

Р. О. БЕЛЯКОВ

кандидат технічних наук, доцент,
докторант науково-організаційного відділу
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації
імені Героїв Крут
ORCID: 0000-0001-9882-3088

О. Д. ФЕСЕНКО

доктор філософії,
доцент кафедри спеціальних інформаційних систем
та робототехнічних комплексів
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації
імені Героїв Крут
ORCID: 0000-0002-2114-5327

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНОЮ МЕРЕЖЕЮ MANET І FANET КЛАСІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У даній роботі детально розглянуто особливості забезпечення принципів управління сучасними мобільними комунікаційними мережами спеціального призначення класу MANET-FANET. Було проаналізовано ряд наукових праць що розкривають суть функціонування інтелектуальних систем управління. Було підкреслено, що основний інтерес дослідження процесу управління наземними мережами викликано рядом протиріч та проблем інтеграції повітряних комунікаційних мереж та ресурсними обмеженнями під час функціонування наземних мобільних комунікаційних мереж в умовах апріорної невизначеності – динамічної топології, тобто в умовах, коли фізичні носії комунікаційного обладнання рухаються із змінною швидкістю обумовленою змінами рельєфу місцевості та наявністю перешкод, різних технічних характеристик мобільних користувачів, моделями шумових характеристик та завад різного роду.

Автори акцентують увагу, що існуючий науково-методологічний апарат не дозволяє описати процес міжрівневої взаємодії наземної та повітряної компоненти сучасних мобільних комунікаційних мереж для управління в реальному часі.

Наукова новизна запропонованої моделі обумовлена використанням математичних співвідношень алгоритму машинного навчання, що враховує фізичні властивості середовища функціонування комунікаційних вузлів завдяки нейронним мережам кожної з цільових функцій, які є основою для отримання бази знань починаючи з етапу планування.

В статті підкреслюється, що отримання бази статистичних даних на етапі планування з використанням набору адекватних моделей функціонування наземно-повітряною комунікаційною мережею (НПМ), дозволить виявити закономірності поведінкових моделей вузлових елементів для досягнення визначених користувальницьких або мережесвих цільових функцій. Що забезпечить виграш у часі пошуку оптимального рішення управління НПМ.

Ключові слова: MANET, FANET, комунікаційна мережа, процес управління, база знань, нейронна мережа, машинне навчання, метрики, прогнозування, оптимізація.

R. O. BIELIAKOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Doctoral Student at the Scientific and Organizational Department
Heroes of Kruty Military Institute of Telecommunications
and Information Technologies
ORCID: 0000-0001-9882-3088

O. D. FESENKO

Associate Professor at the Department of Special Information Systems
and Robotic Complexes
Heroes of Kruty Military Institute of Telecommunications
and Information Technologies
ORCID: 0000-0002-2114-5327

CONCEPTUAL MODEL OF GROUND-AIR NETWORK MANAGEMENT MANET AND FANET CLASSES OF SPECIAL PURPOSE

This paper examines in detail the features of ensuring the management principles of modern special purpose mobile communication networks of the MANET-FANET class. A number of scientific works revealing the essence of the functioning of intelligent control systems were analyzed. It was emphasized that the main interest in the research of the ground network

management process is caused by a number of contradictions and problems of the integration of aerial communication networks and resource limitations during the operation of ground mobile communication networks in conditions of a priori uncertainty – dynamic topology, i.e. in conditions when the physical carriers of communication equipment move with a variable speed due to changes in terrain and the presence of obstacles, various technical characteristics of mobile users, models of noise characteristics and various types of interference.

The authors emphasize that the existing scientific and methodological apparatus does not allow describing the process of interlevel interaction of ground and air components of modern mobile communication networks for real-time management.

The scientific novelty of the proposed model is due to the use of mathematical ratios of the machine learning algorithm, which takes into account the physical properties of the functioning environment of communication nodes thanks to the neural networks of each of the target functions, which are the basis for obtaining a knowledge base starting from the planning stage.

The article emphasizes that obtaining a database of statistical data at the planning stage using a set of adequate models of functioning of the ground-air communication network (GAC) will allow revealing patterns of behavioral models of nodal elements to achieve defined user or network target functions. That will ensure a gain in the search for the optimal GAC management solution.

Key words: MANET, FANET, communication network, management process, knowledge base, neural network, machine learning, metrics, forecasting, optimization.

Постановка проблеми

Особливості принципів забезпечення інтелектуального управління в комунікаційних мережах визначають існуючу концепцію побудови інтелектуальної системи управління мобільними радіомережами, а саме:

– *ситуаційного управління*, тобто можливість підтримки функціонування складних динамічних об'єктів в умовах не повної, або недостатньо формалізованої моделі середовища;

– *ієрархічності* – характеризується декомпозицією початкових цілей і задач управління на рекурсивну послідовність вкладених складових, для наземної та повітряної компоненти комунікаційної мережі;

– *самоорганізації та самонавчання* – полягає у необхідності існування засобів оцінки поточного стану процесів управління, засобів побудови математичних моделей об'єкта управління та зовнішнього середовища, засобів формування правил поведінки (формування управляючих рішень), та засобів поповнення бази знань новими правилами на основі статистичних даних, отриманих в процесі функціонування мобільної радіомережі;

– *управління в реальному часі* – полягає в можливості інтелектуальної системи управління формувати (модифікувати) цілі управління мережею (вузлами) у реальному масштабі часу, залежно від ситуації, що склалася;

– *принцип функціональності* – полягає в декомпозиції системи управління мобільною радіомережею на відносно незалежні групи за цільовими функціями управління;

– *принцип розподіленої та координованої взаємодії*, тобто, управління в мобільних радіомережах засноване на тому, що кожна з підсистем вирішує деяку свою часткову задачу в умовах відносної самостійності. Рішення, що виробляються всіма підсистемами будь-якого рівня ієрархії, координуються підсистемою вищестоящего рівня, якій вони підпорядковані;

– *принцип оптимальності* – для досягнення цілей управління в умовах протиріччя між обсягами службової та корисної інформації;

– *принцип автоматизації* – з метою підвищення оперативності управління, обґрунтованості прийнятих рішень і зняття обмежень, обумовлених недосконалістю психофізіологічних можливостей людини;

– *використання методів обробки знань* як основного способу боротьби із невизначеністю функціонування в умовах невизначеності, тощо [1; 2].

Однак, описана в статті концептуальна модель потребує удосконалення із ряду об'єктивних причин: по-перше, необхідність перерозподілу та синтезу цільових функцій процесу управління за часовими показниками для кожного із етапів управління мережею (планування, розгортання, оперативного управління), що гіпотетично призведе до зменшення обсягів службового трафіку, та зменшить час прийняття управлінських рішень; по-друге, виникає завдання декомпозиції задач управління з урахуванням особливостей на кожному із рівнів – повітряної та наземної компоненти мобільної комунікаційної мережі; по-третє, виникає необхідність опису процесу синтезу цільових функцій управління інтелектуальних систем управління НПМ (мережі мобільних користувачів та мобільних базових станцій, та повітряної комунікаційної мережі) із урахуванням ресурсних обмежень та відсутньої апріорної та повної інформації про стан мобільної НПМ.

Виходячи із вище зазначеного, необхідно встановити етапність отримання інформації для формування навчальної вибірки інтелектуальних агентів вузлів МКМ; необхідно визначити порядок взаємодії двох підмереж, тобто комунікаційних вузлів наземної мережі класу MANET, та повітряної – класу FANET; та визначити способи представлення процесу взаємодії та підходи до вибору методів оптимізації процесу формування управлінських рішень.

Отже, дана стаття присвячена аналізу існуючої концептуальної моделі інтелектуального управління мобільною радіомережею, та її удосконаленню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відповідно до концепції [3], задачі управління мобільними радіомережами класу MANET за етапами діляться на задачі планування, розгортання і оперативного управління. На перших двох етапах задачі реалізуються з використанням організаційно-технічних заходів.

Однак, проведений аналіз відображений в статтях [5–8] показав, що існуючий науково-методологічний апарат не дозволяє описати процес міждієвності взаємодії наземної та повітряної компоненти сучасних мобільних комунікаційних мереж. Так, процеси оперативного управління наземної компоненти мобільної комунікаційної мережі будуть корелювати із задачами управління повітряною комунікаційною мережею, крім того, встановлено, що частину задач із управління варто відносити до етапів планування і розгортання, що може забезпечити порівняно кращу ефективність з точки зору забезпечення принципів побудови інтелектуальних систем управління.

Формулювання мети дослідження

Розвиток теорії і практики застосування технологій машинного навчання та нейронних мереж вимагає оновлення концептуальних засад побудови інтелектуальних систем управління. Тобто, виконання мережевих цільових функцій НППМ в загальному випадку розглядається як ресурсне забезпечення для виконання користувальницьких цільових функцій, що є безумовним пріоритетом з точки зору своєчасної доставки корисної інформації адресатам із заданою якістю.

Тому, **метою роботи** є розробка концептуальної моделі управління наземно-повітряною мережею MANET і FANET класів спеціального призначення.

Наукова новизна. Вперше формалізовано процес інтелектуального управління наземно-повітряною комунікаційною мережею класів MANET-FANET та здійснено перерозподіл завдань управління за етапами функціонування НППМ, що не суперечить класичним принципам побудови існуючих систем управління мобільних радіомереж.

Викладення основного матеріалу дослідження

Відповідно до існуючої концептуальної моделі ієрархічної побудови інтелектуальної системи управління мобільною радіомережею [1], МР, як складна динамічна система, складається з низки підпорядкованих підсистем – центру управління радіомережею, мобільних базових станцій і вузлів. Також в даній статті визначено, що на вузловому рівні вирішуються завдання управління окремими радіотерміналами або інформаційними напрямками з урахуванням виробленої на мережевому рівні стратегії поведінки мобільних вузлів та радіомережі в цілому. Взаємодія з мережевим рівнем здійснюється метаагентами вузлового рівня, які, в свою чергу, визначають «поведінку» вузлових інтелектуальних агентів (ІА), а також здійснюють координацію дій агентів різних вузлових систем управління з метою вузлової (користувальницької) оптимізації, а формування управляючих рішень здійснюється з урахуванням специфіки функціонування кожного вузла.

Проте, система інтелектуального управління комунікаційного вузла, як елемента нижнього рівня, фактично, навчається «з нуля» будучи в стохастичних умовах (розміщення вузлів, їх моделі мобільності, завадова обстановка, наявність сигналів глобальної навігаційної супутникової системи – для координатних методів маршрутизації та при наявності повітряної комунікаційної підмережі). Таким чином, корекція або оновлення мети функціонування радіомережі в цілому відбувається за рахунок координації роботи агентів мережевого рівня через метаагента (рис. 1), який відповідає за роботу інтелектуальної системи управління мережею.

Так як крім планових змін стану НППМ, існує значна початкова невизначеність, а також істотна невизначеність середовища, то ІА повинні забезпечувати адаптивне управління радіомережі. У цьому випадку адаптація виступає як засіб управління радіомережею за відсутності її точної моделі і в таких умовах дозволяє оптимізувати характеристики МР.

Така організація взаємодії вузлів МР з використанням ІА, взаємодіючих між собою, дозволить вирішити загальну задачу управління МР розподіленим чином. Згідно існуючої концепції [1] – процес навчання відбувається за схемою показаною на рисунку XX, де на етапі оперативного управління, тобто після організаційних заходів та розгортання, в процесі ітеративного обміну інформацією формується база знань, далі, відповідно до нейронечітких алгоритмів за сукупністю мета правил, які в загальному визначають цільові функції, за функцією приналежності визначається субоптимальне рішення поведінки певного мобільного комунікаційного вузла або їх сукупності (для реалізації цільових функцій для зони, маршруту, напрямку). Тобто, субоптимальне рішення управління є результатом задачі лінійного програмування, що спрямовані на максимізацію чи мінімізацію лінійної функції при виконанні обмежень у вигляді лінійних рівнянь і нерівностей через складність умов та обмежень реального середовища функціонування елементів НППМ.

Така схема до моменту накопичення бази знань, для роботи в реальному часі вимагає дуже великих ресурсних витрат у зв'язку із великою кількістю ітерацій до моменту отримання заданих значень якості інформаційного обміну відповідно до вимог користувачів.

Так, в статті [6] показано, що при інтелектуальному управлінні процесом маршрутизації на основі нейромережевого алгоритму екстремального машинного навчання AOS-ELM та FOS-ELM проти Fuzzy (нейронечіткий алгоритм), отримано суттєвий вигрaш у часових показниках та якості обміну.



Рис. 1. Модель ієрархічної побудови інтелектуальної системи управління МР [1]

Таким чином, модель ієрархічної побудови інтелектуальної системи управління мобільної радіомережі (рис. 1) – взято за основу, однак, в силу наявності нових підходів в теорії машинного навчання та нейромереж, в статті пропонується модель системи управління наземно-повітряної комунікаційної мережі вузловими і мережевими ресурсами побудувати за загальною структурою, зображеною на рисунку 2.

В статті пропонується збір статистичних даних, що відображають множину станів мобільних користувачів НІМ, набутих в результаті реакції на дії (множину відповідних керуючих дій для забезпечення користувальницьких цілей управління) в середовищі функціонування здійснювати ще на етапі планування. Таким чином, середовище функціонування наземної та повітряної під мережі буде визначатися моделлю мобільності [1], технічними характеристиками мобільних користувачів, моделями шумових характеристик та завд різного роду, навантаженням, методами маршрутизації, методами управління інформаційним обміном на фізичному рівні тощо.

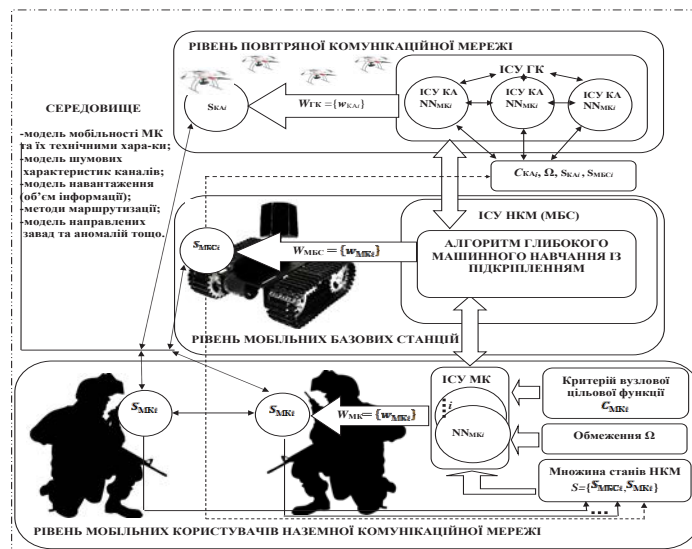


Рис. 2. Загальна структура моделі системи управління наземно-повітряної комунікаційної мережі вузловими і мережевими ресурсами

Отже, отримавши набір статистичних даних на етапі планування з використанням набору адекватних моделей функціонування НІМ, наступним етапом є виявлення закономірностей поведінкових моделей вузлових елементів для досягнення визначених користувальницьких або мережевих цільових функцій. Щоб забезпечити вигрaш у часі для прийняття оптимального рішення уже із використанням алгоритму машинного навчання, тобто – «до навчання = оперативне управління». Таким чином, інтелектуальна система управління (ІСУ) мобільних користувачів, системно

об'єднує підсистему поповнення бази знань про процеси реалізації користувальницьких цільових функцій, що є основою для вибору оптимального управляючого впливу $W(U_{t+1})$ шляхом прогнозування стану об'єкту управління (МК) із підсистемою реалізації рішень на вузловому або мережевому рівні. Кожна із нейронних мереж $NN_{МК}$ ІСУ МК реалізує виконання однієї або декількох взаємозалежних користувальницьких цільових функцій (рис. 2) [10].

В загальному випадку, кожна із підсистем управління НПМ (рис. 3) забезпечує виконання взаємопов'язаних цільових функцій для виконання однойменних із підсистемами задач, однак з точки зору функціональної взаємодії, етапності циклу управління існуючої ІСУ та запропонованої є відмінності, що визначають наукову новизну запропонованої моделі.



Рис. 3. Система управління вузлами НПМ

За етапами згідно існуючої концепції задачі управління мобільними радіомережами діляться на задачі планування, розгортання та оперативного управління; задачі планування та розгортання – в більшості випадків реалізуються організаційними способами, задачі оперативного управління вирішуються змішаним способом (централізовано/децентралізовано).

На рисунку 4 – перераховано основні заходи циклу управління НПМ на часовій осі з урахуванням наукової новизни запропонованих рішень (верхня частина рис. 4).

Із рисунку 4 – при однаковому часі розгортання $T_{розг}$, при реалізації процесу управління за існуючою концепцією – системі управління необхідний ще деякий час $T_{навч}$ для навчання до настання фактичного часу етапу оперативного управління (функціонування) $T_{ф}$, формування бази знань, та мета правил, для досягнення оптимальних управляючих рішень $W^*(U_{Тф})$.



Рис. 4. Цикл управління НПМ спеціального призначення

* – етапи існуючої концептуальної моделі

Нижче показана загальна структурна схема процесу збору та обробки інформації для формування керуючих рішень, та навчання на етапі оперативного управління інтелектуальних агентів з використанням моделі ієрархічної побудови інтелектуальної системи управління мобільною радіомережею – рисунок 5 [1], та запропонованої в статті – на рисунку 6.

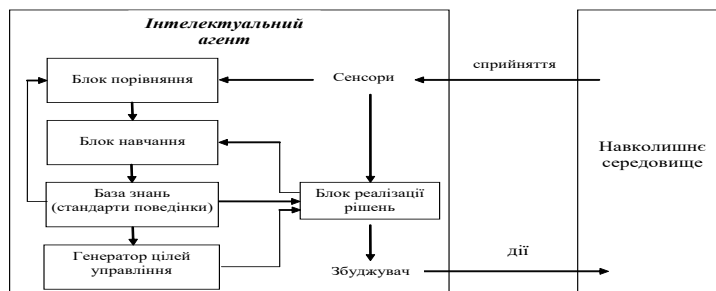


Рис. 5. Загальна блок-схема формування управляючих рішень інтелектуальним агентом [1]

Алгоритми глибокого навчання з підкріпленням, такі як Deep Q-Network (DQN), використовують політики на основі взаємодії агента з середовищем для оновлення параметрів (рис. 6).



Рис. 6. Блок-схема формування управляючих рішень інтелектуальним агентом на основі алгоритму Q-навчання з підкріпленням

В контексті Q-навчання агента, з метою реалізації цільових функцій управління НПМ для виконання вимог із якості інформаційного обміну, маємо:

$$Q(s_t, U) = R(s_t, U) + \gamma \cdot \sum_{s_{t+1}} P(s_{t+1}|s_t, U) \max_{U_{t+1}} Q(s_{t+1}, U_{t+1}), \quad (1)$$

де $R(s_t, U)$ – це винагорода, отримана після виконання дії U в стані s_t , $P(s_{t+1}|s_t, U)$ – це імовірність переходу в стан s_{t+1} після виконання дії U в стані s_t , $\max_{U_{t+1}} Q(s_{t+1}, U_{t+1})$ – це максимальна Q-цінність для наступного стану s_{t+1} , що відображає найкращу дію U_{t+1} , яку можна виконати в цьому стані.

Висновки

В результаті дослідження встановлено, що існуюча концептуальна модель управління мобільною комунікаційною мережею не дозволяє вирішити існуюче протиріччя між обсягами службової та корисної інформації і забезпечити функціонування в реальному часі.

В статті запропоновано аналітичну концептуальну модель управління НПМ, що є основою для побудови сучасних комунікаційних мереж. Здійснено загальний опис етапів управління НКМ з урахуванням впровадження технологій машинного навчання та нейромережевих алгоритмів. Крім того, в статті показано дайджест наукових статей авторів із тематики дослідження.

Напрямок подальших досліджень є моделювання НКМ для визначених спеціальних підрозділів, дослідження можливості застосування запропонованих рішень при масштабуванні та впровадження на рівні технічних систем наземної та повітряної підмереж.

Список використаної літератури

1. Методологія синтезу інтелектуальних систем управління вузлами перспективних мобільних радіомереж з динамічною топологією / О. Я. Сова та ін. *Збірник наукових праць ХУПТ*. 2012. № 4(33). С. 112–116. URL: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2012/7_2012.pdf (date of access: 17.02.2024).

2. Романюк В. А. Концепція ієрархічної побудови інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET. *НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології* : Збірник тез доповідей Міжнар. кримська конф. КриМиКо. Севастополь, 2012. С. 265.
3. Міночкін А. І., Романюк В. А. Концепція управління мобільною компонентою мереж зв'язку військового призначення. *Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації НТУУ "КПІ"*. 2005. № 3. С. 51–60.
4. Сова О. Я., Романюк В. А., Жук П. В. Концепція ієрархічної побудови інтелектуальних систем управління мобільними радіомережами військового призначення. *Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації НТУУ "КПІ"*. 2010. № 2. С. 121–130.
5. 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: 26.02.2024).
6. Bieliakov R. O., Fesenko O. D. Improved model of intelligent management of node resources of the terrestrial communication network of the MANET class. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2023. No. 5. P. 93–98. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/16> (date of access: 26.02.2024).
7. 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: 26.02.2024).
8. Romaniuk V. A., Bieliakov R. O. Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 2023. No. 50. P. 125–130. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19> (date of access: 26.02.2024).
9. Беляков Р. О., Фесенко О. Д. Оцінка ефективності протоколів маршрутизації OLSR, AODV, DSDV, MAODV спеціальних мереж класу MANET. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 3(86). С. 75–82. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.3.10> (дата звернення: 26.02.2024).
10. Беляков Р. О., Фесенко О. Д. 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/maur.it.2023.3.1> (дата звернення: 26.02.2024).

References

1. Sova, O. Ya., Romaniuk, V. A., Zhuk, P. V. & Umanets, Ya. L. (2012). Metodolohiia syntezy intelektualnykh system upravlinnia vuzlamy perspektyvnykh mobilnykh radiomerezh z dynamichnoiu topolohiieiu [Methodology for the synthesis of intelligent control systems for nodes of promising mobile radio networks with dynamic topology] *Collection of Kharkiv Air Force University*, (4(33)), 112–116 [in Ukrainian].
2. Romaniuk, V. A. (2012). Kontsepsiia iierarkhichnoi pobudovy intelektualnykh system upravlinnia taktychnymy radiomerezhamy klasu MANET [The concept of hierarchical construction of intelligent management systems for tactical radio networks of the MANET class]. *Microwave technology and telecommunication technologies* : Collection of abstracts of reports of the International Crimean Conf. CriMiCo. Sevastopol, 2012. P. 265 [in Ukrainian].
3. Minochkin, A. I., & Romaniuk, V. A. (2005). Kontsepsiia upravlinnia mobilnoiu komponentoiu merezh zviazku viiskovoho pryznachennia [The concept of managing the mobile component of military communication networks]. *Collection of scientific works of the Military Institute of Telecommunications and Informatization of NTUU "KPI"*, (3), 51–60.
4. Sova, O. Ya., Romaniuk, V. A., & Zhuk, P. V. (2010). Kontsepsiia iierarkhichnoi pobudovy intelektualnykh system upravlinnia mobilnymy radiomerezhamy viiskovoho pryznachennia [The concept of hierarchical construction of intelligent control systems for mobile radio networks for military purposes]. *Collection of scientific works of the Military Institute of Telecommunications and Informatization of NTUU "KPI"*, (2), 121–130 [in Ukrainian].
5. Bieliakov, R. (2023). Problema intehratsii povitrianoi merezhi klasu FANET v mobilnu komunikatsiinu merezhu spetsialnogo pryznachennia [The problem of integrating the FANET class air network into a special purpose mobile communication network]. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (53), 263–276. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-40> [in Ukrainian].
6. Bieliakov, R. O., & Fesenko, O. D. (2023). Improved model of intelligent management of node resources of the terrestrial communication network of the MANET class. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, (5), 93–98. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/16>
7. Bieliakov, R., & Fesenko, O. (2023). Model mobilnosti nazemnoi komunikatsiinoi merezhi spetsialnogo pryznachennia [Mobility model of a special purpose terrestrial communication network]. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*, 51, 130–138 [in Ukrainian].

8. Romaniuk, V. A., & Bieliakov, R. O. (2023). Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (50), 125–130. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19>
9. Bieliakov, R. O., & Fesenko, O. D. (2023). Otsinka efektyvnosti protokoliv marshrutyzatsii OLSR, AODV, DSDV, MAODV spetsialnykh merezh klasu MANET [Evaluation of the efficiency OLSR, AODV, DSDV, MAODV routing protocols in special MANET class networks]. *Bulletin of the Kherson National Technical University*. (3(86)), 75–82. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.3.10> [in Ukrainian].
10. Bieliakov, R. O., & Fesenko, O. D. (2023). Model intelektualnoho upravlinnia resursamy nazemnoi komunikatsiinoi merezhi klasu MANET [A model of intelligent management of resources of the terrestrial communication network of the MANET class]. *Information Technology and Society*, (3 (9)), 6–14. <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.3.1> [in Ukrainian].