

Нодь Єлизавета Андріївна

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри теоретичної фізики,
Державний вищий навчальний заклад "Ужгородський національний університет", Ужгород, Україна
ORCID ID 0009-0006-7908-5925
elizabeth.nagy@uzhnu.edu.ua

Євич Маріанна Ярославівна

старший викладач кафедри теоретичної фізики,
Державний вищий навчальний заклад "Ужгородський національний університет", Ужгород, Україна
ORCID ID 0000-0001-7929-6382
marianna.yevych@uzhnu.edu.ua

Євич Євгенія Русланівна

студентка III курсу фізичного факультету,
Державний вищий навчальний заклад "Ужгородський національний університет", Ужгород, Україна
ORCID ID 0009-0005-6165-7326
yevych.yevheniia@student.uzhnu.edu.ua

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ У ВЕЛИКИХ ДАНИХ (HIGH-DIMENSIONAL DATA)

Анотація. Сучасний розвиток інформаційного суспільства супроводжується стрімким зростанням обсягів даних, що передаються телекомунікаційними мережами, а також підвищенням вимог до швидкості, надійності та ефективності обробки інформації. Поширення мобільного зв'язку, хмарних сервісів, інтернету речей та цифрових платформ призводить до формування складних телекомунікаційних систем, які функціонують в умовах значних потоків даних і потребують застосування сучасних методів аналізу та оптимізації. У таких умовах важливу роль відіграє математичне моделювання, яке дозволяє формалізувати процеси передачі, обробки та зберігання інформації, досліджувати поведінку складних мережевих структур та прогнозувати ефективність їх функціонування. У статті розглянуто особливості застосування математичного моделювання для дослідження телекомунікаційних систем у середовищі великих даних. Проаналізовано основні підходи до побудови математичних моделей телекомунікаційних мереж, зокрема графові моделі, моделі систем масового обслуговування та стохастичні моделі інформаційних потоків. Особливу увагу приділено питанням оптимізації процесів маршрутизації даних, балансування навантаження між мережевими вузлами, а також підвищення ефективності використання пропускну здатності каналів зв'язку. Досліджено можливості використання математичних методів оптимізації для підвищення продуктивності телекомунікаційної інфраструктури та забезпечення стабільності її функціонування. Запропоновано підхід до оптимізації процесів обробки великих потоків інформації на основі застосування алгоритмів оптимізації та розподілених обчислювальних технологій. Показано, що інтеграція математичних моделей з технологіями обробки великих даних дозволяє зменшити затримки передачі інформації, знизити рівень втрат пакетів та підвищити ефективність управління інформаційними потоками у телекомунікаційних системах. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування сучасних телекомунікаційних мереж, центрів обробки даних та інформаційних платформ, а також для підвищення ефективності функціонування інфраструктури цифрової економіки.

Ключові слова: телекомунікаційні системи, оптимізація мереж, обробка інформації, математичне моделювання, інформаційні потоки.

Nagy Elizabeth

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Docent of the Department of Theoretical Physics,
Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine
ORCID ID 0009-0006-7908-5925
elizabeth.nagy@uzhnu.edu.ua

Yevych Marianna

Senior Lecturer of the Department of Theoretical Physics,
Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine
ORCID ID 0000-0001-7929-6382
marianna.yevych@uzhnu.edu.ua

Yevych Yevheniia

3rd year student of the Physics Faculty,
Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine

© 2026 Нодь Є.А., Євич М.Я., Євич Є.Р. Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

MATHEMATICAL MODELING OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS AND PROCESS OPTIMIZATION IN BIG DATA (HIGH-DIMENSIONAL DATA)

Abstract. The modern development of the information society is accompanied by a rapid growth in the volume of data transmitted by telecommunication networks, as well as increased requirements for the speed, reliability and efficiency of information processing. The spread of mobile communications, cloud services, the Internet of Things and digital platforms leads to the formation of complex telecommunication systems that operate in conditions of significant data flows and require the use of modern methods of analysis and optimization. In such conditions, mathematical modeling plays an important role, which allows formalizing the processes of information transmission, processing and storage, investigating the behavior of complex network structures and predicting the efficiency of their functioning. The article considers the features of the application of mathematical modeling for the study of telecommunication systems in the environment of big data. The main approaches to building mathematical models of telecommunication networks are analyzed, in particular graph models, models of queuing systems and stochastic models of information flows. Particular attention is paid to the issues of optimizing data routing processes, load balancing between network nodes, and increasing the efficiency of using communication channel bandwidth. The possibilities of using mathematical optimization methods to increase the productivity of telecommunications infrastructure and ensure the stability of its functioning are investigated. An approach to optimizing the processes of processing large information flows based on the use of optimization algorithms and distributed computing technologies is proposed. It is shown that the integration of mathematical models with big data processing technologies allows reducing information transmission delays, reducing the level of packet loss and increasing the efficiency of information flow management in telecommunications systems. The results obtained can be used when designing modern telecommunications networks, data centers and information platforms, as well as to increase the efficiency of the functioning of the digital economy infrastructure.

Keywords: telecommunication systems, network optimization, information processing, mathematical modeling, information flows.

1. Вступ

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій у сучасному світі супроводжується значним зростанням обсягів інформації, що передається та обробляється телекомунікаційними системами. Поширення мобільних мереж, хмарних обчислень, інтернету речей, потокових сервісів та цифрових платформ призводить до формування складних інформаційних інфраструктур, у яких обсяги переданих даних постійно збільшуються. У таких умовах телекомунікаційні системи повинні забезпечувати високу пропускну здатність каналів зв'язку, мінімальні затримки передачі інформації, надійність функціонування мережевих вузлів та ефективне використання ресурсів мережі.

Однією з ключових особливостей сучасних телекомунікаційних систем є робота з великими даними, що характеризуються значним обсягом, високою швидкістю надходження та різноманітністю форматів інформації. Обробка таких даних потребує застосування сучасних методів аналізу, оптимізації та прогнозування, що дозволяють забезпечити стабільність функціонування телекомунікаційних мереж. У цьому контексті особливого значення набуває використання математичного моделювання, яке дає змогу досліджувати складні процеси передачі та обробки інформації, оцінювати ефективність роботи мережевих систем та визначати оптимальні параметри їх функціонування.

Математичне моделювання телекомунікаційних систем дозволяє формалізувати процеси взаємодії між мережевими елементами, аналізувати інформаційні потоки, визначати характеристики навантаження на канали зв'язку та прогнозувати поведінку мережі у різних режимах роботи. Використання таких моделей сприяє підвищенню ефективності управління телекомунікаційною інфраструктурою, зменшенню втрат пакетів, оптимізації маршрутизації даних та забезпеченню високої якості обслуговування користувачів.

У сучасних умовах для дослідження телекомунікаційних систем широко застосовуються різні математичні підходи, зокрема теорія графів, теорія масового обслуговування, стохастичні процеси, методи оптимізації та алгоритми машинного навчання. Поєднання цих методів з технологіями обробки великих даних дозволяє створювати ефективні моделі телекомунікаційних систем, здатні адаптуватися до змін навантаження та забезпечувати оптимальне використання ресурсів мережі.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення нових підходів до математичного моделювання телекомунікаційних систем, які б враховували особливості роботи з великими даними та забезпечували ефективну оптимізацію мережевих процесів. Використання сучасних математичних моделей дає можливість підвищити продуктивність телекомунікаційних систем, покращити якість передачі інформації та забезпечити надійне функціонування мереж у умовах зростаючого інформаційного навантаження.

2. Постановка проблеми

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій, поширення мобільних мереж, хмарних сервісів, потокових платформ та інтернету речей призводять до значного зростання обсягів даних, що передаються телекомунікаційними системами. У сучасних умовах телекомунікаційні мережі повинні забезпечувати високу пропускну здатність, мінімальні затримки передачі інформації та стабільність функціонування навіть за умов значного навантаження. Однак зростання інтенсивності інформаційних потоків у

середовищі великих даних часто призводить до перевантаження каналів зв'язку, збільшення часу обробки інформації, втрат пакетів та зниження якості обслуговування користувачів. Це створює необхідність пошуку ефективних методів аналізу та управління мережевими ресурсами.

Одним із найбільш ефективних інструментів дослідження складних телекомунікаційних систем є математичне моделювання, яке дозволяє формалізувати процеси передачі та обробки інформації, досліджувати поведінку мережових структур та визначати оптимальні параметри їх функціонування. Особливо важливим є застосування математичних моделей для оптимізації процесів обробки великих потоків даних, підвищення ефективності маршрутизації та балансування навантаження між мережевими вузлами. У зв'язку з цим актуальним науковим і практичним завданням є розроблення та дослідження математичних моделей телекомунікаційних систем, що забезпечують оптимізацію мережових процесів та підвищення ефективності функціонування інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури.

3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема математичного моделювання телекомунікаційних систем та оптимізації процесів обробки великих даних розглядається в численних наукових роботах останніх років, що свідчить про її актуальність та значущість. Перші фундаментальні підходи до моделювання мережових систем ґрунтуються на теорії графів, які використовуються для формалізації топології мереж та дослідження найкоротших шляхів передачі даних. Так, роботи з теорії графів та їх застосування в телекомунікаціях демонструють, що компоненти мережі можуть бути описані як вершини графа, а канали зв'язку – як ребра з вагами, що характеризують витрати ресурсів або час передачі [1]–[3]. Ці підходи дозволяють аналізувати оптимальні маршрути, однак вони не враховують випадковості навантаження та динамічних змін потоків даних, що є важливою частиною сучасних систем з великими даними.

Моделі теорії масового обслуговування були широко застосовані для вивчення поведінки потоку пакетів у мережах при випадковій інтенсивності запитів [4]–[6]. У цих роботах досліджуються характеристики систем, зокрема середній час очікування в черзі та ймовірність перевантаження, що дає змогу прогнозувати поведінку мережових вузлів у випадках високого навантаження. Незважаючи на це, такі моделі часто припускають стаціонарність процесів та обмеженість розподілів інтенсивності, що знижує їхню придатність для аналізу великих даних з високою варіативністю.

Останні публікації присвячені застосуванню методів оптимізації та алгоритмів штучного інтелекту для розв'язання задач маршрутизації та балансування навантаження. Зокрема, у роботах [7] та [8] запропоновано комбіновані підходи, що поєднують класичні алгоритми Дейкстри та евристичні оптимізаційні методи для адаптивного вибору маршрутів у мережах з великим обсягом трафіку. Попри значні успіхи, ці підходи залишають невирішеним питання інтеграції прогнозних моделей для оцінювання майбутніх навантажень та динамічних алгоритмів, що здатні самостійно адаптуватись до змін у потоках даних.

У роботах [9]–[11] розглядають застосування машинного навчання для прогнозування мережових навантажень, що відкриває нові можливості в оптимізації функціонування телекомунікаційних систем. Проте більшість досліджень обмежується апробованими наборами даних та синтетичними моделями, і недостатньо уваги приділяється інтеграції таких підходів у реальні телекомунікаційні мережі з характерними для великих даних варіаціями потоків.

Таким чином, проаналізовані джерела демонструють значний прогрес у математичному моделюванні та оптимізації телекомунікаційних систем, проте залишається відкритою проблема комплексного моделювання динамічних інформаційних потоків у середовищі великих даних, що включає адаптивне прогнозування навантажень та оптимізацію в режимі реального часу.

4. Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є розробка математичних моделей телекомунікаційних систем у середовищі великих даних, які забезпечують можливість ефективного аналізу, прогнозування та оптимізації процесів передачі й обробки інформації. Окрім побудови формалізованих моделей функціонування мережових інфраструктур, основна увага приділяється забезпеченню оптимізації маршрутизації даних, балансування навантаження між мережевими вузлами та підвищенню ефективності використання ресурсів телекомунікаційних систем в умовах зростаючих інформаційних потоків.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- розробити та проаналізувати математичну модель телекомунікаційної системи, яка враховує особливості функціонування мереж у середовищі великих даних, зокрема структуру мережі, інтенсивність інформаційних потоків та характеристики обслуговування запитів;
- дослідити та обґрунтувати методи оптимізації процесів обробки та маршрутизації даних, спрямовані на підвищення ефективності використання мережових ресурсів, зменшення затримок передачі інформації та забезпечення балансування навантаження між елементами телекомунікаційної системи.

5. Результати дослідження

5.1. Розроблення та аналіз математичної моделі телекомунікаційної системи в умовах великих даних

Для адекватного опису телекомунікаційних систем у середовищі великих даних доцільно використовувати комбінований підхід, що поєднує теорію графів, стохастичні процеси та мережі масового обслуговування. Така система формалізується як орієнтований граф (1):

$$G = (V, E) \quad (1)$$

де $V = \{1, 2, \dots, N\}$ – множина вузлів телекомунікаційної мережі, причому N – загальна кількість вузлів (маршрутизаторів, серверів, центрів обробки даних); E – множина каналів зв'язку (ребер графа), що визначають можливі напрямки передачі даних між вузлами.

Інтенсивність надходження інформаційних потоків до вузлів мережі описується векторним стохастичним процесом: (2):

$$\lambda(t) = \{\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_N(t)\} \quad (2)$$

де $\lambda_i(t)$ – інтенсивність вхідного потоку пакетів у вузол i у момент часу t , яка вимірюється, наприклад, у пакетах за одиницю часу; t – неперервний час..

Динаміка стану мережі описується через вектор довжин черг (3):

$$Q(t) = \{Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_N(t)\} \quad (3)$$

де $Q_i(t)$ – кількість пакетів (або заявок) у черзі вузла i у момент часу t .

Динаміка зміни довжини черги у кожному вузлі визначається рівнянням балансу потоків (4):

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = \lambda_i(t) + \sum_{j \neq i} Q_j(t) p_{ji} - Q_i(t) \sum_{k \neq i} p_{ik} - \mu_i Q_i(t), \quad (4)$$

де $\frac{dQ_i(t)}{dt}$ – швидкість зміни кількості пакетів у вузлі i ; $Q_j(t)$ – довжина черги у вузлі j ; p_{ij} – ймовірність передачі пакета з вузла j до вузла i (елемент матриці маршрутизації); $\sum_{j \neq i} Q_j(t) p_{ji}$ – сумарний потік пакетів, що надходять до вузла i з інших вузлів; $\sum_{k \neq i} p_{ik}$ – сумарна ймовірність виходу пакетів з вузла i до інших вузлів;

μ_i – інтенсивність обслуговування у вузлі i (кількість пакетів, які обробляються за одиницю часу); $\mu_i Q_i(t)$ – швидкість обробки пакетів у вузлі i .

Таким чином, система описується як марковський процес з розгалуженням, що дозволяє враховувати стохастичний характер потоків великих даних. Для мереж великого масштабу доцільно використовувати узагальнену модель мережі Джексона, для якої стаціонарний розподіл має вигляд (5):

$$P(n_1, \dots, n_N) = \prod_{i=1}^N (1 - \rho_i) \rho_i^{n_i}, \quad \rho_i = \frac{\lambda_i + \sum_{j=1}^N \Lambda_j p_{ji}}{\mu_i}, \quad (5)$$

де N – загальна кількість вузлів мережі; ρ_i – коефіцієнт завантаження вузла i ; Λ_j – повна (ефективна) інтенсивність потоку в вузлі j , що враховує як зовнішні, так і внутрішні потоки.

Ця система дозволяє враховувати взаємозалежність вузлів мережі, що є критично важливим для середовища великих даних.

У контексті високонавантажених систем доцільно використовувати також дифузійне наближення, де динаміка черг описується стохастичним диференціальним рівнянням (6):

$$dQ_i(t) = (\Lambda_i - \mu_i) dt + \sigma_i dW_i(t) \quad (6)$$

де Λ_i – ефективна інтенсивність вхідного потоку; σ_i – інтенсивність флуктуацій; $W_i(t)$ – вінерівський процес.

Це дозволяє врахувати бурстовий характер трафіку великих даних, який не описується класичними пуассонівськими моделями. Загальна затримка в мережі визначається через інтегральну характеристику (7):

$$T = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^{T_0} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i(t)}{\Lambda_i} dt, \quad (7)$$

де T_0 – інтервал спостереження, що відповідає узагальненій формі закону Літтла для мереж.

Таким чином, отримана математична модель дозволяє детально описати процеси функціонування телекомунікаційної системи в умовах великих даних, враховуючи як стохастичний характер інформаційних потоків, так і взаємозв'язки між вузлами мережі. Це створює основу для подальшого розв'язання задач оптимізації мережевих процесів.

5.2. Оптимізація процесів маршрутизації та обробки даних у телекомунікаційній системі

На основі розробленої математичної моделі телекомунікаційної системи виникає задача оптимізації процесів передачі, розподілу та обробки інформаційних потоків у середовищі великих даних. Особливістю таких систем є висока інтенсивність потоків, їх стохастичний характер та наявність значних пікових навантажень, що призводить до перевантаження окремих вузлів і деградації якості обслуговування. У зв'язку з цим основною метою оптимізації є мінімізація затримок передачі даних, балансування навантаження між вузлами мережі та забезпечення стійкості функціонування системи в умовах змінної інтенсивності потоків.

Формально задача оптимізації розглядається як задача керування потоками в мережі масового обслуговування з керованими параметрами маршрутизації: (8):

$$P = \{p_{ij}\}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (8)$$

Вибір саме ймовірнісного підходу до маршрутизації обумовлений необхідністю гнучкого перерозподілу потоків у випадку змін навантаження, що є характерним для систем обробки великих даних.

$$\sum_{j=1}^N p_{ij} = 1, \quad p_{ij} \geq 0,$$

Обмеження на параметри маршрутизації гарантують коректність розподілу потоків, тобто кожен пакет після обробки у вузлі обов'язково спрямовується до одного з наступних вузлів або на вихід із системи.

Цільова функція оптимізації базується на мінімізації середнього часу перебування пакета в системі (9):

$$\min_P T = \sum_{i=1}^N \frac{\Lambda_i}{\mu_i - \Lambda_i}, \quad (9)$$

де T є узагальненим показником ефективності функціонування мережі. Дана функція враховує нелінійне зростання затримок при наблизенні інтенсивності потоку Λ_i до граничної пропускної здатності вузла μ_i , що відповідає реальним процесам перевантаження в телекомунікаційних системах.

Інтенсивності потоків визначаються через баланс потоків що відображає взаємозалежність усіх вузлів мережі. Таким чином, зміна маршрутизації в одному вузлі впливає на навантаження інших вузлів, що ускладнює задачу оптимізації та зумовлює необхідність використання системного підходу.

Для знаходження оптимальних значень параметрів використовується метод множників Лагранжа (10):

$$L = \sum_{i=1}^N \frac{\Lambda_i}{\mu_i - \Lambda_i} + \sum_{i=1}^N \theta_i \left(\Lambda_i - \lambda_i - \sum_{j=1}^N \Lambda_j p_{ij} \right), \quad (10)$$

де θ_i – допоміжні змінні, що забезпечують виконання умов балансу потоків. Отримана система рівнянь дозволяє визначити оптимальні маршрути передачі даних з урахуванням поточного навантаження мережі.

На рис. 1 представлено телекомунікаційну мережу у вигляді графа, де вузли відповідають центрам обробки даних або мережевим маршрутизаторам, а ребра – каналам зв'язку. Кожен вузол характеризується трьома основними параметрами: інтенсивністю вхідного потоку λ_i , сумарним потоком; Λ_i та інтенсивністю

обслуговування μ_i . Стрілки між вузлами відображають напрямки передачі даних з відповідними ймовірностями p_{ij} .

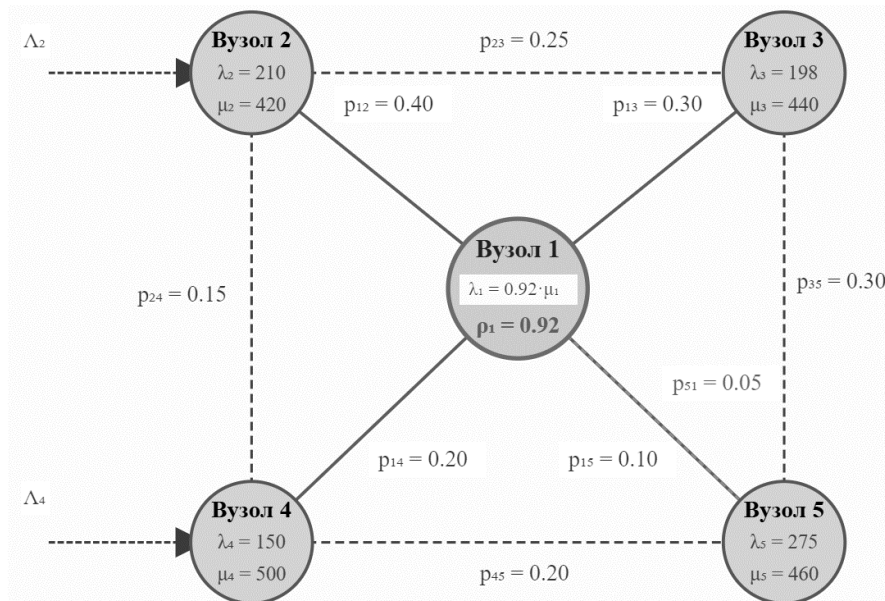


Рис. 1. Схема оптимізації потоків у телекомунікаційній мережі

Окремо на схемі виділяється перевантажений вузол, для якого коефіцієнт завантаження ρ_i наближається до одиниці. У результаті оптимізації частина потоків перенаправляється альтернативними маршрутами, що дозволяє зменшити навантаження на критичні елементи мережі. Таким чином, рис. 1 ілюструє процес адаптивного балансування трафіку.

Для врахування часової динаміки великих даних параметри маршрутизації розглядаються як функції часу $p_{ij} = p_{ij}(t)$, що дозволяє адаптувати структуру потоків залежно від поточного стану системи. Це особливо важливо для сучасних телекомунікаційних мереж, у яких навантаження може змінюватися в широких межах протягом коротких проміжків часу.

Якість функціонування системи у динамічному режимі оцінюється за допомогою інтегрального функціоналу (11):

$$J = \int_0^T \sum_{i=1}^N \frac{Q_i(t)}{\mu_i} dt \tag{11}$$

де J характеризує сумарне навантаження мережі за певний період часу. Мінімізація цього функціоналу $\min_{p_{ij}(t)} J$ дозволяє забезпечити рівномірний розподіл ресурсів та уникнути утворення довгих черг у вузлах.

Запропонований підхід до оптимізації має такі переваги: він враховує стохастичний характер потоків, забезпечує адаптивність до змін у середовищі великих даних та дозволяє формалізувати задачу керування мережею у вигляді математичної моделі. Це створює основу для подальшого впровадження інтелектуальних алгоритмів керування трафіком, зокрема із застосуванням методів машинного навчання та прогнозування навантаження, що є перспективним напрямом розвитку сучасних телекомунікаційних систем.

6. Висновки та перспективи подальших досліджень

У даному дослідженні було проведено розробку математичної моделі телекомунікаційної системи в умовах великих даних та її аналіз з точки зору динаміки потоків, навантаження вузлів і часу перебування пакетів у мережі. Розглянута стохастична модель дозволяє враховувати як зовнішні, так і внутрішні потоки даних, що надходять між вузлами, та оцінювати ефективність функціонування системи за допомогою інтегральних та локальних показників, таких як коефіцієнт завантаження вузлів та середній час перебування пакета. Було розроблено підхід до оптимізації процесів маршрутизації та обробки даних, який включає нелінійну модель управління потоками з використанням множників Лагранжа.

Запропоновані методи дозволяють мінімізувати середній час перебування пакетів у системі, забезпечувати адаптивне перенаправлення потоків у разі перевантаження окремих вузлів та враховувати динамічні зміни інтенсивності великих даних через час-залежні ймовірності маршрутизації.

Модель та результати оптимізації були проілюстровані у вигляді графової схеми мережі, що демонструє взаємозалежність вузлів та альтернативні маршрути для зниження навантаження, а використання запропонованого підходу дозволяє підвищити ефективність телекомунікаційних систем та зменшити ризик перевантаження окремих вузлів при інтенсивному обміні великими даними.

Перспективи подальших досліджень включають інтеграцію методів машинного навчання та прогнозування навантаження, що дозволить передбачати пікові потоки та автоматично адаптувати маршрутизацію, розширення моделі на багаторівневі та розподілені хмарні системи, де враховуються затримки каналів, пропускна здатність та пріоритети пакетів, розробку інтелектуальних алгоритмів керування мережею з урахуванням ризиків перевантаження та варіацій великих даних у режимі реального часу, а також впровадження запропонованих методів у практичні мережі зв'язку та центри обробки даних, що дозволить оцінити ефективність оптимізації на рівні експлуатації системи. Проведене дослідження створює основу для розвитку адаптивних та ефективних телекомунікаційних систем нового покоління, здатних до самостійного регулювання потоків великих даних та забезпечення високої якості обслуговування користувачів.

Внесок авторів

Єлизавета Нодь – концептуалізація; методика; Євгенія Євич – програмне забезпечення; Маріанна Євич – збір і перевірка емпіричних даних; Єлизавета Нодь – емпіричне дослідження; Маріанна Євич – аналіз джерел, підготовка огляду літератури або теоретичних основ дослідження.

Декларація про штучний інтелект

Під час підготовки статті штучний інтелект не використовувався для проведення досліджень або обробки даних. Текст статті, математичні моделі, формули та висновки були сформовані автором самостійно. Використання будь-яких інструментів ШІ обмежувалося лише мінімальною допомогою в редагуванні стилю та перевірці граматики, без впливу на зміст або наукову достовірність роботи.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів та підтверджує, що під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

Список використаної літератури

1. Ren, H., Jang, J., Li, C., Aigner, A., Plidschun, M., Kim, J., & Maier, S. A. (2022). An achromatic metafiber for focusing and imaging across the entire telecommunication range. *Nature communications*, 13(1), 4183. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31902-3>
2. Leus, G., Marques, A. G., Moura, J. M., Ortega, A., & Shuman, D. I. (2023). Graph signal processing: History, development, impact, and outlook. *IEEE Signal Processing Magazine*, 40(4), 49-60. <https://doi.org/10.1109/MSP.2023.3262906>
3. Seguin, C., Sporns, O., & Zalesky, A. (2023). Brain network communication: concepts, models and applications. *Nature reviews neuroscience*, 24(9), 557-574. <https://doi.org/10.1038/s41583-023-00718-5>
4. Ferriol-Galmes, M., Paillisse, J., Suárez-Varela, J., Rusek, K., Xiao, S., Shi, X., & Cabellos-Aparicio, A. (2023). RouteNet-Fermi: Network modeling with graph neural networks. *IEEE/ACM transactions on networking*, 31(6), 3080-3095. <https://doi.org/10.1109/TNET.2023.3269983>
5. Kumar, G. R. S., & Arul Geetha, G. (2024). Graph neural networks based queuing model for optimal load balancing in mobile ad hoc network. *International Journal of Communication Systems*, 37(17), e5922. <https://doi.org/10.1002/dac.5922>
6. Sharma, S. (2025). Analysis of Power-Law Queues Using Maximum Entropy Framework: An Application to Performance Evaluation of Network Systems: S. Sharma et al. *Wireless Personal Communications*, 145(3), 679-697. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11142-y>
7. Tian, T., Wu, H., Wei, H., Wu, F., & Xu, M. (2025). An efficient route planning algorithm for special vehicles with large-scale road network data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(2), 71. <https://doi.org/10.3390/ijgi14020071>
8. Hadi, H. M., & Ibrahim, I. M. (2025). A Comprehensive Review of Shortest Path Algorithms for Network Routing. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 18(3), 152-175. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2025/v18i3584>
9. Haider, U., Waqas, M., Hanif, M., Alasmay, H., & Qaisar, S. M. (2023). Network load prediction and anomaly detection using ensemble learning in 5G cellular networks. *Computer communications*, 197, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.10.017>
10. Masich, I. S., Tynchenko, V. S., Nelyub, V. A., Bukhtoyarov, V. V., Kurashkin, S. O., Gantimurov, A. P., & Borodulin, A. S. (2022). Prediction of critical filling of a storage area network by machine learning methods. *Electronics*, 11(24), 4150. <https://doi.org/10.3390/electronics11244150>

11. Cordeiro-Costas, M., Villanueva, D., Eguía-Oller, P., Martínez-Comesaña, M., & Ramos, S. (2023). Load forecasting with machine learning and deep learning methods. *Applied Sciences*, 13(13), 7933. <https://doi.org/10.3390/app13137933>

References

1. Ren, H., Jang, J., Li, C., Aigner, A., Plidschun, M., Kim, J., & Maier, S. A. (2022). An achromatic metafiber for focusing and imaging across the entire telecommunication range. *Nature communications*, 13(1), 4183. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31902-3>
2. Leus, G., Marques, A. G., Moura, J. M., Ortega, A., & Shuman, D. I. (2023). Graph signal processing: History, development, impact, and outlook. *IEEE Signal Processing Magazine*, 40(4), 49-60. <https://doi.org/10.1109/MSP.2023.3262906>
3. Seguin, C., Sporns, O., & Zalesky, A. (2023). Brain network communication: concepts, models and applications. *Nature reviews neuroscience*, 24(9), 557-574. <https://doi.org/10.1038/s41583-023-00718-5>
4. Ferriol-Galmes, M., Paillisse, J., Suárez-Varela, J., Rusek, K., Xiao, S., Shi, X., & Cabellos-Aparicio, A. (2023). RouteNet-Fermi: Network modeling with graph neural networks. *IEEE/ACM transactions on networking*, 31(6), 3080-3095. <https://doi.org/10.1109/TNET.2023.3269983>
5. Kumar, G. R. S., & Arul Geetha, G. (2024). Graph neural networks based queuing model for optimal load balancing in mobile ad hoc network. *International Journal of Communication Systems*, 37(17), e5922. <https://doi.org/10.1002/dac.5922>
6. Sharma, S. (2025). Analysis of Power-Law Queues Using Maximum Entropy Framework: An Application to Performance Evaluation of Network Systems: S. Sharma et al. *Wireless Personal Communications*, 145(3), 679-697. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11142-y>
7. Tian, T., Wu, H., Wei, H., Wu, F., & Xu, M. (2025). An efficient route planning algorithm for special vehicles with large-scale road network data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(2), 71. <https://doi.org/10.3390/ijgi14020071>
8. Hadi, H. M., & Ibrahim, I. M. (2025). A Comprehensive Review of Shortest Path Algorithms for Network Routing. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 18(3), 152-175. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2025/v18i3584>
9. Haider, U., Waqas, M., Hanif, M., Alasmay, H., & Qaisar, S. M. (2023). Network load prediction and anomaly detection using ensemble learning in 5G cellular networks. *Computer communications*, 197, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.10.017>
10. Masich, I. S., Tynchenko, V. S., Nelyub, V. A., Bukhtoyarov, V. V., Kurashkin, S. O., Gantimurov, A. P., & Borodulin, A. S. (2022). Prediction of critical filling of a storage area network by machine learning methods. *Electronics*, 11(24), 4150. <https://doi.org/10.3390/electronics11244150>
11. Cordeiro-Costas, M., Villanueva, D., Eguía-Oller, P., Martínez-Comesaña, M., & Ramos, S. (2023). Load forecasting with machine learning and deep learning methods. *Applied Sciences*, 13(13), 7933. <https://doi.org/10.3390/app13137933>

Надійшла до редакції: 19.03.26

Прийнята до друку: 12.06.26

Опубліковано: 30.06.26