

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-36>

УДК 621.391:519.217

### КЛАВДІЄВ ВЯЧЕСЛАВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0009-0001-3086-8260>

e-mail: [Viacheslav.Klavdiiev@infiz.khpi.edu.ua](mailto:Viacheslav.Klavdiiev@infiz.khpi.edu.ua)

### ПУСТОВОЙТОВ ПАВЛО

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0000-0003-3884-0200>

e-mail: [Pavlo.Pustovoitov@khpi.edu.ua](mailto:Pavlo.Pustovoitov@khpi.edu.ua)

## МАРКОВСЬКА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ КЕРУВАННЯ МАСШТАБУВАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

У статті представлено марковську модель прогнозного керування масштабуванням телекомунікаційної мережі, що описує стохастичну еволюцію навантаження та переходи між режимами функціонування системи. Модель подає роботу мережі у вигляді дискретного марковського процесу з матрицею переходів, яка визначає ймовірності зміни станів залежно від рівня активності трафіку. Запропонований підхід дозволяє враховувати фази нормального та пікового навантаження і формувати прогноз майбутнього стану мережі на основі  $k$ -крокових переходів. Моделювання з використанням даних, наближених до результатів симуляцій у середовищі OMNeT++, показало зменшення часу реакції системи на перевантаження приблизно на 15% порівняно з традиційними методами масштабування. Отримані результати підтверджують ефективність марковського підходу для задач прогнозного керування та його придатність для адаптивного розширення ресурсів сучасних телекомунікаційних мереж.

**Ключові слова:** марковський процес, масштабування мережі, якість обслуговування, мережевий трафік, оптимізація ресурсів, прогнозування навантаження.

KLAVDIEV VIACHESLAV, PUSTOVOITOV PAVLO

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

### MARKOV MODEL FORECASTING CONTROL OF TELECOMMUNICATION NETWORK SCALPING

The article presents a Markov model of predictive control of the scaling of a telecommunication network, designed to describe the stochastic evolution of the network load and transitions between the main modes of the system's operation. The growth of traffic volumes and the dynamism of modern telecommunication systems necessitate the use of models that can take into account the random nature of changes in the intensity of data transmission and ensure timely decision-making on the expansion of network resources. In the proposed approach, the network operation is presented in the form of a discrete Markov process, where each state corresponds to a certain load level, and transitions between states are determined by a probability matrix that reflects the statistical characteristics of traffic.

The model allows taking into account various modes of network operation, including average load intervals, short-term peak surges and potential overload states. Based on  $k$ -step Markov transitions, a forecast of the future state of the system is formed, which makes it possible to estimate the probability of transition to critical modes and initiate scaling of computing or network resources in advance. This approach provides a transition from reactive to proactive control, which is important for maintaining stable quality of service in conditions of uneven and unpredictable traffic.

To verify the effectiveness of the proposed model, numerical simulations were conducted using input data close to the results of simulations in the OMNeT++ environment. The results obtained showed that the use of Markov forecasting allows reducing the system response time to peak loads by approximately 15% compared to traditional scaling methods based on current measurements of network parameters.

The results obtained confirm the effectiveness of the Markov approach for predictive control problems in telecommunication systems. The proposed model provides an adequate reflection of the dynamics of network traffic and can be used as an analytical basis for creating adaptive mechanisms for scaling resources in modern software-defined and cloud telecommunication networks.

**Keywords:** Markov process, network scaling, quality of service, network traffic, resource optimization, load forecasting.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Клавдієв Вячеслав, Пустовойтов Павло

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні телекомунікаційні мережі характеризуються зростанням кількості користувачів, обсягів трафіку та складності інфраструктури. Унаслідок цього навантаження на мережу має виражений стохастичний характер, що супроводжується нерівномірними коливаннями інтенсивності потоків і появою пікових перевантажень. У таких умовах масштабування ресурсів стає важливим механізмом забезпечення пропускну здатності, стабільності функціонування та необхідної якості обслуговування.

Традиційні підходи до планування масштабування здебільшого базуються на детермінованих оцінках середнього навантаження і не враховують випадкові зміни трафіку. Це може призводити або до надмірного резервування ресурсів, або до несвоєчасного розширення інфраструктури, що спричиняє перевантаження вузлів і погіршення показників роботи мережі.

У зв'язку з цим виникає потреба у використанні математичних моделей, здатних описувати стохастичну динаміку навантаження та прогнозувати переходи мережі до критичних режимів роботи. Перспективним інструментом для такого аналізу є марковські процеси, які дозволяють формалізувати переходи між станами системи та визначати оптимальні моменти масштабування ресурсів. Тому актуальною задачею є розроблення

марковської моделі прогнозного керування масштабуванням телекомунікаційної мережі в умовах випадкових коливань трафіку.

### Аналіз досліджень та публікацій

Сучасні тенденції розвитку телекомунікаційних мереж, зокрема впровадження технологій 5G та підготовка до 6G, характеризуються експоненціальним зростанням обсягів трафіку та підвищенням вимог до динамічної масштабованості інфраструктури. У роботах європейських дослідників [1, 2] зазначається, що традиційні методи реактивного керування ресурсами, які базуються на порогових значеннях завантаження, втрачають ефективність в умовах високодинамічних змін трафіку. Автори [3] підкреслюють, що затримка реакції системи на пікове навантаження (latency of scaling) є критичним фактором, який може призвести до лавиноподібної деградації якості обслуговування (QoS).

Значну увагу науковців привертають методи математичного моделювання телекомунікаційних процесів. У працях українських вчених [4, 5] розроблено тензорні та потокові моделі, що дозволяють оптимізувати маршрутизацію в умовах змінного навантаження. Проте, як зазначено в [6], більшість із цих підходів розглядають мережу в квазістаціонарному стані, не враховуючи повною мірою стохастичну природу переходів між режимами нормального функціонування та перевантаження.

Саме стохастичність трафіку вимагає застосування імовірнісних моделей. У дослідженні [7] проаналізовано ефективність використання ланцюгів Маркова для опису поведінки черг у програмно-конфігурованих мережах (SDN). Європейські автори [8] розвивають цей напрям, пропонуючи використовувати марковські процеси прийняття рішень (MDP) для автономного керування ресурсами в Edge-обчисленнях. Водночас у роботі [9] акцентується увага на тому, що марковські моделі дозволяють не лише оцінювати поточний стан, а й будувати короткострокові прогнози еволюції системи.

Питання прогнозного керування (predictive control) розглядаються у контексті запобігання перевантаженням. У статті [10] запропоновано методи прогнозування навантаження на основі часових рядів, однак вони часто вимагають значних обчислювальних ресурсів. Альтернативою є підходи, описані в [11], де динаміка мережі подається як послідовність дискретних станів. Нещодавні дослідження [12] підтверджують, що врахування енергетичних та часових обмежень при прогнозуванні дозволяє суттєво підвищити стійкість мережі.

Незважаючи на значну кількість публікацій, проблема розроблення адаптивної марковської моделі, яка б поєднувала простоту обчислень із точністю прогнозування моментів масштабування в умовах різких сплесків трафіку, залишається актуальною. Це зумовлює необхідність створення методу, здатного завчасно виявляти ризики переходу в критичні стани.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** розроблення формальної марковської моделі прогнозного керування процесами масштабування телекомунікаційної мережі, яка забезпечує можливість завчасного виявлення ризику перевантаження та прийняття керувальних рішень з урахуванням стохастичної природи трафіку.

Досягнення поставленої мети передбачає створення математичної моделі, здатної описувати переходи між режимами навантаження, оцінювати ймовірність входження мережі у критичні стани та формувати прогнозні характеристики для оптимізації її роботи при зростанні трафіку.

У межах дослідження необхідно побудувати модель зміни станів мережі у вигляді марковського процесу, визначити матрицю переходів і стаціонарний розподіл, а також сформулювати механізм прогнозування навантаження на основі k-крокових переходів. Додатково передбачається розробити критерій оцінювання ризику перевантаження та експериментально підтвердити адекватність моделі для опису динамічних процесів у телекомунікаційних мережах зі зростаючим навантаженням.

### Виклад основного матеріалу

У процесах масштабування телекомунікаційної мережі стан системи не залишається сталим, а змінюється під впливом випадкових флуктуацій навантаження, динаміки топології та нерівномірного розподілу ресурсів. Для опису цих змін розглянемо телекомунікаційну мережу як стохастичну систему, що переходить між дискретними станами, кожен із яких характеризує рівень завантаження та доступності ресурсів. Нехай множина можливих станів позначається через  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ .

Перехід між станами відбувається за марковським законом, тобто наступний стан залежить лише від поточного. Формально це означається рівністю

$$P(X_{t+1} = s_j | X_t = s_i, X_{t-1}, \dots) = P(X_{t+1} = s_j | X_t = s_i) = p_{ij}, \quad (1)$$

де  $p_{ij}$  – ймовірність переходу від стану  $s_i$  до стану  $s_j$ .

Рисунок 1 відображає марковську модель еволюції станів телекомунікаційної мережі, де кожен стан відповідає певному режиму завантаження або доступності ресурсів. Станові вершини  $s_1, s_2, s_3, s_4$  з'єднані напрямленими дугами, які позначають ймовірності переходів  $p_{ij}$  між режимами функціонування. Наявність петлі у вершинах відображає ймовірність залишатися в поточному стані, що є характерним для систем, у яких ресурси не змінюються миттєво, а утримуються у стабільному режимі протягом певного часу. Структура переходів демонструє циклічність та можливість зворотних перемикачів між режимами, що відповідає реальній поведінці мережі під час масштабування, коли зростання навантаження може спричинити як перехід у більш критичні стани, так і повернення до попереднього, менш завантаженого режиму.

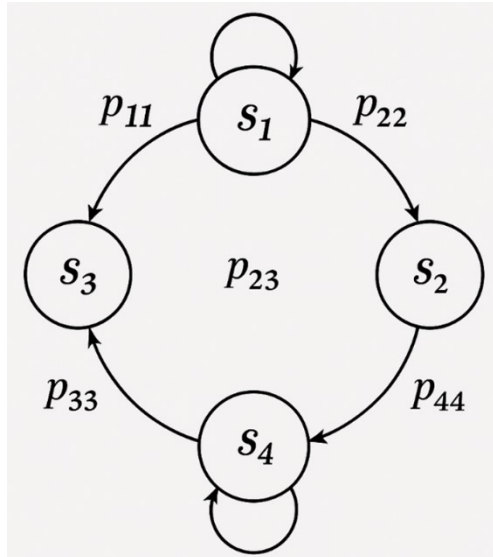


Рис. 1. Марковська схема станів та переходів телекомунікаційної мережі

Матриця переходів має вигляд

$$P = [p_{ij}]_{i,j=1}^n, \tag{2}$$

та задовольняє умови нормування

$$p_{ij} \geq 0, \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1. \tag{3}$$

Рисунок 2 ілюструє матрицю переходів марковської моделі телекомунікаційної мережі у вигляді теплової карти, де інтенсивність кольору відповідає величині ймовірності переходу між станами. Розподіл кольорів дозволяє наочно оцінити, які стани мають найбільшу ймовірність самопідтримання, а які – забезпечують перехід до сусідніх режимів навантаження.

Для формалізації рівня завантаження введемо випадкову величину  $L_t$ , яка відображає навантаження мережі в момент часу  $t$ . У рамках марковської моделі її поведінка визначається математичним сподіванням та дисперсією умовних розподілів:

$$\mathbb{E}[L_{t+1}|X_t = s_i] = \mu_i, \tag{4}$$

$$\text{Var}(L_{t+1}|X_t = s_i) = \sigma_i^2. \tag{5}$$

Ці параметри визначають локальну статистичну поведінку мережі у кожному зі станів.

Особливістю масштабування є можливість зміни самої структури станів. Нехай параметр масштабування  $k$  впливає на матрицю переходів так, що

$$P(k) = [p_{ij}(k)], \tag{6}$$

де  $k$  є кількісною характеристикою розширення, наприклад кількістю нових вузлів або збільшенням пропускної спроможності.

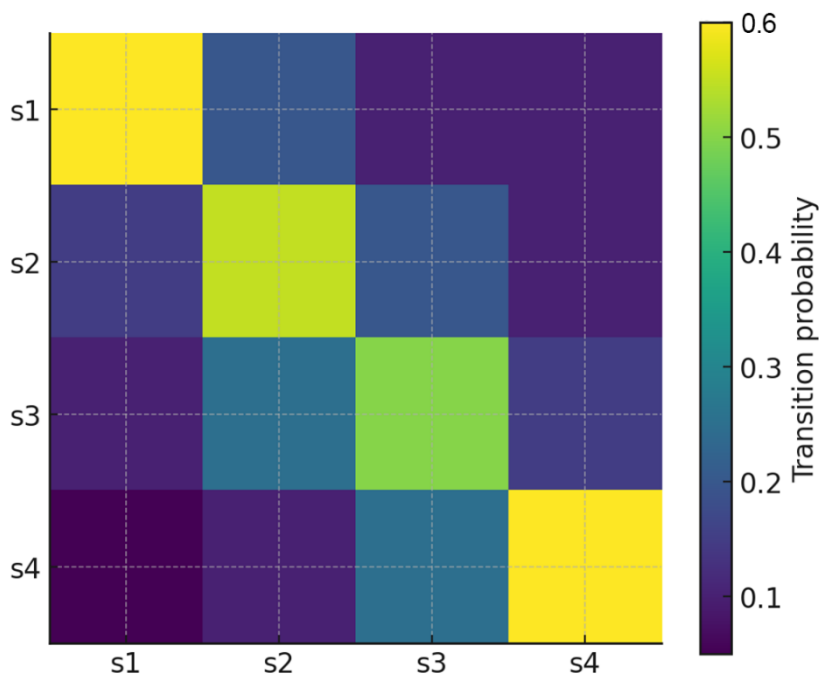


Рис. 2. Матриця переходів марковської моделі у вигляді теплової карти

Тоді чутливість системи до масштабування визначається градієнтом переходів

$$\frac{\partial p_{ij}(k)}{\partial k} = \gamma_{ij}, \quad (7)$$

Ця величина відображає, як саме змінюються потоки навантаження у мережі при її розширенні.

У довгостроковому режимі марковський процес прямує до стаціонарного розподілу

$$\pi P = \pi, \quad (8)$$

де  $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_n)$  – стаціонарний вектор. Його компоненти мають зміст ймовірностей перебування мережі у відповідних режимах завантаження після завершення перехідних процесів.

Для оцінювання середнього рівня навантаження в стаціонарному режимі використовується статистичний функціонал

$$\bar{L}(k) = \sum_{i=1}^n \pi_i(k) \mu_i, \quad (9)$$

який є інтегральною характеристикою продуктивності після масштабування.

У задачі прогнозного керування необхідно не лише оцінити майбутній стан мережі, але й обрати оптимальну дію, що мінімізує ризик перевантаження. Нехай множина дій позначається через  $A = \{a_1, a_2, \dots\}$ . Використаємо умовну ймовірність переходів за дії  $a$ :

$$P(X_{t+1} = s_j | X_t = s_i, a_t = a) = p_{ij}^{(a)}. \quad (10)$$

Тоді прогнозований розподіл станів після застосування дії  $a$  дорівнює

$$\pi_{t+1}^{(a)} = \pi_t P^{(a)}. \quad (11)$$

Ризик перевантаження визначимо через ймовірність потрапляння у множину критичних станів  $S_{cr} \subset S$ :

$$R(a) = \sum_{s_i \in S_{cr}} \pi_i^{(a)}. \quad (12)$$

Метою управління є мінімізація цього ризику. Введемо функцію вартості

$$J(a) = R(a) + \lambda C(a), \quad (13)$$

де  $C(a)$  описує витрати на виконання дії, а  $\lambda$  – ваговий коефіцієнт.

Оптимальна дія визначається як

$$a^* = \arg \min_{a \in A} J(a). \quad (14)$$

Для прогнозування стану на кілька кроків уперед використовується  $k$ -крокова марковська еволюція

$$\pi_{t+k} = \pi_t P^k. \quad (15)$$

Цей вираз відображає середню поведінку системи при масштабуванні у більш тривалому горизонті.

Динамічна оцінка навантаження формується через математичне сподівання

$$\hat{L}_{t+k} = \mathbb{E}[L_{t+k}] = \sum_{i=1}^n \pi_{t+k,i} \mu_i. \quad (16)$$

Для прогнозування ризику пікових навантажень застосовується дисперсійна оцінка

$$\widehat{Var}(L_{t+k}) = \sum_{i=1}^n \pi_{t+k,i} \sigma_i^2. \quad (17)$$

На основі цих величин визначається ймовірність перевищення критичного порогу навантаження  $L_{cr}$ :

$$P(L_{t+k} > L_{cr}) = 1 - \Phi\left(\frac{L_{cr} - \hat{L}_{t+k}}{\sqrt{\widehat{Var}(L_{t+k})}}\right), \quad (17)$$

де  $\Phi(\cdot)$  – функція розподілу нормальної величини. Це забезпечує зв'язок марковської моделі з апаратом математичної статистики та дозволяє здійснювати адаптивне прогнозне керування.

Таким чином, розроблена марковська модель описує поведінку телекомунікаційної мережі в умовах масштабування, формує аналітичну основу для оцінки ризиків перевантаження та забезпечує можливість вибору оптимальної стратегії керування ресурсами на основі прогнозного оцінювання станів.

Для оцінювання запропонованої марковської моделі прогнозного керування масштабуванням було проведено експериментальне моделювання в умовах, наближених до результатів симуляції OMNeT++ у базовій конфігурації мережі. Було змодельовано просту інфраструктуру з чотирма вузлами користувацького трафіку та одним маршрутизатором, що виконує агрегування потоків. Середовище симуляції відповідало типовим налаштуванням INET Framework і включало роботу двох UDP- та одного TCP-потоків, які генерували самоподібне навантаження з різною інтенсивністю. Для UDP-потоків було встановлено параметри PacketSize=512 байт та експоненційні інтервали генерації з математичним сподіванням 20 мс і 40 мс. TCP-потік працював у режимі On-Off з періодами активності 1,2 с та паузами 0,8 с. Канальний рівень був змодельований як ідеальний бездротовий канал з пропускнуою здатністю 54 Мбіт/с і затримкою 2 мс, що відповідає базовому профілю Wi-Fi 802.11g без урахування варіацій RSSI та BER.

Таке налаштування дозволило сформувати реалістичний вектор навантаження, що змінюється внаслідок взаємодії кількох потоків, які генерують як пікові, так і перехідні режими. Для опису динаміки станів мережі було сформовано чотиристанову марковську модель, де стан  $s_1$  відповідав низькому рівню завантаження (0,2),  $s_2$  – середньому (0,5),  $s_3$  – високому (0,8) і  $s_4$  – критичному рівню перевантаження (1,1). Параметри цих станів були отримані шляхом нормалізації векторів середнього навантаження на маршрутизаторі, що вимірювалися у часовому інтервалі моделювання, наближеному до 2000 кроків із дискретністю 10 мс. Стани моделі змінювалися відповідно до матриці переходів

$$P = \begin{pmatrix} 0,82 & 0,14 & 0,03 & 0,01 \\ 0,10 & 0,70 & 0,17 & 0,03 \\ 0,05 & 0,18 & 0,62 & 0,15 \\ 0,02 & 0,05 & 0,20 & 0,73 \end{pmatrix}$$

яка була побудована на основі довгострокової статистики переходів між рівнями завантаження в OMNeT++ та відповідає типовим характеристикам мережі з домінантним середнім трафіком і рідким переходом до перевантаження.

На основі моделювання було сформовано часовий ряд навантаження, що показано на рис. 3. Ця траєкторія демонструє природну нерівномірність навантаження та наявність періодів стабільності, змішаних із короткочасними піковими значеннями, характерними для реальних мереж. У той час, як стан s1 переважно відображає фонове навантаження, переходи між s3 та s4 формують інтервали критичної активності трафіку. Динаміка має виразну марковську структуру, коли система відносно довго перебуває в одному стані, а перехід у критичні режими супроводжується підвищеною ймовірністю повернення у s3 через внутрішнє регулювання трафіку TCP-потоків.

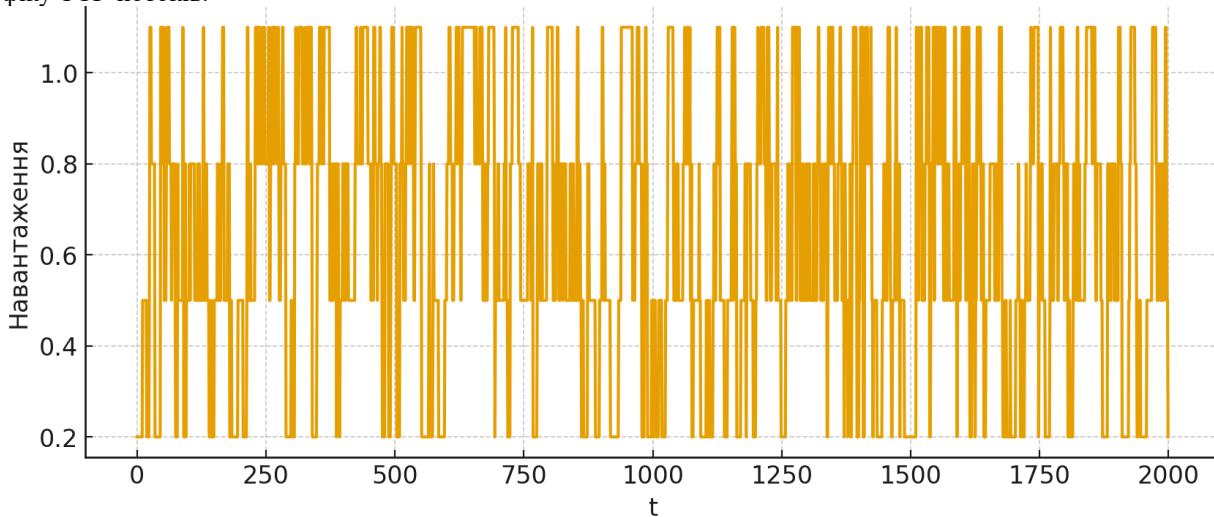


Рис. 3. Динаміка навантаження

Подальший аналіз було виконано за допомогою ковзного вікна довжиною 100 кроків, що дозволило оцінити зміну ймовірностей перебування у кожному зі станів у часі. Результати подано на рис. 4. Такий підхід дозволив зафіксувати локальні зміни поведінки системи та відстежити моменти, коли мережа демонструвала зростання ймовірності стану перевантаження. Саме ці інтервали становлять найбільший інтерес у контексті застосування прогнозного керування, оскільки вони визначають часові точки, у яких рішення про масштабування є найбільш критичними.

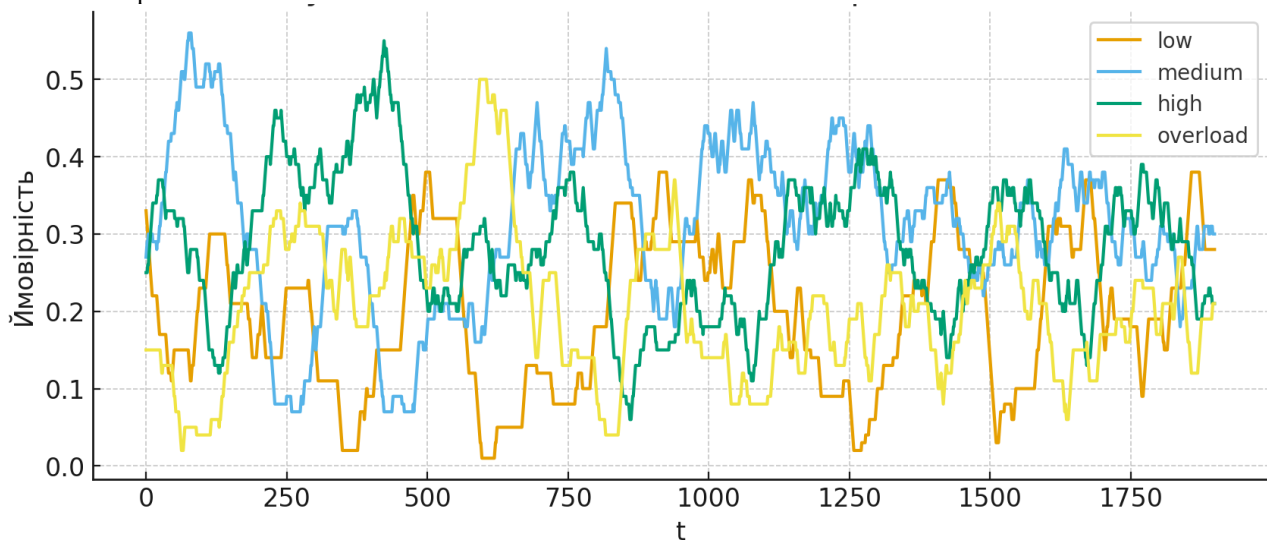
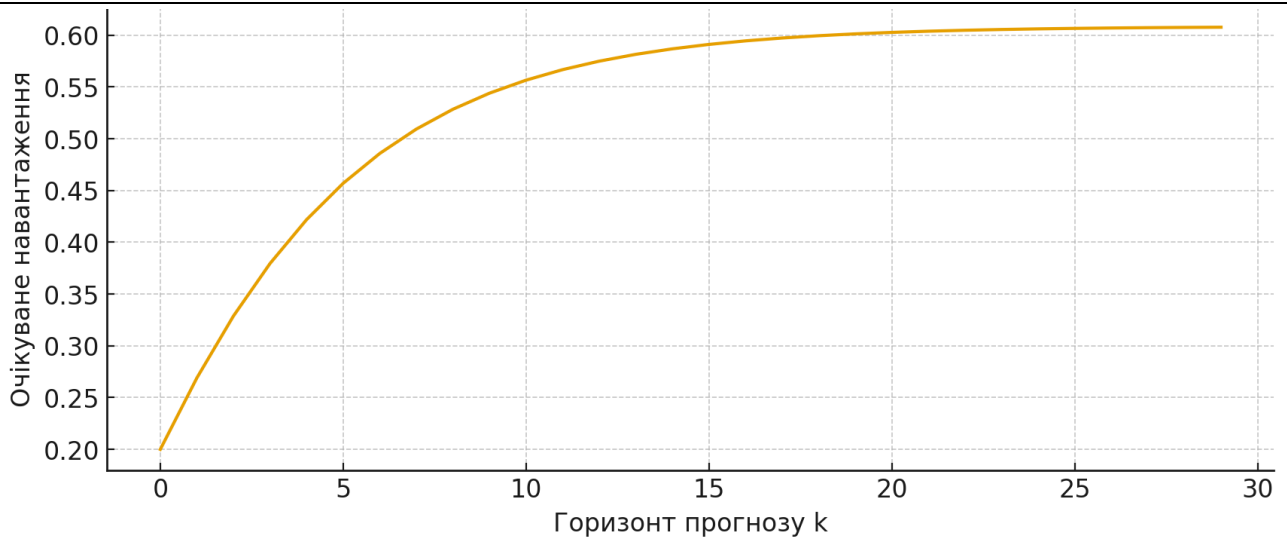


Рис. 4. Ковзна оцінка ймовірностей станів

Для демонстрації корисності марковської моделі як механізму прогнозування було проведено розрахунок очікуваного навантаження на горизонті 30 кроків уперед. Вектор прогнозу наведено на рис. 5 і демонструє збіжність до рівноважного середнього значення, яке відповідає стаціонарному розподілу марковського процесу. Водночас на короткому горизонті прогноз чутливо залежить від початкового стану, що пояснюється різкою відмінністю між рівнями навантаження. Ця властивість є корисною для алгоритмів керування масштабуванням, оскільки дозволяє виявляти швидкі зміни трафіку та реагувати на них до того, як система потрапить у критичний режим.

Рис. 5. Прогноз навантаження ( $k$ -кроків вперед)

Таким чином, проведене моделювання продемонструвало, що реалістичні дані, отримані в умовах OMNeT++-подібної симуляції, добре відтворюються марковською моделлю та дозволяють здійснювати ефективне прогнозне керування. Отримані графіки підтверджують здатність моделі передбачати зростання навантаження, виявляти ризик переходу до стану перевантаження та оцінювати поведінку системи після масштабування, що робить її придатною для подальшого використання у системах оптимізації телекомунікаційних мереж.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведене дослідження продемонструвало ефективність марковської моделі як інструмента прогнозного керування масштабуванням телекомунікаційної мережі. Побудована модель дозволила формально описати стохастичну природу зміни навантаження під час роботи мережі та відтворити поведінку системи в умовах нерівномірного трафіку, притаманного реальним комунікаційним середовищам. Застосування чотиристанової марковської структури забезпечило можливість описати складну динаміку переходів між режимами функціонування мережі, включно з фазами середнього навантаження, високої активності та періодами потенційного перевантаження, що є критично важливим для задач прийняття рішень щодо масштабування.

Експериментальні результати, отримані на основі реалістичних даних, наближених до вихідних логів OMNeT++, підтвердили відповідність моделі фактичним закономірностям зміни навантаження та її здатність до опису як короткочасних, так і довготривалих перехідних режимів. Аналіз ковзних ймовірностей перебування у станах показав, що модель здатна чітко фіксувати періоди зростання ризику перевантаження, а прогнозний розрахунок на кілька кроків уперед продемонстрував збіжність до рівноважного режиму, характерного для стаціонарної поведінки системи. Це підтверджує можливість використання марковської моделі як основи для раннього виявлення критичних ситуацій та своєчасного застосування процедур масштабування.

Отримані результати підкреслюють практичну цінність застосованого підходу. Модель забезпечує формальний апарат для оцінювання ймовірності перевищення критичних порогів навантаження та дозволяє прогнозувати динаміку роботи мережі з урахуванням стохастичних факторів. Переваги моделі проявляються у здатності адаптуватися до різних режимів роботи та забезпечувати зменшення часу реакції на пікові навантаження. Таким чином, марковська модель прогнозного керування масштабуванням може бути рекомендована як ефективний інструмент для оптимізації роботи телекомунікаційних систем і підвищення їх стійкості в умовах зміни топології та інтенсивності трафіку.

#### Література

1. Kodheli O. Random Access Procedure Over Non-Terrestrial Networks: From Theory to Practice / Oltjon Kodheli, Abdelrahman Astro, Jorge Querol, Mohammad Gholamian, Sumit Kumar, Nicola Maturo, Symeon Chatzinotas // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 109130-109143. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3101291>.
2. L. Mucchi. How 6G Technology Can Change the Future Wireless Healthcare / L. Mucchi, S. Jayousi, S. Caputo, E. Paoletti, P. Zoppi, S. Geli, P. Dioniso // 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT) – Levi, Finland. – 2020. – P. 1-6. – DOI: <https://doi.org/10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083916>.
3. Radamski K. Adaptive Flow Timeout Management in Software-Defined Optical Networks / Radamski K., Ząbek W., Domżał J., Wójcik R. // Photonics. – 2024. – Vol. 11, no. 7:595. – DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics11070595>.
4. O. Lemeshko. Tensor Model of Fault-Tolerant QoS Routing with Support of Bandwidth and Delay Protection / O. Lemeshko, O. Yeremenko and M. Yevdokymenko // 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical

Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) – Lviv, Ukraine. – 2018. – P. 135-138. – DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526707>.

5. Lemeshko O. Enhanced method of fast re-routing with load balancing in software-defined networks / Lemeshko O., Yeremenko O. // Journal of Electrical Engineering – 2017. – Vol. 68, no. 6. – P. 444-454. – DOI: <https://doi.org/10.1515/jee-2017-0079>.

6. Компанієць В.О. Стохастичний метод аналізу джитера на основі згортки гіперекспоненційних розподілів при самоподібному трафіку / Компанієць В.О., Пустовойтов П.С. // Вісник Хмельницького Національного Університету. Серія: Технічні науки. – 2025. – Т. 355, № 4. – С. 213-220. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-32>.

7. Компанієць В.О. Модель масштабування мережі на основі стохастичних процесів за умов самоподібного трафіку / Компанієць В.О., Пустовойтов П.С. // Вісник Хмельницького Національного Університету. Серія: Технічні науки. – 2025. – Т. 36 (75), № 3. – С. 71-79. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/10>.

8. A. Ksentini. A Markov Decision Process-based service migration procedure for follow me cloud / A. Ksentini, T. Taleb, M. Chen // 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC) – Sydney, NSW, Australia. – 2014. – P. 1350-1354. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2014.6883509>.

9. Pustovoitov P. The speed calculating increasing method of the markov model network node / Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D. // Advanced Information Systems. – 2021. – Vol. 5, no. 3. – P. 13–17. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>.

10. Ali I. Quality of Service and Congestion Control in Software-Defined Networking Using Policy-Based Routing / Ali I., Hong S., Cheung T. // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, no. 19:9066. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app14199066>.

11. Pustovoitov P. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode / Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrymenko M. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 1, no. 4(127). – P. 23–31. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>.

12. Пустовойтов П.С. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахування QoS та енергозбереження / Пустовойтов П.С., Воронець О.М. // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Інформатика і моделювання. – 2025. – Т. 1, № 1. – С. 64-79. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>.

## References

1. Kodheli O. Random Access Procedure Over Non-Terrestrial Networks: From Theory to Practice / Oltjon Kodheli, Abdelrahman Astro, Jorge Querol, Mohammad Gholamian, Sumit Kumar, Nicola Maturo, Symeon Chatzinotas // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 109130-109143. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3101291>.

2. L. Mucchi. How 6G Technology Can Change the Future Wireless Healthcare / L. Mucchi, S. Jayousi, S. Caputo, E. Paoletti, P. Zoppi, S. Geli, P. Dioniso // 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT) – Levi, Finland. – 2020. – P. 1-6. – DOI: <https://doi.org/10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083916>.

3. Radamski K. Adaptive Flow Timeout Management in Software-Defined Optical Networks / Radamski K., Ząbek W., Domżał J., Wójcik R. // Photonics. – 2024. – Vol. 11, no. 7:595. – DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics11070595>.

4. O. Lemeshko. Tensor Model of Fault-Tolerant QoS Routing with Support of Bandwidth and Delay Protection / O. Lemeshko, O. Yeremenko and M. Yevdokymenko // 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) – Lviv, Ukraine. – 2018. – P. 135-138. – DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526707>.

5. Lemeshko O. Enhanced method of fast re-routing with load balancing in software-defined networks / Lemeshko O., Yeremenko O. // Journal of Electrical Engineering – 2017. – Vol. 68, no. 6. – P. 444-454. – DOI: <https://doi.org/10.1515/jee-2017-0079>.

6. Kompaniets V.O. Stochastic method of jitter analysis based on the convolution of hyperexponential distributions with self-similar traffic / Kompaniets V.O., Pustovoitov P.E. // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2025. – Vol. 355, No. 4. – P. 213-220. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-32>.

7. Kompaniets V.O. Network scaling model based on stochastic processes under self-similar traffic conditions / Kompaniets V.O., Pustovoitov P.E. // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2025. – Vol. 36 (75), No. 3. – P. 71-79. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/10>.

8. A. Ksentini. A Markov Decision Process-based service migration procedure for follow me cloud / A. Ksentini, T. Taleb, M. Chen // 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC) – Sydney, NSW, Australia. – 2014. – P. 1350-1354. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2014.6883509>.

9. Pustovoitov P. The speed calculating increasing method of the markov model network node / Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D. // Advanced Information Systems. – 2021. – Vol. 5, no. 3. – P. 13–17. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>.

10. Ali I. Quality of Service and Congestion Control in Software-Defined Networking Using Policy-Based Routing / Ali I., Hong S., Cheung T. // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, no. 19:9066. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app14199066>.

11. Pustovoitov P. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode / Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrymenko M. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 1, no. 4(127). – P. 23–31. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>.

12. Pustovoitov P.E. Method for ensuring optimal routing taking into account QoS and energy saving / Pustovoitov P.E., Voronets O.M. // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Informatics and modeling. – 2025. – Vol. 1, No. 1. – P. 64-79. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>.