

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ INFORMATION RESOURCES AND SYSTEMS

УДК 681.5(042.3)

Viktor V. Semko¹, D.S., Associate Professor, Professor of the Department of Computerized Control Systems
ORCID ID: 0000-0001-5157-4264 *e-mail*: semko_viktor@meta.ua

Oleksiy V. Semko², PhD, Researcher of Information Security Department
ORCID ID: 0000-0001-6473-1329 *e-mail*: semalek@meta.ua

¹ National Aviation University, Kyiv, Ukraine

² Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

RESEARCH OF FUNCTIONING PROCESSES OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

Abstract. *The article is devoted to the research of problems of optimal control of data flow routing in heterogeneous sensor networks of variable topology under conditions of constraints and uncertainties. To solve the problem of synthesis of optimal data transmission routes in sensor networks, it is necessary to synthesize a graph model, formally define the optimization problem, investigate the processes of functioning of network elements and obtain formalized descriptions of the dependence of network elements. The mathematical model of functioning of the distributed system of intelligent data flow control in sensor networks of variable topology is considered based on the formal model of the functioning of the distributed system of intelligent network management, the properties of the processes of optimal load management of nodes and the data network as a whole are investigated. The results of the research allowed to obtain formal descriptions of the dependence of the load of the computing system of the sensor network on the time of the data transmission process, waiting time, service time on the load of the computing system of the sensor network, to determine quantitative indicators of delay and loss of data packets depending on the functioning modes.*
Keywords: *sensor network; distributed system; load; network nodes; routing; data flows; optimal control; conflict; uncertainties*

© B.B. Семко, O.B. Семко, 2021

В.В. Семко¹, О.В. Семко²

¹ Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

² Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБЧИСЛЮВАННОГО СЕРЕДОВИЩА ЕЛЕМЕНТІВ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

***Анотація.** Стаття присвячена питанням дослідження проблем оптимального управління маршрутизацією потоків даних в гетерогенних сенсорних мережах варіативної топології в умовах обмежень та невизначеностей. Для вирішення задачі синтезу оптимальних маршрутів передачі даних в сенсорних мережах необхідно синтезувати граф-модель, формально визначити задачу оптимізації, дослідити процеси функціонування елементів мережі та отримати формалізовані описи залежності параметрів функціонування обчислювального середовища елементів мережі. Розглянуто математичну модель функціонування розподіленої системи інтелектуального управління потоками даних в сенсорних мережах варіативної топології. Виходячи з формальної моделі функціонування розподіленої системи інтелектуального управління мережею, досліджено властивості процесів оптимального управління навантаженням вузлів і мережі передачі даних в цілому. Результати проведених досліджень дозволили отримати формальні описи залежності завантаженості обчислювальної системи вузла сенсорної мережі від часу процесу передачі даних, часу очікування, часу обслуговування від завантаженості обчислювальної системи вузла, визначити кількісні показники затримки і втрати пакетів даних в залежності від режимів функціонування сенсорної мережі.*

***Ключові слова:** сенсорна мережа; розподілена система; навантаження; вузли мережі; маршрутизація; потоки даних; оптимальне управління; конфлікт; невизначеності*

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.121-138>

Вступ

В галузі інформаційно-телекомунікаційних технологій, зокрема в контексті розробки телекомунікаційних та багатофункціональних мережевих технологічних рішень, відбувається швидка зміна тенденції практичного використання сенсорних мереж (СМ) передачі даних (ПД) з різномірною топологічною структурою та імплементаваними апаратно-програмними складовими. Такі СМ забезпечують бездротову передачу даних та обробку інформації за умов довільного розташування вузлів мереж, впливу зовнішніх й внутрішніх завад і збурень, варіативності топології (ВТ).

Використання бездротових інженерно-технічних і топологічних рішень призводить до ускладнення структур конфігурації фізичних зв'язків і регламенту ПД між елементами СМ у зв'язку з їх гетерогенністю та технологічною складністю їх архітектури.

Параметри функціонування елементів бездротових СМ безпосередньо впливають на управління процесом маршрутизації при ПД і визначають показники гарантоздатності відповідних інформаційно-телекомунікаційних систем (ІТС).

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вимоги щодо гарантоздатності і функціональної надійності забезпечуються технологічними рішеннями щодо побудови ІТС на основі СМ з врахуванням невизначеності станів елементів ІТС за умов внутрішніх і зовнішніх впливів.

Поточні і прогностичні значення параметрів функціонування елементів бездротових СМ дозволяють визначити методи вирішення проблеми забезпечення гарантоздатності бездротових мережевих технологій та управління маршрутизацією ПД як задачу побудови технологічно якісної сучасної технології функціонування ІТС.

Станом на сьогодні найбільш ефективними та такими, які широко використовуються, рішеннями управління маршрутизації ПД в сенсорних мережах є протоколи DD (Directed Diffusion), RR (Rumor Routing), GBR (Gradient-based routing), GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing), MCF (Minimum Cost Forwarding), LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient Sensor Network), GAF (Geographic Adaptive Fidelity), TTDD (Two-Tier Data Dissemination), SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), IDSQ (Information-driven Sensor Querying), CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing), QARP (QoS aware routing protocol), EAR (Energy Aware Routing), EQSR (Efficient and QoS aware multi-path routing protocol), VGA (Virtual Grid Architecture routing), HPAR (Hierarchical Power-aware Routing), EADAT (Energy-aware data aggregation tree).

Вищезазначені протоколи є технологічними рішеннями, які забезпечують доставку даних на основі процедури взаємного обміну службовою інформацією, централізовану модель збирання даних з доставкою по запиті, технологію кластерного розбиття елементів мережі і використовують інформацію про просторове розташування вузлів СМ, дволанковий механізм ПД з використанням відомостей про місцезнаходження вузлів мережі, вирішують окремі питання ефективного використання енергоресурсу вузлами мережі.

Одним із сучасних методів управління маршрутизацією ПД в СМ є мурашиний алгоритм, який відноситься до поліноміальних алгоритмів та методів природних обчислень і регламентується алгоритмом ACO (ant colony optimization – алгоритм оптимізації мурашиної колонії).

Іншим методом є метод роевого інтелекту, що розглядається як метод оптимізації і описує поведінку розподіленої децентралізованої самоорганізованої СМ при оптимальному управлінні маршрутизацією ПД з використанням інтелектуального перетворювача (ІП), як однієї з базових технологічних складових системи управління (СУ) з використанням технологій штучного інтелекту (ШІ).

Слід зазначити, що для вирішення задачі управління маршрутизацією в сучасних СМ використовується протокол OSPF (Open Shortest Path First), який забезпечує процес ПД найкоротшим шляхом з використанням алгоритму Дейкстри [1], [2], що знаходить дерево найкоротших шляхів на основі топології мережі і не враховує значення параметрів, які визначають навантаження її елементів.

Існуючі на сьогоднішній день методи вирішення задачі оптимального управління маршрутизацією ПД в СМ, а саме алгоритми і методи як інтелектуального, так і управління маршрутизацією ПД в цілому, в тому числі реактивні, проактивні та гібридні протоколи в сервіс-орієнтованих СМ,

технологічно забезпечують визначення окремих технічних функцій, а саме – проблему управління маршрутизацією ПД від вузла-відправника до вузла-отримувача ПД за умов масштабованості, включаючи умову розширеності [3], [4], [5], [6], [7].

Вищезазначені методи не забезпечують вирішення проблеми варіативності топологічної структури СМ, не враховують особливості технологій функціонування бездротових мереж, навантаження на елементи мережі, оптимальність використання обчислювальних потужностей вузлів і мережі в цілому. Слід також зазначити, що існуючі методи і алгоритми управління маршрутизацією ПД не враховують фактори обмеження енергоємності джерел енергії вузлів мережі за умови забезпечення гарантованого управління маршрутизацією ПД в межах припустимих обмежень і невизначеностей значень параметрів, що визначають стан елементів мережі.

Мета та задачі дослідження

Синтез і вибір рішень щодо стратегій управління маршрутизацією і вибору маршруту ПД в мережі здійснюється у відповідності до значення функції ціни (ФЦ) для кожного елемента мережі [7]. В такому разі кожен елемент маршруту ПД можна розглядати як гегелівський об'єкт у відповідності до метрики мережевого інтерфейсу, а маршрут ПД можна уявити як ланцюжок об'єктів в гегелівському уявленні елементів маршруту [6].

Незалежно від обраної метрики мережевого інтерфейсу метою управління маршрутизацією в СМ є визначення оптимального шляху ПД на граф-моделі мережі, яка відображає її топологічну структуру [5].

При моделюванні архітектури і топологічної структури управління маршрутизацією в мережі визначальною умовою є мінімальне використання ресурсів елементів СМ [4]. Таким чином, процеси ПД в мережі забезпечуються в припущенні гарантованого знаходження маршруту від вузла-джерела до вузла-отримувача даних за умов резервування частки пропускної спроможності каналів ПД між вузлами мережі та оцінки навантаження на ресурси обчислювальних систем вузлів мережі.

В такому разі можна застосувати модель самоорганізованої СМ із заявками на послідовну в часі передачу ПД між вузлами мережі з використанням оригінального евристичного алгоритму інтегрального усікання варіантів [8] за умов забезпечення найбільшого сумарного об'єму мережевого трафіку і мінімізації ресурсів мережі, що забезпечують її пропускну спроможність.

Гарантоздатність сенсорної мережі потоків даних забезпечується алгоритмом маршрутизації та технологічно імплементованими засобами забезпечення конфіденційності і цілісності при обміні даними – засобами криптографічного захисту інформації (КЗІ). Саме засоби КЗІ забезпечують рівень гарантій безпеки інформації в мережі. Таким чином, враховуються моделі функціонування мережі, а також віртуалізація простору функціонування мережі.

Таким чином, для вирішення задачі синтезу оптимальних маршрутів ПД в СМ ВТ необхідно синтезувати граф-модель, формально визначити задачу оптимізації, дослідити процеси функціонування елементів мережі та отримати формалізовані описи залежності параметрів функціонування обчислювального середовища елементів мережі.

Дослідження впливу внутрішніх та зовнішніх чинників на параметри функціонування елементів бездротових сенсорних мереж передачі даних

Процес синтезу і вибору рішення щодо маршруту ПД в СМ складається з трьох етапів [9]: визначення маршрутів ПД від вузла-відправника до вузла-отримувача як мети; вибір найбільш прийняттого варіанта маршруту ПД, який веде до досягнення мети, відповідно значення функції ціни рішення з врахуванням параметрів функціонування мережі і її елементів; реалізація маршруту ПД в СМ як рішення (обраного варіанта дії).

В такому разі дослідження способу визначення оптимального маршруту ПД, як задачі конфлікту в технічній системі [11], [12], [7], має здійснюватись на функціональному і структурному рівнях.

На функціональному рівні розглядається динамічний процес рішення задачі управління маршрутизацією ПД і всі його характеристики безвідносно до структури управління як опису самого процесу в цілому без його поділу на окремі складові частини.

На структурному рівні функціональні рішення задачі синтезу оптимального маршруту ПД в СМ розглядаються з точки зору можливості реалізації синтезованої стратегії управління в умовах обмежень і невизначеностей значення параметрів стану елементів і варіативності топології мережі. Таким чином, на функціональному рівні досліджується функціональна модель управління маршрутизацією ПД в СМ ВТ методами ситуаційного управління з використанням автоматних граматик [13], [14], [15]. В такому разі задачу синтезу і вибору маршруту ПД, як задачу управління маршрутизацією, доцільно вирішувати на структурному рівні при динамічній зміні значень параметрів стану елементів мережі та процесів управління за умови наявності гарантованого управління.

Математична модель сенсорної мережі може бути представлена зв'язковим графом

$$G = (V, E),$$

де V – множина вузлів графа, що представляє мережа; E – множина ребер графа, що з'єднує вузли і відображає можливий маршрут слідування ПД.

Кожному ребру $e_{ij} \in E \forall \{i, j\} \in V$ графа G поставлено у відповідність невід'ємне число $c_{ij} \geq 0$, що визначає пропускну здатність ребра як функцію ціни при передачі ПД.

Введемо поняття функції f , яка характеризує процес ПД між вершинами s і t мережі і є невід'ємною для ребер графу G . Тобто $f_{ij} \geq 0$ за умови того, що процеси передачі не накопичуються в проміжних вузлах мережі G між вузлами s і t .

Таким чином, для маршруту ПД між вузлами s і t мережі G отримуємо значення показника оцінки якості обраного маршруту щодо процесів ПД

$$W_{st} = \sum_k f_{ki} = \sum_j f_{ij}, \forall i \in V, i \neq \{s, t\}.$$

Слід зазначити, що отримане значення показника W_{st} враховує тільки такі маршрути ПД між вузлами s і t мережі G , які включають ребра, ПД в яких не перевищують пропускної спроможності відповідного каналу та можливостей обчислювальних систем вузлів маршруту, а саме $f_{ij} \leq c_{ij}$ і $e_{ij} \in E$.

Залишкова пропускна здатність ребра e_{ij} визначається як різниця пропускної здатності ребра і ПД по ньому, тобто $c_{ij}^f = c_{ij} - f_{ij}$. В такому разі з графу мережі G отримуємо залишкову мережу $G' = (V, E^f)$, в якій залишаються ребра з додатною залишковою пропускною спроможністю.

Маршрут ПД в мережі для розподіленої системи управління маршрутизацією ініціюється подією виникнення заявки в мережі на процес ПД між парою вершин з множини $\{\{s_1, t_1\}, \dots, \{s_n, t_n\}\}$ полюсів. Слід зазначити, що час життя заявок при ПД мережею обмежений їх обслуговуванням за умови встановленого маршруту ПД між вузлами. Тим самим забезпечується вивільнення пропускної спроможності ребер мережі у разі задоволення заявки на передачу. Якщо маршрут ПД між вузлами був визначений, то після закінчення часу життя заявка скидається, звільняючи відповідну пропускну здатність ребер мережі. Множина ПД між кожною парою полюсів через вузол є продуктом $\{s_m, t_m\}$ і визначається як продукт v_m .

В якості обмеженого ресурсу сенсорної мережі, що визначає функцію ціни, обрано пропускну спроможність каналів зв'язку, які визначають ребра (дуги) моделі мережі G .

Залежно від способу визначення вартості дуг моделі мережі для визначення функції ціни застосовується субоптимальний мінімально-розрізний алгоритм, орієнтований на синтез і вибір маршруту ПД із застосуванням ребер граф-моделі сенсорної мережі, які мають найбільший резерв пропускної спроможності каналів і мінімальну кількість елементів синтезованого маршруту. Такий алгоритм забезпечує обслуговування найбільшої кількості заявок.

Гарантоздатність розподіленої сервіс-орієнтованої СМ забезпечується шляхом використання засобів криптографічного захисту інформації, віртуалізацією простору функціонування мережі та управлінням щільністю навантаження каналів ПД при інформаційній взаємодії вузлів мережі. Засоби криптографічного захисту інформації забезпечують вимоги доступності, цілісності і конфіденційності при обміні. Щільність навантаження каналів ПД між вузлами мережі враховується функцією ціни при синтезі і виборі рішень щодо управління маршрутизацією в мережі.

Рішення задачі взаємодії конфліктуючих вузлів мережі доцільно розглядати в постановці задачі дискретної динамічної оптимізації [16] для множини усіх значень цільової функції

$$j(x) = \min \{ j(x) : x \in X \},$$

де X – припустима область значень параметрів; j – цільова функція; кожен елемент $x \in X$ – припустиме рішення задачі дискретної оптимізації (J, X) за умови скінченності множини X .

Оптимальному рішенню $x^* \in X$ відповідає значення цільової функції $j(x^*) = \min \{j(x) : x \in X\}$.

Тоді дискретний процес для рівняння стану можна уявити у вигляді

$$y_t = W(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t), t = 1, 2, \dots, T,$$

де $x_{t-s}, x_{t-s+1}, \dots, x_t$ – управління при перетворенні стану y_{t-1} етапу $t-1$ в стан y_t етапу t . Стан y_t обирається, виходячи з множин станів Y_t , областей існування управління X_t і множин Z_t . Множини X_t скінченні, а цільова функція J для кожного t дозволяє визначити мінімум сумарної оцінки $j(\cdot, \cdot, \dots, \cdot)$ на множині $Y_{t-1} \times X_{t-s} \times \dots \times X_t$.

Для синтезу і вибору оптимального управління маршрутизацією ПД в СМ визначимо немарківську динамічну задачу динамічної дискретної оптимізації у вигляді

$$\sum_{t=1}^T j_t(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t) + j_0(y_T) \rightarrow \min,$$

де $y_t = W_t(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t)$, $x_t \in X_t$, $y_t \in Y_t$, $(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t) \in Z_t$, $t = 1, 2, \dots, T$, $x_t = x_t^0$, $t = 1-s, \dots, 0$, $y_0 = y^0$.

Визначимо скінченні множини $\overset{\circ}{Y}_t$, що вміщують стани, в яких може знаходитись процес вирішення задачі динамічної дискретної оптимізації, що визначена вищенаведеними співвідношеннями, і для яких є справедливим включення:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_t \in Y_t : y_t = W_t(y_{t-1}, x_t), x_t \in X_t, (y_{t-1}, x_t) \in Z_t, y_{t-1} \in \overset{\circ}{Y}_{t-1}, \\ t = 1, 2, \dots, T, Y_0 = \{y^0\} \end{array} \right\}.$$

В такому разі алгоритм синтезу і вибору стратегій управління маршрутизацією ПД в СМ, як задачі дискретної динамічної оптимізації, можна представити послідовністю кроків:

1. Для усіх $y \in \overset{\circ}{Y}_T$ визначаємо функцію ціни для немарківської динамічної задачі $J_{t+1}(x) = j_0(t)$.

2. Для усіх $y \in \overset{\circ}{Y}_{t-1}$ і $t = \{T, T-1, \dots, 1\}$ обчислюємо $J_t(y) = \min \{j_t(y, x + J_{t+1}(W_t(y, x))) : x \in X_t, W_t(y, x) \in Y_t, (y, x) \in Z_t\}$.

Якщо задача $J_t(y)$ не може бути вирішена, припускаємо, що $J_t(y) : +\infty$. В іншому випадку визначаємо оптимальне рішення, як $x_t(y)$.

3. $J_1(y^0)$ є мінімальним значенням функції для немарківської динамічної задачі.

4. Визначаємо $x_1 : x_1(y^0)$ та $y_1 := W_1(y^0, x_1)$.

5. Для усіх $t = \{2, 3, \dots, T\}$ припускаємо $x_t := x_t(y_{t-1})$, $y_t := W_t(y_{t-1}, x_t)$.

При $J_1(y^0) < +\infty$ немарківська динамічна задача має оптимальне рішення $\{x_t, y_{t-1}\}_{t=1}^T$. Кроки 4 і 5 алгоритму породжують оптимальне рішення, оскільки $x_t(y)$ визначає відповідне оптимальне управління на першому етапі процесу, який складається з етапів $t, t+1, \dots, T$ і починається зі стану y . Тим самим здійснюється перехід до нового стану $W(y, x_t(y))$, для якого відомо оптимальне управління $x_{t+1}(W(y, x_t(y)))$ першого етапу процесу, який вміщує етапи $\{t, t+1, \dots, T\}$.

Алгоритм управління маршрутизацією забезпечує стійкість функціонування СМ в разі нестабільного функціонування мережевого інтерфейсу, відмов обладнання, а також зовнішніх і внутрішніх впливів на функціональний стан елементів мережі.

Синтез і вибір рішення в розподіленій системі інтелектуального управління (СІУ) маршрутизацією ПД в СМ ВТ за умов обмежень, невизначеностей і забезпечення гарантоздатності здійснюється на основі певної альтернативи, що отримана на основі аналізу об'єкта управління (ОУ), яким є мережа, і його функціонального стану.

На підставі відомостей про навколишнє середовище і стан СМ при наявності пам'яті і мотивації синтезується мета, яка поряд з іншими даними сприймається СІУ кожного вузла, як елементом розподіленої СІУ маршрутизацією ПД при обслуговуванні запиту на процес передачі.

Робота математичної моделі синтезу і вибору управління маршрутизацією ПД базується на теоретичних передумовах.

Визначимо множину критеріїв або ситуацій, що можуть бути визначені n -мірним вектором, компоненти якого $h_i \in R^+, \forall i = \overline{1, n}$ описують спосіб, якість або передумову використання того чи іншого методу управління за параметром, що належить скінченній впорядкованій множині можливих значень n .

При цьому створюється взаємозв'язок, що визначається множинним відношенням

$$(h_1, h_2, \dots, h_n) \in H_1 \times H_2 \times \dots \times H_n.$$

Набору векторів (h_1, h_2, \dots, h_n) приписують значення $y_j, j = \overline{1, \dots, k}, k \leq n$, що встановлює відповідність певної множини наборів передумов h_i і стратегії управління y_i .

Таким чином може бути обрана функція, що визначає множину стратегій управління маршрутизацією

$$\left[\begin{array}{l} f : H_1 \times H_2 \times \dots \times H_n \rightarrow Y \\ Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \forall y_j \in [0, \dots, 1], j = \overline{1, \dots, k}, k \leq n \end{array} \right.$$

В такому разі синтез і вибір стратегії управління маршрутизацією ПД формально має вигляд таблиці, яка задається наборами маршрутів

$$\left((h_1, h_2, \dots, h_n), y_j \right), \forall j = \overline{1, \dots, k}.$$

Враховуючи те, що в загальному випадку таблиця має великий розмір, множину стратегій для вибору маршруту ПД в СМ ВТ можна визначити геделівськими парами, як ребрами граф-моделі G мережі

$$\left((\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n), y_j \right), \forall j = \overline{1, \dots, k},$$

де $\sigma_i, i = \overline{1, \dots, n}$ – підмножина h_i , $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ – стратегії, які визначають маршрути ПД.

Таким чином, в повній системі завдання вибору $\left((\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n), y_j \right)$ згідно з критерієм обирається рішення щодо маршруту ПД в мережі.

Відповідно до прийнятого рішення виробляється управління щодо послідовності взаємодії вузлів СМ на маршруті від вузла-відправника до вузла-отримувача даних. По завершенню ПД вузол-відправник завершує обслуговування заявки на ПД.

Виходячи з топологічності математичного простору функціонування СМ ВТ, визначаємо теоретико-множинну модель синтезу і вибору рішень щодо управління маршрутизацією ПД при взаємодії конфліктуючих вузлів мережі в умовах обмежень і невизначеностей. В такому разі задачу синтезу управління маршрутизацією можна сформулювати як задачу розв'язання конфлікту взаємодії вузлів мережі у відповідності до принципу оптимальності та правила зупинки, як задачу динамічної дискретної оптимізації.

Розглянемо модель M взаємодії елементів СМ ВТ за умови замкненості простору Q функціонування СМ ВТ з границею $\Gamma_{sp}(Q)$. При цьому варіативність топології мережі пов'язана не тільки з кількістю активних вузлів СМ, а й з гетерогенністю мережі, що обумовлено можливістю виходу в сегмент мереж *Internet i Intranet*, використовуючи маршрутизацію за моделлю *OSI*.

В такому разі модель M взаємодії вузлів СМ в топологічній схемі, яка відображає наявність ребер графу мережі G , можна визначити як

$$M = \bigcup_{i=1}^N M^i,$$

де N – кількість вузлів СМ; M^i – часткова модель i -го вузла СМ, яка відображає кількісні характеристики зв'язків з іншими вузлами мережі – ребрами графу і може бути представлена у вигляді

$$M^i = \langle B^i, F^i, \Gamma_{np}^i \rangle,$$

а множини Γ_{np}^i визначають граматику та правила утворення співвідношень при взаємодії вузлів мережі в просторі Q

$$\Gamma_{np} = \bigcup_{i=1}^N \Gamma_{np}^i .$$

Тобто в загальному випадку можна ввести поняття мови для формального опису процесів, пов'язаних з вирішенням задачі формування топології СМ ВТ в просторі Q .

В загальному випадку мова є нескінченною множиною, а нескінченні об'єкти важко задати, наприклад, простим перерахуванням елементів [17], [18]. Будь-який кінцевий механізм задавання мови є граматикою Γ_{np}^i .

В моделі M^i базис B^i визначає потенційні можливості взаємодії i -го вузла СМ з іншими вузлами мережі при визначенні можливостей маршрутизації і кількісних характеристик зв'язків ребер графу мережі G в просторі Q

$$B^i = (X^i, Y^i, A^i),$$

де X^i – множини потенційно можливого місця знаходження i -го вузла мережі в просторі Q , які визначаються як множини керованих та напівкерованих станів мережі G в просторі параметрів у відповідності з припущенням невизначеності та прогнозу переміщення i -го вузла; множина Y^i визначається характеристиками переміщення i -го вузла в просторі керованих і напівкерованих станів та враховує наявні ресурси управління щодо зміни динамічних характеристик маршрутизації (щільності ПД за напрямком передачі) для i -го вузла мережі у відповідності з припущенням A^i , яке враховує прогноз, невизначеність, динаміку та небезпечність переміщення i -го вузла щодо вузла-відправника для співвідношення F^i , що враховує прогноз, динаміку та безпечність маршруту ПД в просторі Q з базисом B^i .

Для СМ в цілому невизначеність стану можна описати співвідношенням $A = \bigcup_{i=1}^N A^i$.

Значення F^i визначає властивості функціонування i -го вузла мережі при побудові маршруту ПД в просторі Q

$$F^i = (f_x^i, f_c^i, d^{ij}),$$

де f_x^i – згладжені значення координат для i -го вузла в просторі Q для кожного моменту ПД; f_c^i – згладжені значення першої похідної (вектора швидкості зміни координат) при переміщенні вузла в просторі Q ; d^{ij} – відстань взаємодії i -го вузла із суміжним j -м вузлом мережі, яка враховує

зміну параметрів функціонування відповідних каналів ПД (ребер графу мережі G в просторі Q).

Виходячи з формального опису математичних моделей взаємодії вузлів СМ в процесі синтезу і прийняття рішень щодо стратегій управління маршрутизацією ПД, визначимо мінімально-перебірну процедуру синтезу і вибору рішення [8], [19] у відповідності до критерію оптимальності Φ , який фактично є адитивним критерієм вибору, що визначається співвідношенням

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi = \sum_{i=1}^k C_i \lambda_i \\ \lambda_i = \frac{\Delta u_i}{\sup |u_i|}, \forall \lambda_i \in \lambda \cdot \\ \sum_{i=1}^k C_i = 1 \end{array} \right.$$

Значення коефіцієнтів C_i визначається для кожного виду конфліктів окремо. λ_i визначає "витрати на управління" параметрами функціонування СМ згідно з обраною стратегією управління на множині ребер граф-моделі G , що відповідає формальній моделі M за рахунок управління u_i для i -го елемента маршруту ПД в просторі Q .

В такому разі задачу синтезу управління можна сформулювати як конфлікт взаємодії вузлів мережі G в просторі Q

$$K = \langle M, A, \Gamma_{np}, G, \mu \rangle,$$

а процедуру синтезу стратегій вирішення конфлікту μ згідно з принципом оптимальності χ , який реалізовує вимоги критерію Φ , можна представити у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} K = \langle M, A, \Gamma_{np}, G, \mu \rangle \\ \chi K = \mu \end{array} \right.$$

Вибір оптимальної стратегії вирішення конфлікту μ^* з врахуванням правила зупинки $\Gamma_{зуп}$ при переборі формулюється у вигляді

$$\mu^* = \inf_{\chi, \Gamma_{зуп}} K,$$

що визначає постановку конфлікту взаємодії об'єктів та синтезу оптимального рішення в просторі Q .

Дослідження чинників, які впливають на функціональний стан елементів бездротових сенсорних мереж передачі даних

В СМ існує поняття *QoS* (*Quality of Service* – якість обслуговування). В більшості випадків *QoS* визначається чотирма параметрами:

- смуга пропускання каналу зв'язку;
- затримка при передачі пакетів даних;
- коливання затримки при передачі пакетів даних;
- втрата пакетів даних при передачі.

Разом з тим, на параметри *QoS* впливає взаємне розташування вузлів СМ, що визначає топологічні характеристики мережі, залежить від властивостей бездротових каналів зв'язку вузлів, показників якості обслуговування трафіку та завантаження обчислювальних систем СІУ вузлів.

В загальному випадку, обслуговування трафіку ПД в мережі проводиться по маршрутах, які синтезуються і обираються розподіленою СІУ маршрутизацією з використанням протоколів мережевого рівня, що реалізують метод вибору маршрутів. Маршрут ПД вміщує певну кількість транзитних елементів мережі, що включають в себе вузли і з'єднуючі їх канали зв'язку, які в сукупності визначають затримку доставки даних від вузла-відправника до вузла-одержувача. Також, на кожній з ділянок маршруту ПД може відбутися втрата даних.

Таким чином, якість обслуговування, яку визначають втрати і затримка пакетів даних, залежить від характеристик маршруту ПД, якими є кількість транзитних вузлів СМ, довжини транзитних ділянок маршруту, завантаженість каналів зв'язку між транзитними вузлами, наявність радіозавад та завантаженість обчислювального середовища СІУ вузлів мережі.

У загальному випадку, ці характеристики є випадковими, отже, необхідно визначити їх опис у формальній формі. Також слід мати на увазі, що якість обслуговування залежить і від властивостей трафіку, як процесу.

Для дослідження характеристик завантаження транзитних вузлів СМ було проведено імітаційний експеримент, результати якого відображені на рис. 1.



Рис. 1 – Залежність завантаженості обчислювальної системи вузла СМ від часу процесу ПД

За результатами дослідження отримано ідентифікаційну модель у формі поліноміальної функції

$$\eta_{зав}^i = \frac{0.0003t^6 - 0.0367t^5 + 1.8956t^4 - 45.549t^3 + 500.01t^2 - 2302.1t + 15446}{200000},$$

де $\eta_{зав}^i$ – завантаження транзитного вузла СМ (%), t – час від початку процесу ПД (ms).

Завантаженість вузла також впливає на час очікування обслуговування запитів на ПД (рис. 2).

Перетин графіків часових значень очікування обслуговування і завантаженості вузла визначає оптимальне функціонування СІУ маршрутизацією вузла СМ.

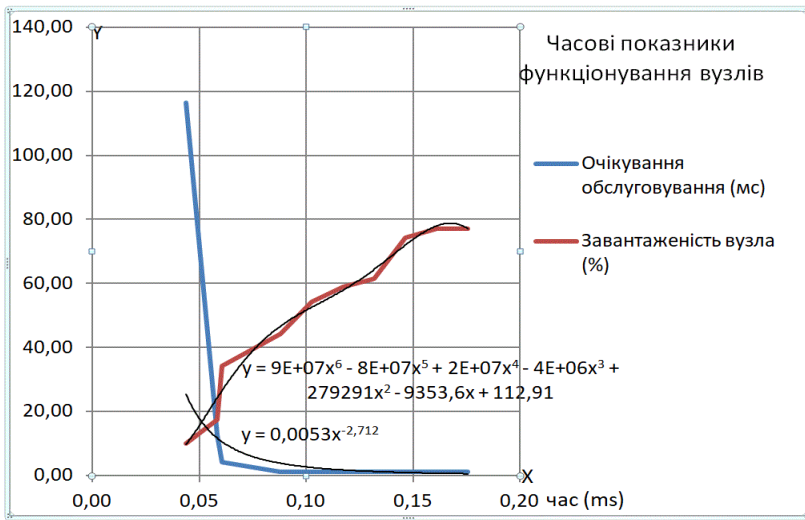


Рис. 2 – Залежність часу очікування обслуговування від завантаженості обчислювальної системи вузла СМ

За результатами дослідження отримано ідентифікаційні моделі завантаженості вузла і очікування обслуговування в СМ.

$$\eta_{завантаженості}^i = 9 \times 10^7 t^6 - 8 \times 10^7 t^5 + 2 \times 10^7 t^4 - 4 \times 10^6 t^3 + 279291 t^2 + 112,91,$$

де $\eta_{завантаженості}^i$ – завантаженість транзитного вузла СМ (%), t – час від отримання запиту на ПД (ms).

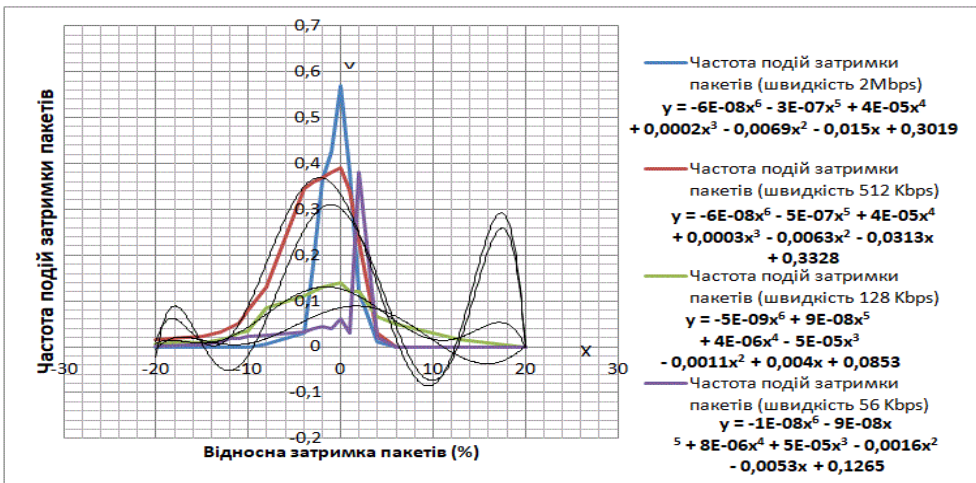
$$\eta_{вузла}^i = 0.0053t^{-2,712},$$

де $\eta_{вузла}^i$ – час очікування обслуговування транзитного вузла СМ (ms), t – час від отримання запиту на ПД (ms).

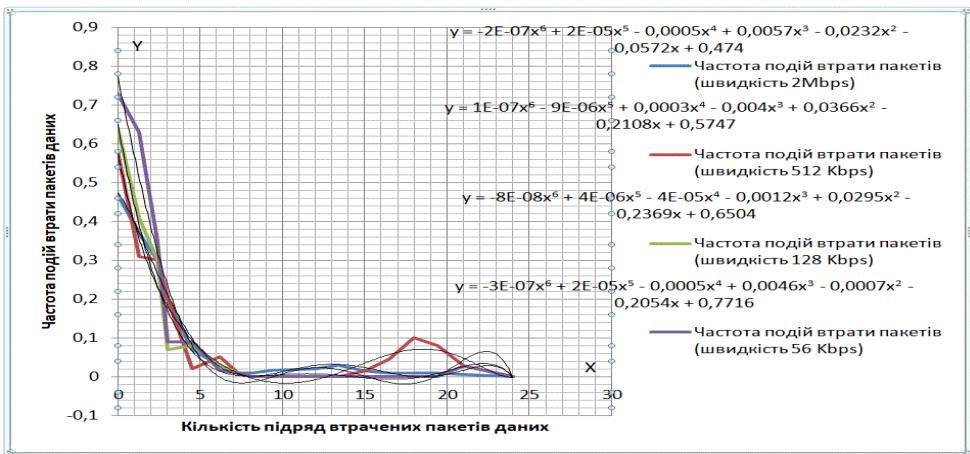
Оптимальне співвідношення, що визначає оптимальне функціонування вузла СМ, є рішенням рівняння $\eta_{завантаженості}^i = \eta_{вузла}^i$.

Надалі при аналізі втрат пакетів даних і швидкості передачі даних з використанням бездротових технологій слід враховувати те, що підтримка протоколів передачі даних може бути апаратною, програмною або змішаною. Протоколи прикладного і мережевого рівня практично завжди підтримуються програмно. Протоколи фізичного та каналного рівнів тісно пов'язані із середовищем передачі даних і підтримуються апаратно мережевими інтерфейсними адаптерами (картами). Мережевий рівень може підтримуватися як апаратно, так і програмно.

Результати імітаційних експериментів щодо дослідження подій затримки і втрати пакетів даних при передачі бездротовими каналами ПД стандарту IEEE 802.11/a/b/g/n наведені на рис. 3.



a)



b)

Рис. 3 – Результати дослідження подій затримки і втрати пакетів даних

Отримані ідентифікаційні моделі дозволяють забезпечувати управління якістю обслуговування при мінімізації втрат пакетів шляхом зміни швидкості передачі даних при інформаційному обміні вузлів СМ.

Висновки

Сервіс-орієнтовані СМ є розподіленими самоорганізованими мережами збирання і передачі даних до певного хоста або до зовнішньої мережі через інші сенсори з використанням бездротового каналу передачі даних. Такі мережі, як правило, мають радіуси взаємодії з вузлами, що можуть перевищувати гранично припустимі. В такому разі вибір топології СМ має безпосередній вплив на вибір протоколів, параметрів каналів взаємодіючих вузлів та маршрут ПД. Саме тому дослідження моделей СМ ВТ і методів інтелектуального управління маршрутизацією ПД за умов забезпечення гарантоздатності мереж є актуальним науковим завданням.

Сучасні СІУ самоорганізованими гарантоздатними СМ і процесами, що обумовлені їх функціонуванням, структурно та функціонально є складними і багатомірними. Їх прагматична сутність обумовлюється перш за все наявністю взаємозв'язків, правил та відношень, як між власне внутрішніми компонентами, так і з компонентами зовнішнього середовища. Взаємозв'язки між компонентами описуються, як правило, моделями, які відображають специфіку взаємодії цих компонент, елементів та підсистем із зовнішнім і внутрішнім середовищем в умовах невизначеностей, довільних обмежень та конфлікту. При цьому невизначеності обумовлені неоднозначністю, неповнотою або відсутністю даних про вектор стану і параметри функціонування СІУ; неконтрольованими завадами вимірювання значення параметрів; зовнішніми та внутрішніми збуреннями; властивостями простору існування СМ; наявністю об'єктів, які знаходяться в стані конфлікту. Під конфліктом в цьому сенсі розуміють явище взаємодії по-різному цілеспрямованих сторін – об'єктів технічних систем (ТС), які або мають складний опис, що не може бути використаним практично, або взагалі не можуть бути повною мірою описаними як формально, так і вербально.

Проблемам дослідження властивостей та характеристик, що впливають на процеси функціонування і управління сучасними мережами ПД, присвячені роботи вітчизняних та закордонних вчених, таких як Д. Бертсекас [20], Л.Н. Беркман [21], Б.С. Гольдштейн [22], А.Е. Кучерявий [23] та інших. За їх висновками встановлено, що процеси функціонування гарантоздатних самоорганізуючих СМ ВТ потребують створення новітніх СІУ на основі дискретних моделей та методів вирішення задач вибору з використанням методів динамічної дискретної оптимізації.

В цьому сенсі особливий інтерес має дослідження процесів підвищення ефективності управління маршрутизацією ПД в СМ ВТ за рахунок використання СІУ в умовах забезпечення гарантоздатності при наявності обмежень і невизначеностей. За результатами аналізу та узагальнення загальнонаукових і методологічних засад щодо існуючих підходів і методів управління маршрутизацією об'єктами-процесами в роботі, по-перше, проведено обґрунтування та досліджено проблеми управління маршрутизацією власне у сервіс-орієнтованих СМ ВТ за умов конфлікту взаємодії їх вузлів, по-друге, запропоновано математичну модель

функціонування СМ ВТ в умовах обмежень і невизначеностей, по-третє, досліджені процеси функціонування обчислювальних систем вузлів мереж передачі даних.

При дослідженні методів управління маршрутизацією ПД в СМ ВТ за умов невизначеностей і обмежень запропоновано застосовувати методологію системно-структурного аналізу процесів взаємодії конфліктуючих вузлів мережі, як дослідження явища в цілому.

СІУ маршрутизацією ПД розглянуто в якості розподіленої системи, що складається з підструктур, які, у свою чергу, складаються з елементів і в якості підсистем входять в системи більш високого рівня.

Результати проведених досліджень дозволили отримати формальні описи залежності завантаженості обчислювальної системи вузла СМ від часу процесу ПД, часу очікування, часу обслуговування від завантаженості обчислювальної системи вузла СМ, визначити кількісні показники затримки і втрати пакетів даних в залежності від режимів функціонування СМ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олифер В.Г. и Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб: Питер, 2010. – 944 с.
2. Frank Miller. Designing & Deploying Network Solutions for Small and Medium Business. Instructor Textbook Rev. 1.0. 2014. – 602 p.
3. Гніденко М.П., Серих С.О. і Прокопов С.В. Конвергентна мережна інфраструктура. Навчальний посібник. – Київ: ДУТ, 2019. – 173 с.
4. Семко В.В., Семко О.В., Бурячок В.Л. і Складаний П.М. Методологія інтелектуального управління маршрутизацією в конфліктуючих сенсорних мережах варіативної топології, *Сучасна спеціальна техніка*, 2018, С. 64–76.
5. Семко В.В. і Семко О.В. Розробка формальної моделі інтелектуального управління маршрутизацією в конфліктуючих сенсорних мережах варіативної топології, *Математичне моделювання в економіці*, 2019, С. 5–19.
6. Семко О.В. Логіко-семантична модель управління маршрутизацією потоків даних в сенсорних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. №52. С. 135–139.
7. Семко В.В. і Семко О.В. Метод управління маршрутизацією потоків даних в гетерогенних мережах за умов конфлікту, невизначеностей і збурень. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 2021, С. 73–84.
8. Семко В.В. Вирішення задачі конфлікту за методом інтегрального усікання варіантів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2015. № 2. С. 40–50.
9. Подиновский В.В. Математическая теория выработки решений в сложных ситуациях. Учебник. – М: МО СССР, 1981. – 211 с.
10. Касьянов В.А. Субъективный анализ: Монография. Киев: НАУ, 2007. – 512 с.
11. Павлов В.В. Конфликты в технических системах. – К: Вища школа, 1982. – 184 с.
12. Павлов В.В. и Павлова С.В. Интеллектуальное управление сложными нелинейными динамическими системами. Аналитика интеллекта. – К: Наукова думка, 2016. – 215 с.
13. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М: Наука, 1986. – 288 с.
14. Рихтер К. Динамические задачи дискретной оптимизации. – М: Радио и связь, 1985. – 136 с.
15. Семко О.В. і Семко В.В. Розробка формальної моделі інтелектуального управління маршрутизацією в конфліктуючих сенсорних мережах варіативної топології. *Математичне моделювання в економіці*. 2019. № 1. С. 5–19.

16. Пападимитру Х. і Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. – М: Мир, 1985. – 510 с.
17. Дюбин Г.Н. и Суздаль В.Г. Введение в прикладную теорию игр. – М: Наука, 1969. – 336 с.
18. Исследование операций. Методологические основы и математические методы / под ред. Дж. Моудера и С. Элмаграби. – М: Мир, 1981. – 712 с.
19. Семко О.В. і Семко В.В. Дослідження властивостей рішення задачі конфлікту за методом інтегрального усікання варіантів. *Проблеми інформатизації та управління*. 2014. № 2. С. 60–71.
20. Бертсекас Д. и Галлагер Р. Сети передачи данных. – М: Мир, 1989. – 544 с.
21. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проективання телекомунікаційних мереж – Київ: Техніка, 2002. – 792 с.
22. Гольдштейн Б.С. Сети связи пост-NGN. СПб: БХВ-Петербург, 2014. – 160 с.
23. Кучерявый, А.Е., Цуприков А.Л. Сети связи следующего поколения. – М: Изд-во ФГУП ЦНИИС, 2006. – 278 с.

Стаття надійшла до редакції 01.07.2021 і прийнята до друку після рецензування 08.09.2021

REFERENCES

1. Olifer, V.G., & Olifer, N.A. (2010). *Komp'yuternye seti. Principy, tekhnologii, protokoly*. SPb: Piter (in Ukrainian).
2. Frank Miller. (2014). *Designing & Deploying Network Solutions for Small and Medium Business. Instructor Textbook Rev. 1.0*.
3. Hnidenko, M.P., Serykh, S.O., & Prokopov, S.V. (2019). *Konverhentna merezhna infrastruktura. Navchalnyi posibnyk*. Kyiv: DUT (in Ukrainian).
4. Semko, V.V., Semko, O.V., Buryachok, V.L., & Skladannij, P.M. (2018). Metodologiya intelektual'nogo upravlinnya marshrutyzatsiieu v konfliktuyuchih sensornih merezhah variatyvnoi topologii. *Suchasna special'na tekhnika*, 64-76 (in Ukrainian).
5. Semko, V.V., & Semko, O.V. (2019). Rozrobka formal'noi modeli intelektual'nogo upravlinnya marshrutyzatsiieu v konfliktuyuchih sensornih merezhah variatyvnoi topologii. *Matematichne modelyuvannya v ekonomici*, 5-19 (in Ukrainian).
6. Semko, O.V. (2018). Logiko-semantichna model' upravlinnya marshrutyzatsiieu potokiv danih v sensornih merezhah. *Sistemi upravlinnya, navigacii ta zv'yazku*, 52, 135-139 (in Ukrainian).
7. Semko, V.V., & Semko, O.V. (2021). Metod upravlinnya marshrutyzatsiieu potokiv danih v heterogenih merezhah za umov konfliktu, nevznachenostej i zburen'. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 73-84 (in Ukrainian).
8. Semko, V.V. (2015). Virishennya zadachi konfliktu za metodom integral'nogo usikannya variantiv. *Telekomunikacijni ta informacijni tekhnologii*, 2, 40-50 (in Ukrainian).
9. Podinovskij, V.V. (1981). *Matematicheskaya teoriya vyrabotki reshenij v slozhnyh situacijah*. Uchebnik. Moscow: MO SSSR (in Russian).
10. Kas'yanov, V.A. (2007). *Sub"ektivnyj analiz: Monografiya*. Kiev: NAU (in Russian).
11. Pavlov, V.V. (1982). *Konflikty v tekhnicheskikh sistemah*. Kyiv: Vishcha shkola (in Russian).
12. Pavlov, V.V., & Pavlova, S.V. (2016). *Intellektual'noe upravlenie slozhnymi nelinejnymi dinamicheskimi sistemami. Analitika intellekta*. Kyiv: Naukova dumka (in Russian).
13. Pospelov, D.A. (1986). *Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika*. Moscow: Nauka (in Russian).
14. Rihter, K. (1985). *Dinamicheskie zadachi diskretnoj optimizacii*. Moscow: Radio i svyaz' (in Russian).

15. Semko, O.V., & Semko, V.V. (2019). Rozrobka formal'noi modeli intelektual'nogo upravlinnya marshrutzatsiieiu v konfliktuyuchih sensornih mrezhah variatyvnoi topologii. *Matematichne modelyuvannya v ekonomici*, 1, 5-19 (in Ukrainian).
16. Papadimitru, H., & Stajglic, K. (1985). *Kombinatornaya optimizaciya. Algoritmy i slozhnost'*. Moscow: Mir (in Russian).
17. Dyubin, G.N., & Suzdal', V.G. (1969). *Vvedenie v prikladnyuyu teoriyu igr*. Moscow: Nauka (in Russian).
18. Moudier, D., & Jelmagrabi, S. (Eds.). (1981). *Issledovanie operacij. Metodologicheskie osnovy i matematicheskie metody*. Moscow: Mir (in Russian).
19. Semko, O.V., & Semko, V.V. (2014). Doslidzhennya vlastivostej rishennya zadachi konfliktu za metodom integral'nogo usikannya variantiv. *Problemi informatizacii ta upravlinnya*, 2, 60-71 (in Ukrainian).
20. Bertsekas, D., & Gallager, R. (1989). *Seti peredachi danyh*. Moscow: Mir (in Russian).
21. Steklov, V.K., & Berkman, L.N. (2002). *Proektuvannya telekomunikacijnih mrezh*. Kyiv: Tekhnika (in Ukrainian).
22. Gol'dshtejn, B.S. (2014). *Seti svyazi post-NGN*. SPb: BHV-Peterburg (in Russian).
23. Kucheryavyj, A.E., & Cuprikov, A.L. (2006). *Seti svyazi sleduyushchego pokoleniya*. Moscow: Izd-vo FGUP CNIIS (in Russian).

The article was received 01.07.2021 and was accepted after revision 08.09.2021

Семко Віктор Володимирович

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління факультету кібербезпеки, комп'ютерної і програмної інженерії Національного авіаційного університету

Адреса робоча: 03058, Україна, м. Київ-58, Проспект Гузара Любомира, 1

ORCID ID: 0000-0001-5157-4264 **e-mail:** semko_viktor@meta.ua

Семко Олексій Вікторович

кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу інформаційної безпеки Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 02000, Київ, Україна, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: 0000-0001-6473-1329 **e-mail:** semalek@meta.ua