

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-63>

УДК 004.738.5

### ВОРОНЕЦЬ ОЛЕКСАНДР

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0009-0005-5714-2370>

e-mail: [Oleksandr.Voronets@infiz.khpi.edu.ua](mailto:Oleksandr.Voronets@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)

### ВОРОНЕЦЬ ВІТАЛІЙ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-7793-3824>

e-mail: [Vitalii.Voronets@khpi.edu.ua](mailto:Vitalii.Voronets@khpi.edu.ua)

## СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ БЕЗДРОВОЇ МЕРЕЖІ, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА MARKOV DECISION PROCESS ТА ВРАХОВУЄ QOS І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

У статті запропоновано стохастичну модель бездротової сенсорної мережі на основі Марковського процесу прийняття рішень (Markov Decision Process, MDP), що враховує показники якості обслуговування (QoS) та енергоспоживання вузлів. Мережеві стани формалізовано з урахуванням рівня енергії, завантаження черг і затримок передачі, а маршрутизацію подано як задачу вибору оптимальної політики з максимізацією очікуваної винагороди. Для знаходження оптимальних рішень застосовано алгоритм value iteration. Запропонований підхід забезпечує адаптивну та енергоефективну маршрутизацію в умовах стохастичних змін параметрів мережі.

**Ключові слова:** бездротова сенсорна мережа, якість обслуговування, енергоефективність, стохастична модель, Марковський процес прийняття рішень.

VORONETS OLEKSANDR, PUSTOVOITOV PAVLO, VORONETS VITALII

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

## STOCHASTIC WIRELESS NETWORK MODEL BASED ON MARKOV DECISION PROCESS AND TAKING INTO ACCOUNT QOS AND ENERGY CONSERVATION

The article develops a stochastic model of a wireless sensor network based on the Markov Decision Process (MDP) and focused on simultaneously ensuring quality of service (QoS) and energy efficiency. The relevance of the study is due to the specifics of the functioning of sensor networks, the nodes of which operate under conditions of limited energy resources, dynamic topology and stochastic changes in network parameters, in particular transmission delays, queue load levels and residual energy. Under such conditions, traditional deterministic routing methods do not provide the necessary adaptability and stability.

The proposed approach involves formalizing the routing process in the form of an MDP model, where each network state is described by a vector of parameters characterizing the energy state of the node, traffic intensity and time characteristics of the transmission. The action space is defined by the set of possible transitions to neighboring nodes, and the system dynamics is modeled through the probabilities of transitions between states. To assess the effectiveness of route selection, a reward function is formed that reflects the trade-off between minimizing delays, reducing node congestion, and conserving network energy resources.

The optimal routing policy is determined by maximizing the expected total discounted reward over a long time horizon. The value iteration algorithm is used to calculate it, which allows iteratively finding the value function of states and the corresponding optimal actions. An example of a practical implementation of the model for a simplified network topology is given, which demonstrates the possibility of formal analysis of the data transmission process and choosing an energy-efficient route taking into account QoS requirements. The results obtained confirm that the use of MDP provides adaptive routing that is resistant to changes in network parameters, and creates a basis for the development of intelligent control protocols for new generation wireless sensor networks.

**Keywords:** wireless sensor network, quality of service, energy efficiency, stochastic model, Markov decision process.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 06.03.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



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/)

© Воронець Олександр, Пустовойтов Павло, Воронець Віталій

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

У сучасних телекомунікаційних системах, особливо в бездротових сенсорних мережах, ключовим завданням є забезпечення якості обслуговування (QoS) поряд з енергоефективністю. Сенсорні вузли зазвичай мають обмежені обчислювальні ресурси та обмежене джерело живлення, що вимагає ретельного управління процесами передачі даних. У таких умовах маршрутизація повинна забезпечувати не лише надійність та швидкість доставки інформації, але й мінімізацію енергоспоживання для подовження терміну служби мережі.

Однією з основних проблем у цій сфері є динамічність середовища та стохастичний характер змін у параметрах мережі: черги на вузлах, рівень залишкової енергії, затримки та інші характеристики постійно змінюються. У зв'язку з цим виникає потреба у побудові моделей, здатних адаптивно реагувати на зміни стану системи.

У даній роботі розглядається підхід до оптимізації маршрутизації, який базується на моделюванні сенсорної мережі у вигляді Марковського процесу прийняття рішень (MDP). Така модель дозволяє

формалізувати процес зміни станів вузлів і прийняття рішень у вигляді математичного апарату, здатного враховувати імовірності переходів між станами, винагороди за ті чи інші дії, а також забезпечувати пошук оптимальної стратегії передачі інформації з урахуванням QoS та енергозбереження.

Забезпечення якості обслуговування (QoS) та енергозбереження є критично важливими та актуальними завданнями в сенсорних мережах, де вузли працюють в умовах обмежених ресурсів та змінного середовища. Сучасні методи маршрутизації повинні не лише забезпечувати надійність і швидкість передачі даних, а й адаптуватися до поточного стану мережі. У цьому контексті використання Марковських процесів прийняття рішень (MDP) є актуальним і перспективним підходом для розробки адаптивних моделей маршрутизації, що враховують стохастичну природу мережевого трафіку та обмеження енергії.

#### Аналіз досліджень та публікацій

У сучасних дослідженнях, присвячених оптимізації маршрутизації в сенсорних мережах, значна увага приділяється використанню Марковських процесів для моделювання та прийняття рішень. Ці підходи дозволяють враховувати стохастичний характер бездротових середовищ і забезпечувати баланс між якістю обслуговування (QoS) та енергоспоживанням.

Модель маршрутизації на основі Марковських рішень, що адаптується до змін у мережі з урахуванням динаміки топології та умов передачі даних, запропонована в дослідженні [1]. Перевагою цього підходу є його гнучкість та адаптивність, проте складність обчислень може обмежувати його застосування в реальних умовах.

Використання частково спостережуваних Марковських процесів прийняття рішень (POMDP) для планування маршрутів безпілотних літальних апаратів з урахуванням погодних умов і характеристик місцевості розглянуто в роботі [2]. Запропонований підхід дозволяє ефективно прогнозувати оптимальні маршрути, однак потребує значних обчислювальних ресурсів для обробки великих обсягів даних.

Теоретико-графові методи моделювання розподілених бездротових сенсорних мереж проаналізовано в дослідженні [3]. Застосування такого підходу дає змогу оцінювати надійність мережі та оптимізувати маршрутизацію, проте його ефективність може знижуватися у випадках складних топологій та великої кількості вузлів.

Використання Марковських процесів для моделювання надійності комп'ютерних мереж представлено в роботі [4]. Запропонований підхід дозволяє оцінювати ймовірність відмов та прогнозувати поведінку мережі, однак вимагає точних вхідних даних і може бути чутливим до змін параметрів.

Аналіз ефективності VoIP-кодеків у глобальних мережах виконано в дослідженні [5], де підкреслюється важливість вибору відповідних кодеків для забезпечення QoS. Водночас у роботі недостатньо детально розглядаються аспекти енергоспоживання.

Методика управління рівнем IT-послуг корпоративної інфраструктури на основі координатора розглядається в роботі [6]. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності управління ресурсами, проте може потребувати суттєвих змін у вже існуючих системах.

Система виявлення аномальної поведінки абонентів телефонної мережі запропонована в дослідженні [7]. Застосування цього методу дозволяє підвищити безпеку та якість обслуговування, однак за недостатньо точних налаштувань можливе виникнення хибних спрацювань.

Організацію багатошляхової міждоменої маршрутизації з оптимальним числом граничних маршрутизаторів представлено в роботі [8]. Запропонований підхід забезпечує баланс між навантаженням і надійністю мережі, проте характеризується підвищеною складністю реалізації.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** розробка математичної моделі маршрутизації в сенсорних мережах на основі Марковського процесу прийняття рішень (MDP), яка враховує QoS та енергоспоживання.

Для досягнення поставленої мети було сформуовано наступні задачі:

- побудувати формальну MDP-модель із визначенням станів, дій, функції переходу та винагороди;
- реалізувати приклад алгоритму value iteration для обчислення оптимальної політики маршрутизації;
- виконати аналіз переваг моделі та її поведінки при блуканні по простору станів.

#### Виклад основного матеріалу

У сенсорних мережах ефективне управління маршрутизацією є ключовим завданням, особливо за умов обмежених енергетичних ресурсів та необхідності забезпечення якості обслуговування (QoS). Оскільки середовище функціонування таких мереж динамічне, а стан вузлів може змінюватися у випадковий спосіб (зокрема щодо затримок, навантаження чи рівня енергії), доцільним є використання стохастичних підходів. Одним з ефективних інструментів є Марковський процес прийняття рішень (MDP), який дозволяє моделювати процес вибору оптимального маршруту з урахуванням невизначеності та зміни станів у часі.

Основа моделі MDP складає формалізація мережевих вузлів як множини станів. Кожен стан описується у вигляді кортежу, що включає залишкову енергію вузла, розмір його черги (що відображає поточне навантаження), а також затримку передачі. Таким чином, типове представлення стану має вигляд  $s=(E_i, Q_i, D_i)$ , де всі змінні можуть бути нормалізованими на відрізок  $[0,1]$  для зручності обробки. Це дозволяє порівнювати різні вузли та робити вибір на основі поточного стану мережі.

Простір дій у контексті маршрутизації представляє собою множину можливих переходів до сусідніх вузлів. Для кожного вузла визначаються допустимі дії  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , де кожна дія відповідає передачі пакета

до певного сусіднього вузла. Кожна така дія змінює поточний стан системи, що враховується у моделі через функцію ймовірностей переходів  $P(s'|s,a)$ , яка описує, з якою ймовірністю система перейде зі стану  $s$  у стан  $s'$  після виконання дії  $a$ . У випадку сенсорних мереж ці ймовірності можуть залежати від зміни черги, споживаної енергії або коливань затримки.

Для кожної пари «стан–дія» визначається функція винагороди  $R(s,a)$ , яка відображає доцільність вибору тієї чи іншої дії з погляду QoS та енергоспоживання. Наприклад, високий рівень залишкової енергії та низька затримка можуть бути критеріями для позитивної винагороди, тоді як перевантаження або швидке виснаження енергії – навпаки. В загальному вигляді функція винагороди може бути задана формулою:

$$R(s, a) = \alpha \cdot (1 - D_\alpha) + \beta \cdot (1 - Q_\alpha) + \gamma \cdot E_\alpha, \quad (1)$$

де  $D_\alpha, Q_\alpha, E_\alpha$  – затримка, завантаження черги та рівень енергії у вузлі, до якого здійснюється передача;  $\alpha, \beta, \gamma$  – вагові коефіцієнти, що задають важливість кожного з параметрів у загальній оцінці.

Основна мета моделі – знайти таку політику маршрутизації  $\pi^*$ , яка максимізує сумарну очікувану винагороду на тривалому часовому горизонті. Це формалізується через вираз:

$$\pi^* = \underset{\pi}{\operatorname{arg\,max}} E[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t)], \quad (2)$$

де  $\gamma \in [0,1]$  – коефіцієнт дисконтування, який визначає важливість майбутніх винагород порівняно з поточними.

Для вирішення задачі можна використати метод динамічного програмування Value Iteration, який обчислює оптимальну політику шляхом поступового оновлення значення функції цінності для кожного стану. На кожній ітерації для кожного стану  $s$  обчислюється максимальна очікувана винагорода за всі можливі дії:

$$V(s) = \max_a [R(s, a) + \gamma \sum_{s'} P(s'|s, a) \cdot V(s')], \quad (3)$$

де функція  $V(s)$  представляє собою очікуване значення (цінність) перебування у стані  $s$  при оптимальному виборі дій. Змінна  $a$  – це можлива дія, яку можна виконати в цьому стані.  $R(s,a)$  – безпосередня винагорода, яку отримає система після виконання дії  $a$  в стані  $s$ .  $P(s'|s, a)$  – ймовірність переходу зі стану  $s$  у стан  $s'$  при виконанні дії  $a$ .  $V(s')$  – цінність майбутнього стану  $s'$ , яка вже обчислена або оцінена на попередній ітерації.  $\gamma \in [0,1]$  – коефіцієнт дисконтування, що визначає, наскільки важливими є майбутні винагороди порівняно з поточними. Уся формула означає, що ми вибираємо таку дію, яка дає найбільшу сумарну винагороду з урахуванням негайного ефекту та очікуваної майбутньої вигоди. Ітерації тривають, поки значення функції не перестануть істотно змінюватися. Потім оптимальна дія в кожному стані визначається як та, яка максимізує праву частину виразу.

Загалом, побудова маршрутизації на основі MDP забезпечує гнучкий механізм управління мережею, який враховує змінність середовища, невизначеність та взаємозв'язок між затримками, енергоспоживанням і навантаженням. Такий підхід є перспективним для сенсорних мереж нового покоління, де потрібні адаптивні, інтелектуальні та стійкі до змін алгоритми передачі інформації.

Практичне впровадження. Для роботи Марковського процесу прийняття рішень (MDP) у задачі маршрутизації в сенсорній мережі розглянемо спрощену модель із трьома вузлами: початковий вузол  $S$ , проміжний вузол  $A$  і кінцевий вузол  $T$ . Завдання полягає в тому, щоб визначити оптимальний маршрут доставки пакета з вузла  $S$  до вузла  $T$ , враховуючи такі параметри як затримка передачі та рівень залишкової енергії на вузлах.

У цій моделі кожен стан системи відповідає поточному розташуванню пакета:  $s \in \{S, A, T\}$ . Вузол  $T$  вважається термінальним – після досягнення цього стану процес припиняється. На кожному кроці приймається рішення щодо того, до якого сусіднього вузла передавати пакет. У даному прикладі з вузла  $S$  є лише один можливий перехід – до вузла  $A$ , а з вузла  $A$  – до  $T$ , кожен із ймовірністю 1. Це спрощує функцію переходів і дозволяє сконцентрувати увагу на розрахунку винагород та обчисленні функції цінності.

Функція винагороди  $R(s, a)$  розраховується на основі двох параметрів: затримки  $D$  та рівня енергії  $E$  у вузлі, до якого передається пакет. Формула має вигляд:

$$R(s, a) = \alpha \cdot (1 - D) + \beta \cdot E, \quad (4)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  – вагові коефіцієнти, які визначають важливість кожного параметра (у звітному прикладі:  $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$ ). Наприклад, для переходу  $S \rightarrow A$  при затримці 0.3 та енергії 0.7 отримаємо:

$$R = 0.6 \cdot (1 - 0.3) + 0.4 \cdot 0.7 = 0.42 + 0.28 = 0.70.$$

Аналогічно, для переходу  $A \rightarrow T$ :

$$R = 0.6 \cdot (1 - 0.4) + 0.4 \cdot 0.8 = 0.36 + 0.32 = 0.68.$$

Далі застосовуємо алгоритм value iteration з коефіцієнтом дисконтування  $\gamma = 0.9$ . Початково всі значення функції цінності  $V(s)$  задаються нулем. На першій ітерації обчислюємо  $V(A)$  як суму винагороди за перехід до  $T$  та дисконтованої цінності цього майбутнього стану (який дорівнює нулю, оскільки  $T$  – термінальний стан):

$$V(A) = R(A \rightarrow T) + \gamma \cdot V(T) = 0.68 + 0.9 \cdot 0 = 0.68.$$

Далі обчислюємо цінність стану  $S$ :

$$V(S) = R(S \rightarrow A) + \gamma \cdot V(A) = 0.70 + 0.9 \cdot 0.68 = 1.312$$

На наступних ітераціях значення не змінюються, тобто процес збігся. Таким чином, оптимальна політика в цій задачі полягає у виборі маршруту  $S \rightarrow A \rightarrow T$ , оскільки він забезпечує найвищу очікувану сумарну винагороду з урахуванням якості сервісу та рівня енергії вузлів. Цей приклад демонструє, як MDP дозволяє формально та ефективно моделювати процес маршрутизації в умовах змінних і частково невизначених параметрів сенсорної мережі.

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

У роботі було запропоновано модель маршрутизації в сенсорних мережах на основі марковського процесу прийняття рішень (MDP), що дозволяє комплексно враховувати параметри якості обслуговування (QoS) та енергоспоживання. Такий підхід забезпечує формальну основу для вибору маршрутів у динамічному та стохастичному середовищі, де параметри мережі змінюються з часом, а рішення повинні прийматися в умовах невизначеності.

Побудовано граф станів, де кожен стан представлено у вигляді вектора з трьох компонент: рівень енергії, завантаження черги та затримка передачі. Система переходить між станами з певною інтенсивністю, яка моделює ймовірність або швидкість зміни поточного режиму функціонування. Це дозволяє візуалізувати процес «блукання» системи по простору допустимих конфігурацій та формалізувати оцінку доцільності маршрутів.

Застосування алгоритмів value iteration або policy iteration дає змогу обчислювати оптимальну політику передачі даних, яка мінімізує затримки й водночас зберігає енергоресурси вузлів. Таким чином, розроблений підхід може бути використаний у реальних сенсорних мережах, де важливо дотримуватись балансу між якістю сервісу та тривалістю роботи системи.

Марковська модель маршрутизації є надзвичайно гнучкою і здатною до адаптації під широкий спектр сценаріїв у сенсорних мережах. Її ключова перевага полягає в тому, що вона враховує динаміку станів і дозволяє приймати рішення не на основі жорстко заданих правил, а з урахуванням ймовірнісної поведінки системи. Це особливо важливо в умовах непередбачуваних змін навантаження, втрат пакетів або коливань енергетичного балансу.

Водночас варто зауважити, що практична реалізація такої моделі вимагає точного налаштування функцій переходу та винагород, а також обмеження розмірності простору станів, оскільки кількість можливих комбінацій параметрів може швидко зростати. Для подальшого удосконалення моделі доцільно розглянути агрегацію станів, використання апроксимаційних методів або адаптацію MDP до частково спостережуваних процесів (POMDP).

Отже, побудована модель не лише дозволяє досліджувати поведінку системи на абстрактному рівні, а й формує підґрунтя для створення адаптивних протоколів маршрутизації з підтримкою QoS та енергоефективності, що є особливо актуальним для масштабованих та критично важливих сенсорних мереж.

### Література

1. Kashif Bilal. Potentials, trends, and prospects in edge technologies: Fog, cloudlet, mobile edge, and micro data centers / Kashif Bilal, Osman Khalid, Aiman Erbad, Samee U. Khan // *Computer Networks*. – 2018. – Vol. 130. – P. 94–120. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.10.002>.
2. Min Yao. Unmanned aerial vehicle dynamic path planning in an uncertain environment / Min Yao, Min Zhao // *Robotica*. – 2015. – Vol. 33, no. 3. – P. 611–621. – DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574714000514>.
3. Hedar Abdel-Rahman. Wireless Sensor Networks Fault-Tolerance Based on Graph Domination with Parallel Scatter Search / Hedar Abdel-Rahman, Shada N. Abdulaziz, Emad Mabrouk, Gamal A. El-Sayed // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, no. 12. – Art. 3509. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123509>.
4. Yang Carl. Dynamic Network Anomaly Modeling of Cell-Phone Call Detail Records for Infectious Disease Surveillance / Yang Carl, Song Hongwen, Tang Mingyue, Danon Leon, Vigfusson Ymir // *KDD 2022 – Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. – Washington, United States, 14–18 Aug. 2022. – P. 4733–4742. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3534678.3542678>.
5. Abbakar M. H. Quality Evaluation of VoIP Codecs in Cellular Mobile Networks / M. H. Abbakar, S. Y. Alhusain, S. S. SeadAhmed, A. M. Bushra, M. M. Elfaki, N. I. Osman // *ECTI Transaction on Application Research and Development*. – 2022. – Vol. 2, no. 1. – Art. 245837. – DOI: <https://doi.org/10.37936/ectiard.2022-2-1.245837>.
6. Serrano J. An IT Service Management Literature Review: Challenges, Benefits, Opportunities and Implementation Practices / J. Serrano, J. Faustino, D. Adriano, R. Pereira, M. M. da Silva // *Information*. – 2021. – Vol. 12, no. 3, Art. 111. – P. 1–29. – DOI: <https://doi.org/10.3390/info12030111>.
7. Aziz Z. Insight into Anomaly Detection and Prediction and Mobile Network Security Enhancement Leveraging K-Means Clustering on Call Detail Records / Z. Aziz, R. Bestak // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, no. 6. – Art. 1716. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s24061716>.
8. Wójcik R. A survey on methods to provide interdomain multipath transmissions / Wójcik R., Domżał J., Duliński Z., Rzym G., Kamisiński A., Gawłowicz P., Jurkiewicz P., Rząsa J., Stankiewicz R., Wajda K // *Computer Networks*. – 2016. – Vol. 108. – P. 233–259. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.08.028>.

### References

1. Kashif Bilal. Potentials, trends, and prospects in edge technologies: Fog, cloudlet, mobile edge, and micro data centers / Kashif Bilal, Osman Khalid, Aiman Erbad, Samee U. Khan // *Computer Networks*. – 2018. – Vol. 130. – P. 94–120. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.10.002>.
2. Min Yao. Unmanned aerial vehicle dynamic path planning in an uncertain environment / Min Yao, Min Zhao // *Robotica*. – 2015. – Vol. 33, no. 3. – P. 611–621. – DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574714000514>.

3. Hedar Abdel-Rahman. Wireless Sensor Networks Fault-Tolerance Based on Graph Domination with Parallel Scatter Search / Hedar Abdel-Rahman, Shada N. Abdulaziz, Emad Mabrouk, Gamal A. El-Sayed // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, no. 12. – Art. 3509. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123509>.
4. Yang Carl. Dynamic Network Anomaly Modeling of Cell-Phone Call Detail Records for Infectious Disease Surveillance / Yang Carl, Song Hongwen, Tang Mingyue, Danon Leon, Vigfusson Ymir // *KDD 2022 – Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. – Washington, United States, 14–18 Aug. 2022. – P. 4733–4742. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3534678.3542678>.
5. Abbakar M. H. Quality Evaluation of VoIP Codecs in Cellular Mobile Networks / M. H. Abbakar, S. Y. Alhusain, S. S. SeadAhmed, A. M. Bushra, M. M. Elfaki, N. I. Osman // *ECTI Transaction on Application Research and Development*. – 2022. – Vol. 2, no. 1. – Art. 245837. – DOI: <https://doi.org/10.37936/ectiard.2022-2-1.245837>.
6. Serrano J. An IT Service Management Literature Review: Challenges, Benefits, Opportunities and Implementation Practices / J. Serrano, J. Faustino, D. Adriano, R. Pereira, M. M. da Silva // *Information*. – 2021. – Vol. 12, no. 3, Art. 111. – P. 1–29. – DOI: <https://doi.org/10.3390/info12030111>.
7. Aziz Z. Insight into Anomaly Detection and Prediction and Mobile Network Security Enhancement Leveraging K-Means Clustering on Call Detail Records / Z. Aziz, R. Bestak // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, no. 6. – Art. 1716. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s24061716>.
8. Wójcik R. A survey on methods to provide interdomain multipath transmissions / Wójcik R., Domżał J., Duliński Z., Rzym G., Kamisiński A., Gawłowicz P., Jurkiewicz P., Rząsa J., Stankiewicz R., Wajda K // *Computer Networks*. – 2016. – Vol. 108. – P. 233–259. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.08.028>.