймовірності (б) для відеотрафіку

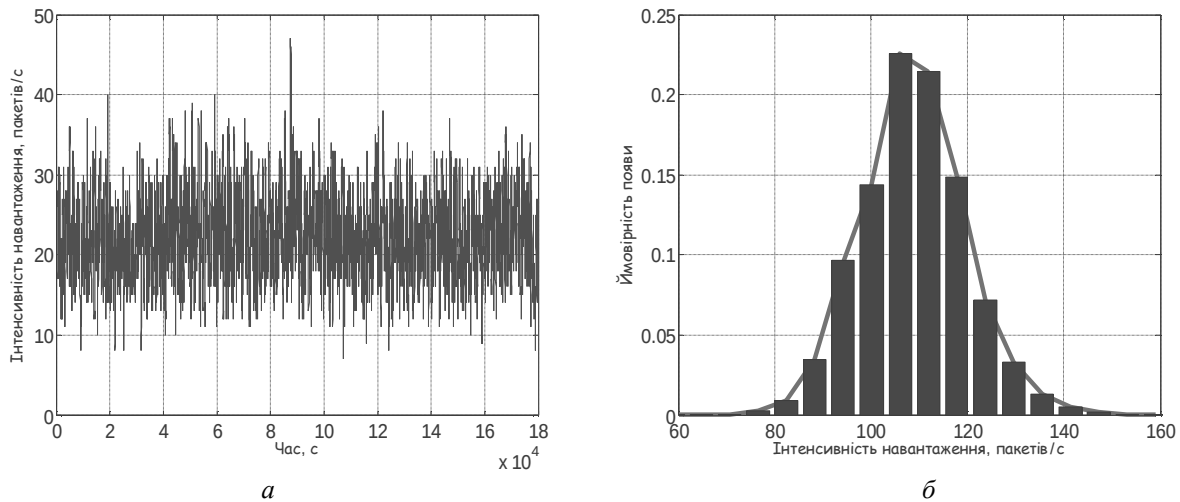


Рис. 9. Профіль (а) та густина розподілу ймовірності (б) для трафіку передавання даних

Порівняльні залежності точності прогнозування часових параметрів якості обслуговування QoS з використанням методу діакоптики та класичних методів СМО представлені на рис.10.

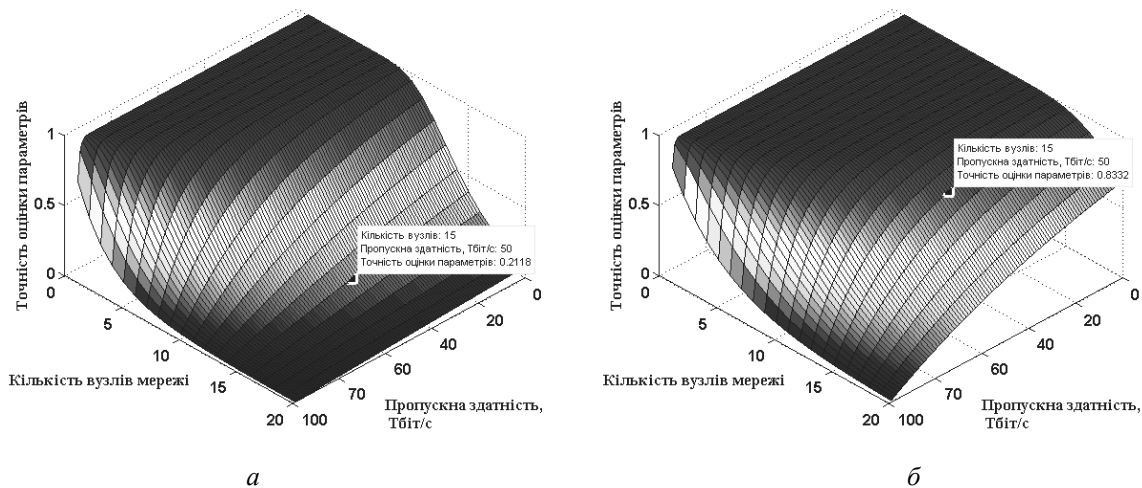


Рис. 10. Просторові залежності точності прогнозування від розміру та пропускної здатності мережі для класичних методів СМО (а) та методу діакоптики (б)

Висновки. Запропоновано новий метод дослідження та прогнозування параметрів якості сервісу в фотонних транспортних мережах. Цей метод полягає у використанні діакоптики для декомпозиції крайового (агрегуючого) вузла фотонної мережі на декілька ізольованих підсистем. Це дозволяє провести дослідження та записати аналітичний вираз незалежно для кожної підсистеми. Результуючий вираз для системи загалом знаходять з використанням матриці переходу. Він дає змогу розрахувати оптимальні параметри крайового вузла для забезпечення необхідних вимог до якості сервісу. Проведено імітаційне моделювання та порівняння точності прогнозування з використанням методу діакоптики з раніше відомими методами. Отримані залежності показують, що точність класичних методів СМО за середнього значення завантаженості та складної структури мережі становить 21 %, тоді як в аналогічних умовах у мережі з використанням методу діакоптики – 83 %.

1. Хмелев К. Основы фотонного транспорта. – К.: Техника, 2008, ISBN. 2. Dumych S., Maksymyuk T., Krasko O. and Guskov P. The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network // In Proc. IEEE International Conference on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013), Lviv Polytechnic National Univ., Ukraine, p.87, Feb.

2013. 3. Dumych S., Guskov P., Maksymyuk T. and Klymash M. Simulation of characteristics of optical burst switched networks / In Proc. IEEE International Conference on Microwave & Telecommunication technology (CriMiCo'2013), Sevastopol, Crimea, pp. 492-493, Sep. 2013. 4. Dumych S., Maksymyuk T. and Guskov P. Simulation of Burst Aggregation and Signaling schemes for Optical Burst Switched Networks / in Int. Conf. Computer Science and Engineering, Lviv Polytechnic National Univ., Ukraine, pp. 40-41, Nov. 2013. 5. Kleinrock L. Queueing Systems, Wiley-Interscience, 1975. 6. Алиев Т.И. Математические методы теории вычислительных систем: учеб. пособие. – Л.: ЛИТМО, 1979. 7. Алиев Т.И., Никульский И.Е., Пяттаев В.О. Моделирование ядра мультисервисной сети с относительной приоритезацией неоднородного трафика: научно-технический вестник – СПб. ГУИТМО, вып. 04 (62) СПб., 2009. – С. 88-96. 8. Klymash M., Strykhalyuk B., Kaidan M. and Demydov I. Traffic routing in telecommunication nets and its diakoptics representation // Computational Problems of Electrical Engineering, 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 15-19. 9. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – Диакоптика. – М.: Наука, 1972. – 543 с. 10. Стрихалюк Б. М., Климаш М. М., Кайдан М. В. Тензорне подання топологічних структур тороїдальних мереж // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіoeлектроніка та телекомунікації, № 618 – Л.: 2008. – С.138-144. 11. Пасечников И. И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 216 с.