

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-54-28>

УДК 004.8:621.391

Беляков Роберт Олегович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-9882-3088>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

## ІЄРАРХІЧНА МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Беляков Р.О. Ієрархічна модель інтелектуального управління наземно-повітряною комунікаційною мережею спеціального призначення. У сучасних наземно-повітряних мобільних мережах, які включають комунікаційні вузли із різними технічними характеристиками, мають велику розмірність – тисячі користувачів із запитом на різноманітні сервіси, один із викликів полягає у забезпеченні ефективного управління. Така масштабність та динамічна природа середовища функціонування створює значне функціональне навантаження на систему управління, вимагаючи декомпозиції задач управління. Ефективне рішення вбачається у чіткому розділенні цілей на користувачькі та мережеві, що дозволить оптимізувати роботу мережі та задовольнити потреби абонентів. Проведений аналіз існуючих моделей методів та алгоритмів координації, управління та оптимізації у багаторівневих системах наземно-повітряних комунікаційних мереж типу Ad-Hoc показав, що вони здебільшого мають вузькоспрямовані завдання реалізації окремих цільових функцій. В статті вперше запропоновано ієрархічну модель інтелектуального управління наземно-повітряною комунікаційною мережею, що з точки зору загальної структури відповідає існуючій ієрархічній моделі для управління наземними мобільними радіомережами, однак розширена описом повітряної мережі. Крім того, в статті показано процес функціональної взаємодії між рівнями вузол – вузол-метаагент – вузол-координатор у вигляді алгоритму. Для оптимізації процесу міжрівневої взаємодії пропонується застосувати алгоритми машинного навчання із підкріпленням. Також в статті математично описано процес управління політиками винагород та штрафів. Встановлено, що ітеративні методи забезпечують більшу гнучкість та адаптивність, але можуть вимагати більше часу для знаходження оптимального рішення, проте у випадку завчасного формування статистичної вибірки функціонування окремих підсистем управління, можливе застосування безітеративних методів оптимізації на початковому етапі функціонування, а також зменшення часу ітеративного процесу донавання інтелектуальних систем управління вузлів-координаторів та вузлів-метаагентів.

**Ключові слова:** інтелектуальне управління, машинне навчання із підкріпленням, прогнозування, модель мобільності, наземно-повітряна комунікаційна мережа, мобільна базова станція, мобільний користувач, система управління, радіозв'язність, мультикастова група, SDR

### **Bieliakov R. Hierarchical model of intelligent management of special purpose ground-air communication network.**

In modern ground-air mobile networks, which include communication nodes with different technical characteristics, have a large dimension – thousands of users with requests for various services, one of the challenges is to ensure effective management. Such large-scale and dynamic nature of the operating environment creates a significant functional load on the management system, requiring the decomposition of management tasks. An effective solution is seen in the clear separation of goals into user and network goals, which will allow optimizing the network and meeting the needs of subscribers. The analysis of existing models of methods and algorithms for coordination, management and optimization in multi-level systems of Ad-Hoc type ground-air communication networks showed that they mostly have narrowly focused tasks of implementing individual target functions. In the article, for the first time, a hierarchical model of intelligent control of the ground-air communication network is proposed, which, from the point of view of the general structure, corresponds to the existing hierarchical model for the control of land mobile radio networks, but expanded by the description of the air network. In addition, the article shows the process of functional interaction between the node – node-metaagent – node-coordinator levels in the form of an algorithm. To optimize the process of interlevel interaction, it is proposed to apply machine learning algorithms with reinforcement. The article also mathematically describes the process of managing rewards and fines policies. It has been established that iterative methods provide greater flexibility and adaptability, but may require more time to find the optimal solution, however, in the case of early formation of a statistical sample of the functioning of individual control subsystems, it is possible to use non-iterative optimization methods at the initial stage of functioning, and reduce the time of the iterative process of retraining intelligent management systems of coordinator nodes and metaagent nodes.

**Keywords:** intelligent control, machine learning with reinforcement, prediction, mobility model, ground-air communication network, mobile base station, mobile user, control system, radio communication, multicast group, SDR

### **Постановка наукового завдання.**

Для управління процесами інформаційного обміну в перспективних наземно-повітряних комунікаційних мережах (НПМ) класу MANET і FANET (рис. 1), однією із задач управління є розділення мережі на підмережі або зони. Враховуючи, що НПМ можуть складатись із підмереж, а саме: наземних комунікаційних вузлів, мобільних базових станцій, безпроводових сенсорних мереж, підмереж повітряних комунікаційних аероплатформ, при чому розмірність таких підмереж може сягати тисяч абонентів, кожен з яких може мати запити на реалізацію різних сервісів для забезпечення інформаційного обміну, а отже, створювати дуже високе «функціональне навантаження» на процес управління. Тобто, для реалізації процесу управління НПМ необхідно здійснювати декомпозицію задач і забезпечити два основних класи цілей управління –

користувальницькі та мережеві.

В класичному розумінні управління мережею може здійснюватися централізовано – через центр управління мережею або децентралізовано з використанням алгоритмів адаптивного та/або інтелектуального управління. У кожному із способів управління для прийняття оптимальних або субоптимальних рішень необхідно вирішити протиріччя, що виникає при зборі, обробці та обміні великою кількістю даних про стани вузлових елементів в динамічному середовищі функціонування, пов'язане із обсягами службової та корисної інформації.

Таким чином, **актуальним** є завдання розробки нової ієрархічної моделі взаємодії вузлових елементів перспективної наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального (військового) призначення для забезпечення заданої якості інформаційного обміну в умовах високої динаміки середовища функціонування.

**Метою статті** є розробка ієрархічної моделі взаємодії інтелектуальних систем управління вузлів наземно-повітряних комунікаційних мереж спеціального (військового) призначення та визначення функціональних зв'язків ієрархічної структури наземної та повітряної мережі.

**Об'єктом дослідження** є процеси збору та обробки інформації про стан вузлових елементів та середовища функціонування для формування управляючих впливів для реалізації мережевих і користувальницьких цільових функцій. Відповідно, **предметом дослідження** є моделі, методи та алгоритми координації та оптимізації у багаторівневих системах.

Основними завданнями статті є наступні:

1. Аналіз існуючих моделей, методів та алгоритмів координації та оптимізації у багаторівневих системах управління наземно-повітряних комунікаційних мереж типу Ad-Hoc.
2. Дослідження особливостей функціонування наземно-повітряних комунікаційних мереж.
3. Формалізація запропонованої ієрархічної моделі взаємодії інтелектуальних систем управління вузлів наземно-повітряних комунікаційних мереж спеціального (військового) призначення.

#### **Аналіз останніх публікацій.**

Більшість проаналізованих наукових праць із предметної області були спрямовані на вирішення вузьконаправлених задач управління за певними критеріями. Наприклад, в дослідженні [1] запропоновано метод розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації комп'ютерної мережі. Запропоновано оптимізаційну модель оновлення комп'ютерної мережі. Дана модель враховує такі параметри як вартість оновлення, пропускну здатність, інтенсивність відмов і класифікована як багатокритеріальна задача. Для розв'язку цієї задачі запропоновано використати метод квазіоптимізації локальних критеріїв. Для оптимізації локальних задач використано симплекс-метод.

В статті [2] пропонується мультиагентна модель системи підтримки прийняття рішення по управлінню розподіленими об'єктами. В статті визначена цільова функція мультиагентної множини реструктуризації систем підтримки прийняття рішень (СППР) у виді сумарного максимального часу збору даних вузлами СППР.

У науковій праці [3] запропоновано функціональну модель системи управління наземно-повітряними мережами у вигляді ієрархії взаємодії центру управління, систем управління телекомунікаційними аероплатформами, систем управління наземними вузлами. Проведено класифікацію задач управління повітряними мережами, визначено множину цільових функцій управління мережами. Розглянуто особливості побудови моделі прийняття рішень з управління мережею телекомунікаційних аероплатформ.

Стаття [4] присвячена розробці моделі інтелектуального управління ресурсами наземної комунікаційної мережі класу MANET. Управління мережами MANET є складним завданням через їхню динамічну природу, високу мобільність вузлів, обмежені ресурси: енергію батареї, технічні характеристики комунікаційних засобів, протоколи різних рівнів моделі OSI, та потребу реалізації функцій управління на вузловому і мережевому рівні в умовах відсутності централізованого контролю.

В роботах [5, 6] для об'єднання різнорідних інтелектуальних агентів (ІА) в інтелектуальній системі управління (ІСУ) мобільної радіомережі (МР) в роботі вперше запропоновано ієрархічну модель взаємодії ІА, суть якої полягає в концептуальному представленні ІСУ МР у вигляді ієрархічної структури з вертикальними зв'язками, які визначають підпорядкованість задач управління МР.

В статті [7] розглянуті основні підходи, методи (протоколи) фізичного, каналного, мережевого, транспортного, прикладного рівня моделі OSI побудови повітряних мереж класу FANET для їх інтеграції в наземну мобільну комунікаційну мережу з урахуванням особливостей динамічної топології та ресурсних обмежень, та визначено, що завдання синтезу наземно-повітряних комунікаційних мереж вимагає розробки нових та удосконалення існуючих підходів (методів, методик, алгоритмів) для формування управлінських рішень.

В статті [8] запропоновано інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень, при чому дослідження базується на нейромережевому алгоритмі зграї моржів для оцінки стану об'єкта в динамічному середовищі. Дослідження [9] базується на штучній нейронній мережі алгоритму зграї сарани для пошуку управляючого рішення.

В статті [10] розкрито загальний підхід до вирішення задач оптимізації в складних ієрархічних системах, та зосереджено увагу на критеріях оптимальності з використанням ітеративних і безітеративних методів. Отже, аналіз літературних джерел із предметної області дозволяє припустити, що системне представлення процесу управління наземно-повітряною комунікаційною мережею потребує подальшого розвитку, систематизації, узагальнення, та опису функціональної взаємодії із використанням новітніх наукових підходів.

#### **Виклад основного матеріалу.**

**Постановка задачі.** Розглядається наземно-повітряна комунікаційна мережа (НПМ) спеціального (військового) призначення значної розмірності (сотні мобільних вузлів), які випадково розташовані на заданій території і функціонують при відсутності будь-якої комунікаційної інфраструктури загального користування. Кожен наземний комунікаційний вузол (НКВ) описується як об'єкт, що має: певний тип носія (людина – мобільний користувач (МК), транспортна платформа – мобільна базова станція (МБС)), батарея, процесор, пам'ять, прийомо-передавач, антена, система позиціонування, систему управління (СУ). Кожен повітряний комунікаційний вузол – комунікаційна аероплатформа є елементом повітряної комунікаційної мережі, і може бути розміщений на БПЛА коптерного або літакового типу із власною батареєю, процесором, пам'яттю, прийомо-передавачем, антенною системою, системою позиціонування, системою управління (СУ). В загальному комунікаційне обладнання вузлів НПМ виконане у вигляді SDR. Управління повітряним рівнем (цільовими функціями повітряного рівня), що складається із КА здійснюється із МБС через головний вузол КА-ГВ.

В процесі функціонування МК змінює своє місцезнаходження та здійснює інформаційний обмін заданого типу трафіка в залежності від своїх спеціальних завдань, а управління переміщенням МК не здійснюється, тобто МК мають стохастичну, але прогнозовану поведінку переміщення.

СУ мобільних користувачів, реалізують процес збору даних власного стану (місцезнаходження, пропускної здатності, часу затримки доставки повідомлень, енергії батарей тощо), з метою формування управляючих впливів СУ мобільних базових станцій для забезпечення функціонування НПМ в динамічних умовах із заданим рівнем якості.

Система управління МБС на транспортних платформах забезпечує прогнозування стану наземної комунікаційної мережі в зоні радіозв'язності МБС та формує управляючі рішення щодо зміни місця розташування і оптимізації використання мережевих і каналних ресурсів за певними алгоритмами та протоколами на кожному із рівнів взаємодії.

Системи управління можуть бути побудовані із використанням методів та алгоритмів нейронних мереж та машинного навчання. Виконання функцій моніторингу та управління мережевими (НПМ) цільовими функціями можливе в ручному режимі посадовими особами центру управління мережею (ЦУМ) розміщеному на МБС.

Основне завдання ієрархічної моделі взаємодії інтелектуальних систем управління вузлів наземно-повітряних комунікаційних мереж полягає в забезпеченні управління цільовою структурою НПМ в автоматичному режимі в реальному часі з урахуванням динаміки середовища функціонування.

*Задано:* НПМ представляється у вигляді сукупності трьох підмереж різних рівнів  $\psi$ , кожна з яких задається у вигляді графа  $G^\psi = (V^\psi, E^\psi)$  із множиною вершин  $V^\psi = \{v_i\}$  і множиною ребер  $E^\psi = \{(v_i, v_j)\}$ ,  $i, j = \overline{1, N_\psi}$ ,  $\psi = \overline{1, 3}$  (1- мережа мобільних наземних комунікаційних вузлів НМ, 2 – мережа мобільних базових станцій, 3 – мережа вузлів повітряного рівня на КА).

Кожна підмережа  $\psi$ -го рівня керується через систему управління (рис. 1) для реалізації двох основних класів задач два основних класи задач: перший – комунікаційні  $U_{\text{ком}}$ ; другий –  $U_{\text{пер}}$  переміщенням вузлів (МБС і КА)

$$U(t) = \{U_{\text{ком}}(t), U_{\text{пер}}(t)\}. \quad (1)$$



Рис. 1 – Система управління комунікаційними вузлами НІМ

Задачі управління переміщенням  $\psi=1$  мережі не вирішується, а початкова статистична вибірка метрик переміщення наземних комунікаційних вузлів представлена із використанням моделі мобільності, представленої у [11].

*Обмеження та вимоги:*

площа переміщення мобільних вузлів залежить від задач підрозділу в якому реалізується процес інформаційного обміну;

інформація про параметри стану вузлів (координати розміщення, рівень енергії батарей, об'єм даних) збирається при первинному обміні hello-пакетами та оновлюється згідно алгоритму функціональної взаємодії при реалізації задач управління комунікаційною складовою.

**Необхідно:** розробити ієрархічну модель взаємодії інтелектуальних систем управління вузлів наземно-повітряних комунікаційних мереж полягає в забезпечення управління цільовою структурою НІМ в автоматичному режимі в реальному часі з урахуванням динаміки середовища функціонування, що забезпечить виконання функцій управління НІМ за рахунок Q-го складу підсистем системи формування рішень управління та вирішить проблему інтеграції мережі повітряного рівня [7].

**Ієрархічна модель інтелектуальної системи управління наземно-повітряної комунікаційної мережі.**

Існуюча ієрархічна модель [5, 6] взята за основу для побудови запропонованої ієрархічної моделі, показаної на рисунку 2, і представлена трьома основними рівнями управління:

**Виконавчий рівень (нульовий рівень)** включає в себе безпосереднє управління ресурсами: маршрутизацію, управління радіоресурсами, потоками даних, безпекою тощо. Кожен вузол на цьому рівні має автономні функції і здатен до самостійного прийняття рішень на основі власних параметрів і стану мережі,  $C_{rp}^q(k)$  – множина векторів службової інформації,  $P_{qr}(k)$  – множина векторів впливу середовища.

**Вузловий рівень (перший рівень)** уособлює метаагентів  $(I_{1q}, U_{1q})$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , які координують діяльність агентів нульового рівня, із множиною функціональних підсистем  $P_{qr}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ ,  $r = \overline{1, R}$ .

Вони відповідають за оптимізацію управління залежно від загальних цілей  $Y_{1q}(k)$  і стану  $Z_{1q}(k)$  мережі, вибираючи найкращі стратегії управління  $U_{1qr}(k)$ .

**Мережевий рівень (другий рівень)** представлений вузлом-координатором  $(I_2, U_2)$ , що корегує цільові функції метаагентів першого рівня з урахуванням загальної ситуації у мережі або її частині.

В загальному, поняття ієрархічного управління [10] передбачає структурування мережі на декілька рівнів управління, що може призвести до збільшення обсягу службової інформації та довжини маршруту. Це пов'язано з тим, що кожен рівень мережі може вимагати власного набору інформації для маршрутизації та управління, що в свою чергу, збільшує загальну кількість комунікаційних повідомлень.

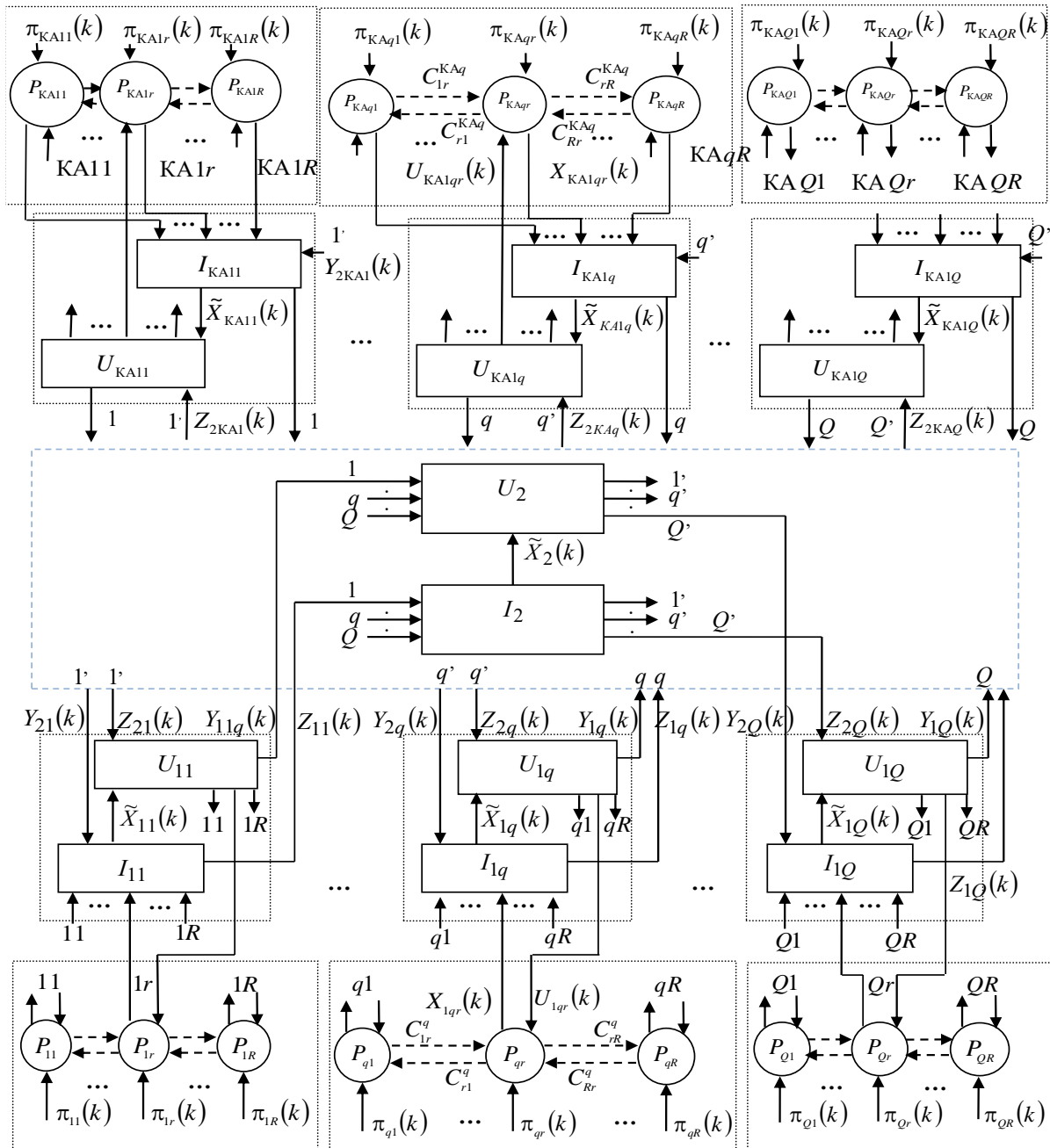


Рис. 2 – Ієрархічна модель взаємодії вузлових інтелектуальних систем управління, побудованих з використанням технологій інтелектуальних агентів та мультиагентних систем

*Ітеративність процесу управління.* Запропонована ієрархічна модель відображає структуру функціональних взаємозв'язків в складних багатопараметричних системах управління мобільними

комунікаційними мережами, однак зображена на рисунку 2, побудована відповідно до існуючого підходу [5, 6], а система управління потребує уточнення з точки зору процесу прийняття управлінських рішень для реалізації процесів функціонування підсистем показаних на рисунку 1.

У статті [6] описано можливість застосування як ітеративних, так і безітеративних методів оптимізації для покращення ефективності мережі та зменшення негативних наслідків, пов'язаних зі збільшенням службової інформації.

Застосування ітеративних методів дозволяє поступово доопрацьовувати рішення, виходячи з отриманої в ході попередніх ітерацій інформації, тим самим покращуючи ефективність управління. Безітеративні методи, в свою чергу, застосовуються для досягнення оптимального рішення без необхідності повторного перегляду вже прийнятих рішень, що може бути ефективно при наявності достатньо повної та точної апріорної інформації, що практично не можливо в умовах високої динаміки середовища функціонування.

Для зменшення негативного впливу збільшення обсягу службової інформації, моделі та алгоритми мають бути спроектовані таким чином, щоб оптимізувати використання мережевих ресурсів, забезпечити ефективний обмін даними між різними рівнями мережі та мінімізувати загальну кількість необхідних комунікацій.

Враховуючи вище зазначене, включення механізмів прогнозування в модель управління може значно покращити її ефективність, дозволяючи адаптувати мережу до майбутніх змін у поведінці вузлів та загальному стані мережі, що в свою чергу, сприяє оптимізації розподілу ресурсів і підвищенню надійності мережі.

#### Основні математичні співвідношення.

Кореню дерева направленої графу відповідає інтелектуальна система управління так званого вузла-координатора  $(I_2, U_2)$ , на практиці в реальних мобільних комунікаційних мережах таких підструктур може бути багато, але все ж умовно-прогнозована кількість знаючи розмірність мережі та її початкові налаштування і технічні характеристики.

Наприклад, інтелектуальні системи управління «другого рівня» або агенти можуть бути представлені фізично у вигляді систем управління мобільних базових станцій, яка буде агентами для забезпечення зв'язку із головними вузлами повітряної мережі та головними вузлами наземної для підтримки функціональної взаємодії інтелектуальних вузлів і управління мережевим ресурсом мережі, підмережі, зон, груп, мультикастових груп як повітряного так і наземного рівня.

Вершинам дерева відповідає набір підсистем наземної комунікаційної підмережі –

$$\{(I_{11}, U_{11}), (I_{12}, U_{12}), \dots, (I_{1Q}, U_{1Q})\};$$

та повітряної комунікаційної мережі –

$$\{(I_{KA11}, U_{KA11}), (I_{KA12}, U_{KA12}), \dots, (I_{KA1Q}, U_{KA1Q})\},$$

і представляють  $Q$  метаагентів вузлових інтелектуальних систем управління, що реалізують цільові функції виконавчого (нульового рівня).

Кожна підсистема  $(I_{1q}, U_{1q})$  та  $(I_{KA1q}, U_{KA1q})$  для  $q = 1, 2, \dots, Q$ , складається із:

- блоку контролю станів (ідентифікації)  $I_{1q}, I_{KA1q}$ , для збору та аналізу інформації;

- блоку управління  $U_{1q}, U_{KA1q}$ , для розробки та виконання управлінських рішень множини цільових функцій цільової структури (1).

У свою чергу, кожна підсистема першого рівня  $(I_{1q}, U_{1q}), (I_{KA1q}, U_{KA1q}), q = \overline{1, Q}$  пов'язана з множиною функціональних підсистем нульового рівня  $P_{qr}, P_{KAqr}, q = \overline{1, Q}, r = \overline{1, R}$ , кожна з яких розташована на відстані двох ребер від кореня дерева. Кожна із підсистем нульового рівня реалізує цільові функції шляхом обміну службовою інформацією [6].

Для  $q$ -ї підсистеми управління першого рівня  $(I_{1q}, U_{1q}), q = 1, 2, \dots, Q$ , на рисунку 2, введемо наступні позначення:

$X_{1qr}(k)$  – множина векторів стану  $q$ -го ІА, де  $X_{1qr}(k) = \{x_{1qr}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1qr}$ , розмірності  $a_{1qr} \times 1$ ;

$\widetilde{X}_{1q}(k)$  – множина узагальнених векторів оцінок стану  $q$ -ї підсистеми першого рівня, де  $\widetilde{X}_{1q}(k) = \{\widetilde{x}_{1q}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1q}$  розмірності  $a_{1q} \times 1$ ;

$U_{1qr}(k)$  – множина векторів управління  $q$ -ї підсистеми першого рівня, які спрямовані  $r$ -му ІА нульового рівня, де  $U_{1qr}(k) = \{u_{1qr}^b(k)\}, b = 1, 2, \dots, b_{1qr}$  розмірності  $b_{1qr} \times 1$ ;

$Y_{1q}(k)$  – множина векторів управління  $q$ -ї підсистеми першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору), де  $Y_{1q}(k) = \{y_{1q}^d(k)\}$ ,  $d = 1, 2, \dots, d_{1q}$  розмірності  $d_{1q} \times 1$ ;

$Z_{1q}(k)$  – множина векторів оцінок стану  $q$ -ї підсистеми першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору), де  $Z_{1q}(k) = \{z_{1q}^d(k)\}$ ,  $d = 1, 2, \dots, d_{1q}$  розмірності  $d_{1q} \times 1$ .

Для  $q$ -ї підсистеми управління КА на першому рівні:

$X_{KA1qr}(k)$  – множина векторів стану  $q$ -го ІА КА, де  $X_{KA1qr}(k) = \{x_{KA1qr}^a(k)\}$ ,  $a = 1, 2, \dots, a_{1qr}$  розмірності  $a_{1q} \times 1$ ;

$\widetilde{X}_{KA1q}(k) = \{\widetilde{x}_{KA1q}^a(k)\}$ ,  $a = 1, 2, \dots, a_{1q}$  розмірності  $a_{1q} \times 1$ ;

$U_{KA1qr}(k)$  – множина векторів управління  $q$ -ї підсистеми КА першого рівня, які спрямовані  $r$ -му ІА КА нульового рівня, де  $U_{KA1qr}(k) = \{u_{KA1qr}^b(k)\}$ ,  $b = 1, 2, \dots, b_{1qr}$  розмірності  $b_{1qr} \times 1$ ;

$Y_{KA1q}(k)$  – множина векторів управління  $q$ -ї підсистеми КА першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору КА), де  $Y_{KA1q}(k) = \{y_{KA1q}^d(k)\}$ ,  $d = 1, 2, \dots, d_{1q}$  розмірності  $d_{1q} \times 1$ ;

$Z_{KA1q}(k)$  – множина векторів оцінок стану  $q$ -ї підсистеми КА першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору КА), де  $Z_{KA1q}(k) = \{z_{KA1q}^d(k)\}$ ,  $d = 1, 2, \dots, d_{1q}$  розмірності  $d_{1q} \times 1$ .

**Методи машинного навчання в процесах управління.** Інтеграція механізмів прогнозування в ієрархічні моделі управління мережами може суттєво підвищити ефективність систем управління, що здатні адаптуватися до динамічних умов експлуатації та забезпечити високий рівень продуктивності та надійності мережі.

Процеси прогнозування в моделях управління мережею можуть включати:

*Аналіз статистичних даних* про стан мережі та поведінку вузлів для ідентифікації тенденцій та патернів, які можуть бути використані для прогнозування майбутніх станів;

*Моделювання на етапі планування мережі.* Розробка математичних або імітаційних моделей, здатних відобразити поведінку мережі та її компонентів з метою визначення потенційних майбутніх сценаріїв зміни станів вузлів (мереж, підмереж, зон), для дослідження ефективності сформованих управлінських рішень в умовах динамічної зміни середовища.

*Застосування машинного навчання.* Використання алгоритмів машинного навчання для аналізу великих обсягів даних та автоматичного виявлення закономірностей, на основі яких можна побудувати прогнози про майбутній стан мережі та поведінку вузлів.

*Адаптивне управління.* Розробка управлінських стратегій, які автоматично адаптуються відповідно до прогнозованих змін, дозволяючи мережі бути гнучкою та ефективно реагувати на майбутні виклики, тобто адаптивно змінювати стратегії застосування методів оптимізації з точки зору ітеративності процесу.

**Алгоритм прийняття рішення вузлом-координатором з використанням методу машинного навчання із підкріпленням.**

Процес обробки векторів стану від наземних та повітряних вузлів НПМ для управління політикою винагород алгоритму машинного навчання і прогнозування стану в наземно-повітряній мережі для формування управлінських рішень інтелектуальним метагентом «першого» рівня включає:

1. *Ініціалізація векторів стану.* Для кожного моменту часу  $k$ , наземні вузли та повітряні комунікаційні аероплатформи генерують вектори стану,  $X_{1qr}(k)$  – для наземних вузлів і  $X_{KA1qr}(k)$  – для повітряних вузлів, які відображають поточний стан кожного «інтелектуального» вузла.

$$X_{1qr}(k) = \{x_{1qr}^a(k)\}_{a=1}^{a_{1qr}}, \quad X_{KA1qr}(k) = \{x_{KA1qr}^a(k)\}_{a=1}^{a_{1qr}}. \quad (2)$$

2. *Агрегація та узагальнення станів.* Узагальнені вектори станів  $\widetilde{X}_{1q}(k)$  та  $\widetilde{X}_{KA1q}(k)$  формуються з агрегації векторів станів відповідних наземних і повітряних вузлів:

$$\widetilde{X}_{1q}(k) = f_{\text{арп}}(X_{1qr}(k)), \quad \widetilde{X}_{KA1q}(k) = f_{\text{арп}}(X_{KA1qr}(k)), \quad (3)$$

де  $f_{\text{арп}}$  – функція агрегації, яка може включати, взяття середнього, медіани, максимуму, мінімуму

або інші методи статистичної обробки векторів стану.

3. *Прогнозування стану вузлів.* Використовуючи статистичні дані стану та поточні узагальнені вектори станів, вузол-метаагент застосовує модель машинного навчання із підкріпленням для прогнозування майбутніх станів вузлів:

$$\widehat{X}_{1q}(k+1) = \mathcal{M}_{\text{прог}}(\widehat{X}_{1q}(k), \mathcal{H}_{1q}), \quad \widehat{X}_{\text{КА}1q}(k+1) = \mathcal{M}_{\text{прог}}(\widehat{X}_{\text{КА}1q}(k), \mathcal{H}_{\text{КА}1q}), \quad (4)$$

де  $\mathcal{M}_{\text{прог}}$  - модель прогнозування,  $\mathcal{H}_{1q}$  і  $\mathcal{H}_{\text{КА}1q}$  - статистичні дані для відповідних вузлів.

Процес прогнозування станів наземних і повітряних вузлів відбувається не незалежно, а взаємозалежно, особливо у сценаріях, де повітряні аероплатформи (КА) виконують функції ретрансляторів для наземних користувачів в зоні радіозв'язності (покриття). Ця взаємодія суттєво впливає на процес прогнозування стану обох типів вузлів.

Для врахування взаємозв'язку між наземними вузлами та повітряними ретрансляторами в процесі прогнозування можна використати модель, яка інтегрує інформацію з обох джерел:

$$\widehat{X}_{1q}(k+1) = \mathcal{M}_{\text{прог}}(\widehat{X}_{1q}(k), \mathcal{H}_{1q}, \mathcal{J}_{\text{КА} \rightarrow 1q}(k)),$$

$$\widehat{X}_{\text{КА}1q}(k+1) = \mathcal{M}_{\text{прог}}(\widehat{X}_{\text{КА}1q}(k), \mathcal{H}_{\text{КА}1q}, \mathcal{J}_{1q \rightarrow \text{КА}}(k)),$$

а із урахуванням взаємодії з іншим типом вузлів, а також управлінських рішень та оцінки стану, які були сформовані або отримані від інших вузлів-метаагентів (першого рівня) або від вузла-координатора (другого рівня).

$$\widehat{X}_{1q}(k+1) = \mathcal{M}_{\text{прог}}(X_{1q}(k), \mathcal{H}_{1q}, U_{1qr}(k), Y_{1q}(k), Z_{1q}(k), I_{\text{КА} \rightarrow 1q}(k)), \quad (5)$$

$$\widehat{X}_{\text{КА}1q}(k+1) = \mathcal{M}_{\text{прог}}(X_{\text{КА}1q}(k), \mathcal{H}_{\text{КА}1q}, U_{\text{КА}1qr}(k), Y_{\text{КА}1q}(k), Z_{\text{КА}1q}(k), I_{1q \rightarrow \text{КА}}(k)), \quad (6)$$

де  $\mathcal{J}_{\text{КА} \rightarrow 1q}(k)$  – інформація про взаємодію з повітряними ретрансляторами (КА), яка впливає на стан наземних вузлів;  $\mathcal{J}_{1q \rightarrow \text{КА}}(k)$  – інформація про взаємодію з наземними вузлами, яка впливає на стан повітряних ретрансляторів.

Під моделлю прогнозування  $\mathcal{M}_{\text{прог}}$  у контексті управління інформаційним обміном, мається на увазі математична або алгоритмічна схема, яка здатна аналізувати поточні та статистичні дані про стан мережі, щоб визначити майбутні стани вузлів в деякий момент часу  $k+1$ . Ця модель може використовувати різні методи машинного навчання, статистичні алгоритми або евристичні правила для прогнозування, як, наприклад, нейронні мережі, регресійний аналіз або алгоритми рішення на основі підкріплення.

Щодо статистичних даних для наземних вузлів та для повітряних ретрансляторів  $\mathcal{H}_{1q}$ ,  $\mathcal{H}_{\text{КА}1q}$  – включають в себе записи про попередні стани вузлів, дії, які були здійснені, та винагороди, які були отримані. За своєю суттю, це інформація про швидкість переміщення вузлів, зміни в доступності ресурсів, втрати пакетів під час передачі даних тощо. Статистичні дані використовуються для "навчання" моделі прогнозування, дозволяючи їй виявляти закономірності та тенденції, які можуть бути корисні при прогнозуванні майбутніх станів мережі [11].

Інформація взаємодії  $\mathcal{J}_{\text{КА} \rightarrow 1q}(k)$  та  $\mathcal{J}_{1q \rightarrow \text{КА}}(k)$  стосується даних, які відображають взаємодію між наземними вузлами та повітряними ретрансляторами в певний момент часу. Це може включати сигнали про наявність або відсутність радіо-доступності, інформацію про якість каналу, дані про навантаження на мережу (маршрут, канал), інформацію про пропускну спроможність тощо. Важливо враховувати цю інформацію, оскільки вона дозволяє більш точно моделювати стан мережі, враховуючи взаємозалежність між різними типами вузлів та їхню роль у загальній структурі мережі.

Механізм взаємодії між наземними вузлами та КА може бути реалізований через спільну функцію оцінки стану, яка враховує як власні спостереження вузлів, так і отримані дані від інших вузлів мережі. Це дозволяє уточнити прогноз стану, забезпечуючи більш точне та ефективне управління вузловими ресурсами мережі.

4. *Оновлення політики винагороди:*

На основі прогнозованих станів, вузол-метаагент оновлює політику винагород  $pi_{\text{нов}}$ , враховуючи потенційні винагороди за різні дії:

$$pi_{\text{нов}} = \arg \max_{a_k} E [R | \widehat{X}_{1q}(k+1), a_k],$$

де  $R$  - функція винагороди, а з урахуванням механізмів можливої взаємодії, маємо

$$pi_{\text{нов}} = \arg \max_{a_k} E [R | \widehat{X}_{1q}(k+1), \widehat{X}_{\text{КА}1q}(k+1), a_k],$$



$$pi_{1нов} = \arg \max_{a_{1q}, a_{KA1q}} E [R | \widehat{X}_{1q}(k+1), \widehat{X}_{KA1q}(k+1), a_{1q}, a_{KA1q}], a_{1q} \in U_{1qr}(k), a_{KA1q} \in U_{KA1qr}(k). \quad (7)$$

Зв'язок між політикою винагород і станом інтелектуальної системи управління в загальному вигляді:

$$Q(s, a) = E \left[ R(s, a) + \gamma \max_{a'} Q(s', a') \right],$$

де  $Q(s, a)$  – цінність виконання дії  $a$  в стані  $s$ ,  $R(s, a)$  – негайна винагорода за виконання дії  $a$  в стані  $s$ ,  $\gamma$  – коефіцієнт дисконтування, який визначає важливість майбутніх винагород,  $s'$  – наступний стан системи після виконання дії  $a$ ,  $\max_{a'} Q(s', a')$  – максимальна цінність будь-якої дії  $a'$  в новому стані  $s'$ .

Політика  $pi(s)$  забезпечує формування дії  $a$  для кожного стану  $s$ , максимізуючи очікувану цінність

$$pi(s) = \arg \max_a Q(s, a).$$

Процес функціонування вузла-координатора (агента другого рівня) відбувається за тим же загальним підходом, за алгоритмом описаним (1-6), та відповідно до (7), політика винагород агента другого рівня

$$pi_{2нов} = \arg \max_{Y_{2q}, Y_{2KAq}} E [R | \widehat{X}_2(k+1), Y_{2q}, Y_{2KAq}].$$

Таким чином, запропонований алгоритм прийняття рішення вузлом-координатором (вузлом-метаагентом) з використанням методу машинного навчання із підкріпленням дозволяє системі адаптуватися до майбутніх змін, забезпечуючи ефективне управління ресурсами.

Застосування алгоритмів машинного навчання може покращити точність управлінських рішень, знижуючи витрати та підвищуючи продуктивність.

Однак, по-перше, процеси прогнозування та оновлення політик вимагають значних обчислювальних ресурсів; по-друге, неточні прогнози інтелектуальних агентів (метаагентів) можуть призвести до субоптимальних управлінських рішень.

Варто зазначити, що механізми управління мобільними комунікаційними наземно-повітряними мережами можуть бути представлені як ітеративними так і неітеративними методами оптимізації, вибір яких залежить від специфіки задачі та доступних обчислювальних ресурсів. Ітеративні методи забезпечують більшу гнучкість та адаптивність, але можуть вимагати більше часу для знаходження оптимального рішення. Разом з тим, побудова імітаційної моделі на етапі планування [11] дозволять сформувати статистичну вибірку функціонування окремих підсистем управління «першого рівня», і дозволять здійснити безітеративну оптимізацію на початковому етапі функціонування (розгортання), і скоротити час на ітеративний процес донавчання інтелектуальних систем управління вузлів-координаторів та вузлів-метаагентів. Важливо також враховувати можливість затримок у прийнятті рішень, особливо у динамічних мережах з високими вимогами до часу реакції.

#### **Висновки та перспективи подальшого дослідження.**

В результаті досліджень – встановлено, що завдання управління наземно-повітряною комунікаційною мережею потребує комплексного підходу. Системи управління складних комунікаційних мереж доцільно розподіляти на підсистеми із специфічною цільовою структурою, а управління ними є складним багатопараметричним і багатокритеріальним оптимізаційним завданням. Компоненти таких мереж представлені у вигляді різнотипного обладнання, носії якого мають різні фізичні характеристики. Використання наявної інформації про склад, кількість та тип ресурсів можливо застосувати для моделювання систем (підсистем) на етапі планування і формування статистичної вибірки функціонування мережі. У зв'язку з тим, що основною метрикою для інформаційного обміну і побудови топології мереж є взаємне місцезнаходження мобільних користувачів, знання їх прогнозованих зон функціонування, типів обладнання, протоколів на різних рівнях моделі взаємодії відкритих систем, швидкостей їх переміщення, рельєфу місцевості та перешкод, можливо завчасно сформувати навчальну вибірку станів вузлових елементів і відповідно скоротити час прийняття рішення. В свою чергу це дозволяє знизити ступінь невизначеності під час формування управлінських рішень на етапі оперативного управління.

Визначено, що основним завданням запропонованої ієрархічної моделі взаємодії інтелектуальних систем управління вузлів наземно-повітряних комунікаційних мереж полягає в забезпечення управління цільовою структурою НІМ в автоматичному режимі в реальному часі з урахуванням динаміки середовища функціонування.

Встановлено, що з точки зору функціональної взаємодії, систему управління НІМ можна представити у вигляді направленою графа, що включає три основні рівні – виконавчий, вузловий та мережевий. Однак, це не означає, що в такому випадку здійснюється тільки ієрархічний метод маршрутизації в мережі, а створює передумови для централізованого підлаштування, моніторингу, резервування мережі. З одного боку це може призвести до збільшення службової інформації, але з іншого може забезпечити більш гнучке і точне управління. Для вирішення згаданого протиріччя в статті показано математичну залежність функціональної взаємодії із використанням алгоритму машинного навчання із підкріпленням, що дозволить здійснювати управління цільовими структурами вузлового та мережевого рівня за змішаним принципом – на початковому етапі безітеративно, а згодом ітеративно, оновлюючи політику штрафів та винагород.

Напрямок подальшого дослідження є формування імітаційної моделі наземно-повітряної комунікаційної мережі визначеного кількісного і якісного складу із використанням різних модифікацій алгоритмів машинного навчання із підкріпленням.

#### Список бібліографічного опису

1. Mojseenko O. V. Метод розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації комп'ютерної мережі. *METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL*. 2018. № 2(41). С. 62–68. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2\(41\)-62-68](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2(41)-62-68) (дата звернення: 20.03.2024).
2. Будур І. М., Бойко С. А. Мультиагентна модель системи підтримки прийняття рішення по управлінню розподіленими об'єктами. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 3(63), С. 54–61. URL: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.08> (дата звернення: 20.03.2024).
3. Романиук В. А., Степаненко Є. О. Модель прийняття рішень по управлінню повітряною мережею. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2019. № 3. С. 84–95.
4. Беляков Р., Фесенко О. Модель інтелектуального управління ресурсами наземної комунікаційної мережі класу MANET. *INFORMATION TECHNOLOGY AND SOCIETY*. 2023. № 3 (9). С. 6–14. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.3.1> (дата звернення: 20.03.2024).
5. Координація цільових функцій інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET / О. Я. Сова та ін. *Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ*. 2014. № 4. С. 31–40.
6. Сова О. Я., Міночкін Д. А., Ошурко В. М. Ієрархічна модель взаємодії інтелектуальних агентів у системах управління мобільними радіомережами класу MANET. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»*. 2015. С. 15–17.
7. Bieliakov R. Проблема інтеграції повітряної мережі класу FANET в мобільну комунікаційну мережу спеціального призначення. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 2023. № 53. С. 263–276. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-40> (дата звернення: 20.03.2024).
8. The development of method for increasing the decision making efficiency in organizational and technical systems / O. Lytvynenko et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 6, no. 4 (126). P. 23–31. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.293675> (date of access: 20.03.2024).
9. Development of a solution search method using an improved locust swarm algorithm / V. Tyurin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5, no. 4 (125). P. 25–33. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287316> (date of access: 20.03.2024).
10. Катренко А. В., Савка І. В. Механізми координації у складних ієрархічних системах. *Видавництво Львівської політехніки*. 2008. № 1. С. 156–166.
11. Bieliakov R., Fesenko O. Модель мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального призначення. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 2023. № 51. С. 130–138. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17> (дата звернення: 20.03.2024).

#### References

1. Mojseenko, O. V. (2018). Metod rozv'iazku zadachi bahatokryterialnoi optymizatsii kompiuternoi merezhi. *Methods and Devices of Quality Control*, (2(41)), 62–68. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2\(41\)-62-68](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2(41)-62-68)
2. Budur, I. M., & Boiko, S. A. (2020). Multyahentna model systemy pidtrymky pryiniattia rishennia po upravlinniu rozpodilenyi ob'ektamy. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, (3(63)), 54–61. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.08>
3. Romaniuk, V. A., & Stepanenko, Ye. O. (2019). Model pryiniattia rishen po upravlinniu povitrianoi merezheiu. *Zbirnyk naukovykh prats VITI*, (3), 84–95.
4. Bieliakov, R., & Fesenko, O. (2023). Model intelektualnoho upravlinnia resursamy nazemnoi komunikatsiinoi merezhi klasu manet. *Information Technology and Society*, (3 (9)), 6–14. <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.3.1>
5. Sova, O. Ya., Minochkin, D. A., & Oshurko, V. M. (2015). Iierarkhichna model vzaiedodii intelektualnykh ahentiv u systemakh upravlinnia mobilnymy radiomerezhamy klasu manet. *Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii «PERSPEKTYVY TELEKOMUNIKATsII»*, 15–17.
6. Sova, O. Ya., Romaniuk, V. A., Stempkovska, Ya. A., & Symonenko, O. A. (2014). Koordynatsiia tsilovykh funksii intelektualnykh system upravlinnia taktychnymy radiomerezhamy klasu manet. *Zbirnyk naukovykh prats VITI DUT*, (4), 31–40.
7. Bieliakov, R. (2023). Problema intehratsii povitrianoi merezhi klasu FANET v mobilnu komunikatsiinu merezhu spetsialnoho pryznachennia. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (53), 263–276. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-40>

8. Lytvynenko, O., Bieliakov, R., Vakulenko, Y., Hrinkov, V., Pokhodenko, B., Boiko, S., Kanishov, V., Drozdyk, Y., Kovtun, Y., & Leinyk, D. (2023). The development of method for increasing the decision making efficiency in organizational and technical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4 (126)), 23–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.293675>
9. Tyurin, V., Bieliakov, R., Odarushchenko, E., Yashchenok, V., Shaposhnikova, O., Lyashenko, A., Stanovskyi, O., Melnyk, B., Sus, S., & Dvorskyi, M. (2023). Development of a solution search method using an improved locust swarm algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(4 (125)), 25–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287316>
10. Katrenko, A. V., & Savka, I. V. (2008). Mekhanizmy koordynatsii u skladnykh iierarkhichnykh systemakh. *Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki*, (1), 156–166.
11. Bieliakov, R., & Fesenko, O. (2023). Model mobilnosti nazemnoi komunikatsiinoi merezhi spetsialnoho pryznachennia. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (51), 130–138. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17>