

УДК 621.396:004.89

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.3.1>

Роберт БЄЛЯКОВ

кандидат технічних наук, доцент, докторант науково-організаційного відділу Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, вул. Князів Острозьких 45/1, Київ, Україна, індекс 01011 (france417@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-9882-3088

Олексій ФЕСЕНКО

Викладач кафедри технічного та метрологічного забезпечення факультету інформаційних технологій Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, вул. Князів Острозьких 45/1, Київ, Україна, індекс 01011 (rocimean123@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-2114-5327

Robert BIELIAKOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student Of The Scientific And Organizational Department of the Military Institute of Telecommunications and Information technologies named after Heroes of Kruty, Knyaziv Ostrozkih str. 45/1, Kyiv, Ukraine, postal code 01011 (france417@gmail.com)

Oleksii FESENKO

Lecturer at the Department of Technical and Metrological Support of the Faculty of Information Technologies of the Military Institute of Telecommunications and Information technologies named after Heroes of Kruty, Knyaziv Ostrozkih str. 45/1, Kyiv, Ukraine, postal code 01011 (rocimean123@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Бєляков, Р., Фесенко, О. (2023). Модель інтелектуального управління ресурсами наземної комунікаційної мережі класу MANET. *Інформаційні технології та суспільство*, 3, 6–14. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.3.1>

Bibliographic description of the article: Bieliakov, R., Fesenko, O. (2023). Model intelektualnoho upravlinnia resursami nazemnoi komunikatsiinoi merezhi klasu MANET [A model of intelligent resource management of class MANET terrestrial communication network]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 3, 6–14. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.3.1>

**МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ
НАЗЕМНОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ КЛАСУ MANET**

Анотація. Стаття 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. Наукова новизна розробленої математичної моделі полягає у впровадженні алгоритмів машинного навчання з підкріпленням для управління процесом формування управляючих рішень на мережевому рівні, та сукупності нейромереж для забезпечення вимог щодо якості інформаційного обміну на вузловому рівні (реалізація користувальницьких цілей). Процес навчання нейромереж включає використання нової моделі мобільності, що враховує фізичні параметри вузлів мережі, а в сукупності із метриками радіозв'язності та метриками маршрутизації відповідно до вибраного протоколу забезпечується адаптація до змін у мережі в реальному часі. Крім того, використання роботизованих платформ – мобільних базових станцій може підвищити гнучкість та адаптивність мережі.

Використання дворівневої інтелектуальної системи управління дозволяє розділити процес на два етапи. На першому – пропонується застосовувати нейромережі для оптимізації окремих цільових функцій на вузловому рівні. На другому - використання алгоритму Q-навчання з підкріпленням для адаптації до змін у середовищі з використанням прогнозу винагороди за максимальний виграш у реалізації цільових функцій управління, за рахунок представлення процесу управління ресурсом як Марківський процес.

Використання такого підходу може забезпечити ефективне управління мережею, адаптуючись до змін у середовищі та враховуючи різні цільові функції.

Ключові слова: комунікаційна мережа, MANET, система інтелектуального управління, нейромережі, машинне навчання із підкріпленням, Марківський процес, прогнозування.

A MODEL OF INTELLIGENT RESOURCE MANAGEMENT OF CLASS MANET TERRESTRIAL COMMUNICATION NETWORK

Abstract. The article is devoted to the development of a model of intelligent resource management of the ground MANET class communication network. Management of MANET networks is a difficult task due to their dynamic nature, high mobility of nodes, limited resources: battery power, technical characteristics of communication devices, protocols of different levels of the OSI model, and the need to implement management functions at the node and network level in the absence of centralized control. The scientific novelty of the developed mathematical model consists in the introduction of machine learning algorithms with reinforcement for managing the process of forming control decisions at the network level, and a set of neural networks to ensure the requirements for the quality of information exchange at the node level (implementation of user goals). The learning process of neural networks includes the use of a new mobility model that takes into account the physical parameters of network nodes, and in combination with radio connectivity metrics and routing metrics according to the selected protocol, adaptation to changes in the network is ensured in real time. In addition, the use of robotic platforms - mobile base stations can increase the flexibility and adaptability of the network.

The use of a two-level intelligent control system allows dividing the process into two stages. At the first stage, it is proposed to use Eurogrids to optimize individual target functions at the nodal level. On the second - the use of the Q-learning algorithm with reinforcement for adaptation to changes in the environment using the forecast of the reward for the maximum gain in the implementation of the target management functions, due to the representation of the resource management process as a Markov process.

Using this approach can provide effective network management by adapting to changes in the environment and considering different objective functions.

Key words: communication network, MANET, intelligent control system, neural networks, machine learning with reinforcement, Markov process, prediction.

Вступ. Наземна комунікаційна мережа MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) – мобільна радіомережа (МР) самоорганізованої архітектури, що передбачає відсутність фіксованої мережевої інфраструктури (базових станцій) та централізованого управління. В контексті сучасних безпроводових комунікацій побудова таких мереж спеціального призначення (IoT – Internet of Things, рятувальники, військові та ін.), окрім очевидних переваг гнучкої і швидко налаштовуваної мережі, пов'язана із вирішенням ряду проблемних наукових та прикладних питань.

Так, управління мережами MANET є складним завданням через їхню динамічну природу, високу мобільність вузлів, обмежені ресурси (наприклад, енергію батареї, технічні характеристики комунікаційних засобів, протоколи різних рівнів моделі OSI, тощо) та відсутність централізованого контролю. Це вимагає розробки моделей, методів, методик, алгоритмів для підвищення продуктивності мобільних комунікаційних мереж спеціального призначення.

Для моделювання процесу функціонування мереж такого класу необхідно [1]: по-перше правильно вибрати модель мобільності серед існуючих або розробити нову що з максимальною реалістичністю описує процес переміщення мобільних вузлів, і відповідатиме умовам функціонування; по-друге визначити сукупність вузлових, каналних, мережевих ресурсів цієї мережі, визначити протоколи маршрутизації задані технічно для вузлових елементів мережі. Проте, результат аналізу публікацій в даній предметній області показав, що на сьогоднішній день залишається актуальним завдання розробки нового або удосконалення існуючого науково-методичного апарату для інтелектуалізації процесу управління мережами класу MANET, для скорочення обсягів службової інформації, зменшення часу розгортання мереж, забезпечення процесів оперативного управління мережею в реальному часі тощо.

Тому, **метою роботи** є розробка математичної моделі інтелектуального управління наземною комунікаційною мережею спеціального призначення для забезпечення інформаційного обміну заданої якості з урахуванням наявних ресурсів (вузлових, каналних, мережевих).

Наукова новизна. Вперше побудовано наближену математичну модель інтелектуального управління наземною комунікаційною мережею спеціального призначення, описано особливості реалізації функцій управління (класу переміщення і комунікаційних) роботизованих мобільних базових станцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання Ad-Hoc мереж є предметом досліджень низки науковців, зокрема автори наукових праць [1-11]. В статті [10] обговорюється ієрархічний принцип управління, в якому головний вузол визначає параметри для підлеглих вузлів. Це може допомогти зменшити обсяг службової інформації, але в динамічних середовищах цей принцип може не забезпечувати оптимальну продуктивність мережі. Разом з тим, автори не зосереджуються на описі способів досягнення енергоефективності або акцентуванні динаміці топології, хоча вони згадують енергоефективність як один з можливих параметрів для оптимізації, вони не обговорюють специфічні стратегії або методи інтелектуального управління. В статті [8] показано підхід планування маршруту в телекомунікаційній мережі на основі нейронної мережі Хопфілда. Автори описують енергетичну функцію, яка використовується для визначення стану вузлів мережі, визначають рекомендації щодо вибору

початкових ваг нейронів та швидкості навчання. Переваги цього підходу полягають у здатності нейронних мереж до навчання та адаптації, що може бути корисним для планування маршрутів в складних або динамічних мережах, однак, до недоліків можна віднести вимоги до обчислювальних ресурсів [2], дослідження ефективності цього підходу в реальних системах динамічної топології. Крім того, нейронна мережа Хопфілда використовується як централізована система управління, приймає вхідні дані від кожного вузла і видає команди для керування, що може вплинути на часові показники функціонування в реальному часі. Разом з тим, було проаналізовано ряд наукових публікацій, присвячених інтелектуалізації систем управління мережами класу MANET шляхом застосування алгоритмів машинного навчання [6-9, 10]. Так, техніки машинного навчання використовуються для управління параметрами вузлів, в тому числі і для маршрутизації даних. Встановлено, що на ряду із перевагами відносно традиційних протоколів маршрутизації, машинне навчання вимагає великих обсягів вихідних даних, що може викликати суттєві ресурсні витрати.

Таким чином, оптимізація процесів інформаційного обміну в мобільних комунікаційних мережах шляхом удосконалення інтелектуальних систем управління є перспективним напрямком наукових досліджень.

Основна частина.

Вихідні умови функціонування мережі. Розглядається наземна комунікаційна мобільна радіомережа класу MANET розмірністю до сотні мобільних вузлів, зони переміщення яких попередньо задані відповідно до визначених рангів [1]. Мобільні вузли поділяються на дві основні підгрупи: підгрупа мобільних користувачів (переносні радіозасоби, возимі радіозасоби) та підгрупа мобільних базових станцій (наземна комунікаційна роботизована платформа). Наземна комунікаційна мережа не має прив'язки до будь-якої телекомунікаційної інфраструктури загального користування. Кожен мобільний комунікаційний вузол (МКВ) оснащений системою позиціонування, комунікаційним обладнанням, антенними пристроями, системою живлення та відповідною системою управління. Кожен мобільний комунікаційний вузол може бути представлений як об'єкт із системою управління представленою сукупністю агентів навчання із специфічними для кожної підгрупи (МК, МБС) цільовими функціями відповідно до двох основних класи задач: перший – комунікаційні $U_{\text{ком}}$; другий – переміщенням вузлів МБС

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

Управління комунікаційною складовою НМ в цілому включає наступні основні функції

$$U_{\text{ком}}(t) = \{U^{\text{топ}}(t), U^{\text{мар}}(t), U^{\text{ен}}(t), U^{\text{нав}}(t), U^{\text{бо}}(t), U^{\text{qos}}(t)\},$$

де $U^{\text{топ}}$ – *управління топологією* – в залежності від цільової функції управління здійснюється побудова топології мережі для отримання покриття і для отримання зв'язності;

$U^{\text{мар}}$ – *управління маршрутизацією* – здійснюється побудова та підтримка маршрутів передачі інформації заданої якості при виконанні вимог до їх функціонування (мінімізації службового трафіку, зменшення витрат енергії батарей, вибір протоколу маршрутизації тощо).

$U^{\text{ен}}$ – *управління енергоспоживанням* – метою управління є мінімізація витрат енергії вузлами мережі (максимізація “часу життя” мережі – часу роботи мережі до моменту відмови заданої кількості вузла через нульову ємність їх батарей, та/або прогноз “часу життя” КА з метою ротації за заздалегідь встановленим алгоритмом);

$U^{\text{нав}}$ – *управління навантаженням* – метою управління є зменшення або перерозподіл навантаження між окремими вузлами НІМ з урахуванням ресурсних обмежень;

$U^{\text{бо}}$ – *управління безпекою обслуговування при передачі інформації* – управління набором параметрів (методи шифрування, криптозахисту та інші);

$U^{\text{рад}}$ – *управління радіоресурсом* – управління вибором частот, сигнально-ковою конструкцією, методами модуляції тощо;

U^{qos} – *управління якістю обслуговування при передачі інформації* – управління набором параметрів (пропускна спроможність, затримка доставки пакетів, джиттер, BER – (Bit Error Rate) або PL (Packet Loss), для певного типу трафіку (мова, дані, відео).

В загальному вигляді задачі управління переміщенням МБС

$$U_{\text{пер}}(t) = \{U^{\text{МБС}}(t)\},$$

передбачає наступні функції

$$U_{\text{пер}}(t) = \{U^{\text{вп}}(t), U^{\text{нок}}(t), U^{\text{пук}}(t)\},$$

де U^{bn} – визначення положення МБС на місцевості для досягнення певних цільових функцій управління;

U^{pok} – визначення зони покриття мобільних користувачів (встановлення потужності передачі, управління діаграмою направленості антени, режимами роботи та ін.);

U^{pyx} – управління рухом (траєкторією та параметрами переміщення МБС).

Кількість і конкретні задачі оперативного управління визначаються характеристиками і умовами функціонування мережі, а також прийнятими технологічними рішеннями на етапі її проектування [1-3, 5].

Управління переміщенням мобільних користувачів не здійснюється, так як вони змінюють місце розташування разом із носіями відповідно до цільових завдань згідно штатно-посадових функціональних обов'язків. У процесі функціонування кожен комунікаційний вузол здійснює збір, обробку та формування управляючих впливів за рахунок інтелектуальної системи управління.

Мобільна базова станція за допомогою інтелектуальної системи управління формує оптимальні керуючі впливи із керування траєкторією переміщення з урахуванням перешкод, особливостей рельєфу та реалізує комунікаційні цільові функції відповідно до вимог інформаційного обміну мобільних користувачів (рис. 2).

Обмеження та вимоги:

– траєкторія переміщення мобільних користувачів формується в вигляді кортежу координат точок, що описується функцією переміщення вузлів певного рангу у визначеній зоні переміщення з урахуванням рельєфу місцевості та фізичних перешкод відповідно до моделі мобільності [1];

– інформація про параметри стану вузлів (координати розміщення, рівень енергії батарей, об'єм переданих пакетів, час затримки повідомлень) збирається при розгортанні мережі ТА, надалі інформація про стан вузлів оновлюється під час кожного сеансу інформаційного обміну;

– МБС та мобільні користувачі мають радіозасоби з однаковим MAC-протоколом, який дозволяє змінювати швидкість передачі даних в залежності від співвідношення сигнал/шум та регулювати потужність передачі (витрати енергії на передачу);

– обсяги оперативної пам'яті мобільних комунікаційних вузлів (МК та МБС), достатні для збору, обробки і формування управляючих рішень в режимі реального часу;

– значення енергії батареї МК та МБС достатні на час моделювання (процеси дозарядження засобів МК, ротації МБС не розглядались).

МК та МБС обладнані антенно-фідерними пристроями із круговою діаграмою направленості.

Таким чином, траєкторія переміщення МБС визначається за рахунок прогнозування координат її розміщення на основі зібраних даних переміщення мобільних користувачів при виконанні (реалізації) цільових функцій (ЦФ) управління відповідно до заданих вимог:

– мінімізація часу затримки передачі пакетів відповідно до вимог QoS передачі заданого типу трафіку

$$T_s^* \rightarrow \min T_s (T_s^* \leq T_s^{QoS}); \quad (2)$$

– мінімізація джиттера передачі пакетів

$$J^* \rightarrow \min J (J^* \leq J^{QoS}); \quad (3)$$

максимум пропускної здатності (каналу, маршруту, мережі)

$$S^* \rightarrow \max S (S^* \geq S^{QoS}); \quad (4)$$

– мінімізація коефіцієнту втрати переданих пакетів Packet Loss

$$PL^* \rightarrow \min PL (PL^* \leq PL^{QoS}) = \begin{cases} \min BER_{ij}, \\ \max SINR_{ij}, \end{cases} \quad i, j = 1, N_{МКБ} \quad (5)$$

– максимізація часу функціонування (вузла) мережі

$$T_{func} \rightarrow \max, \quad (6)$$

за рахунок оптимізації енергоефективності мобільних користувачів та мобільних базових станцій.

При обмеженнях Ω на:

– тип роботизованої платформи МБС; максимальну швидкість, характеристики прохідності (коефіцієнт маневреності), час автономної роботи – $v=[vmin, vmax]$; $Kman; tfunc_{МБС} \leq tfunc_{МБСmax}$;

– кількість МБС – $N_i^{МБС} \leq N_i^{МБСmax}$;

- початкову енергію батарей мобільних користувачів $e_i \leq e_{MKmax}$ і МБС $e_{МБС} \leq e_{МБСmax}$;
- дальність радіозв'язності МК-МБС – $d_i-МБС \leq d_{max}$;
- радіус площі зони радіопокриття МБС – $R_{min} \leq R \leq R_{max}$;

Необхідно: описати процес формування управляючих рішень для реалізації двох класів задач управління НКМ (задачі інформаційного обміну та переміщення).

Методологія дослідження. Було зроблено припущення що інтелектуальне управління цільовими функціями мобільних комунікаційних вузлів дозволить покращити продуктивність мережі, а визначена завчасно модель мобільності, дозволить прискорити процес розгортання і скоротити час навчання СУ мобільних вузлів.

В загальному випадку, управління мобільною комунікаційною мережею можна поділити на етапи: етап планування, розгортання та етап оперативного управління.

Етап планування включає, в основному, ряд організаційно-технічних заходів із визначення складу сил та засобів, вихідних даних умов функціонування тощо.

Етап розгортання в класичному розумінні включає збір інформації про середовище функціонування, наявні вузлові (комунікаційні) ресурси, аналіз цілей управління, розрахунок мережесих ресурсів для прогнозування можливості забезпечення задач із інформаційного обміну із заданим рівнем якості QoS, та обґрунтування організаційно-технічних рішень щодо корегування складу основних засобів для виконання завдань, попереднього налаштування і підготовки мережі тощо.

Етап оперативного управління включає процеси із підтримання реалізації вузлових та мережесих цільових функцій.

В [2] наведено класифікацію цілей управління мобільними радіомережами класу MANET, що поділяються на дві основні групи: перша – мережесі, друга – користувальницькі (рис. 1).



Рис. 1. Класифікація цілей управління МР

У [10] визначено, що критерії ЦФ можуть мати різну фізичну природу і частина з них потребує максимізації (пропускна спроможність та час функціонування МР), а частина – мінімізації (потужність передачі та час затримки передачі пакетів). Тобто, в один і той же момент часу ЦФ різних мобільних вузлів можуть суперечити одна-одній, що призводить до появи внутрішньосистемних конфліктів двох видів:

- *внутрішньорівневих* – виникають через несумісність користувальницьких цілей окремих вузлів у рамках заданої структури МР і обмежень;
- *міжрівневих* (між вузлом-координатором та підлеглими вузлами) – пов'язані з тим, що системна ЦФ, визначена вузлом-координатором, не збігається з ЦФ підлеглих вузлів.

Такі конфлікти викликають потребу постійної ситуаційної обізнаності про фактичний стан мобільних комунікаційних вузлів, що в умовах динамічного середовища, часто стохастичної природи, призводить до стрімкого збільшення службового трафіку мережі. Наприклад, у [10] задача зводилась до розробки методу координації цільових функцій, що фактично являє собою комбінацією ітеративних (на вузловому рівні) та безітеративних (на мережевому рівні) методів оптимізації.

В загальному випадку, таке рішення дійсно призводить до оптимізації використання ресурсів обох рівнів, але разом з тим має суттєвий недолік – обмеження на реалізацію вузлових цільових функцій вектором управляючих рішень вищестоящого вузлового елемента. Інакше кажучи, для деякої багаторівневої системи управління скоординоване управляюче рішення визначається як перетин множини дій та станів в заданих умовах (при дії обмежень на розмірність мережі, фізичні параметри вузлів та середовища тощо).

Концептуально наявність цього недоліку вказує на необхідність врахування етапу управління мережею, тобто «ітеративну частину» методу координації цільових функцій необхідно реалізувати на етапі проектування (розгортання) мережі.

Таким чином, пропонується модель системи управління наземної комунікаційної мережі вузловими і мережевими ресурсами побудувати за загальною структурою, зображеною на рисунку 2.

В процесі ітеративного обміну інформацією формується база знань шляхом збору статистичних даних, що відображають множину станів мобільних користувачів, набутих в результаті реакції на дії (множину відповідних керуючих дій для забезпечення користувальницьких цілей управління – рисунок 1) в середовищі функціонування. В свою чергу це середовище буде визначатися моделлю мобільності [1], технічними характеристиками мобільних користувачів, моделями шумових характеристик та завад різного роду, навантаження, методами маршрутизації тощо.

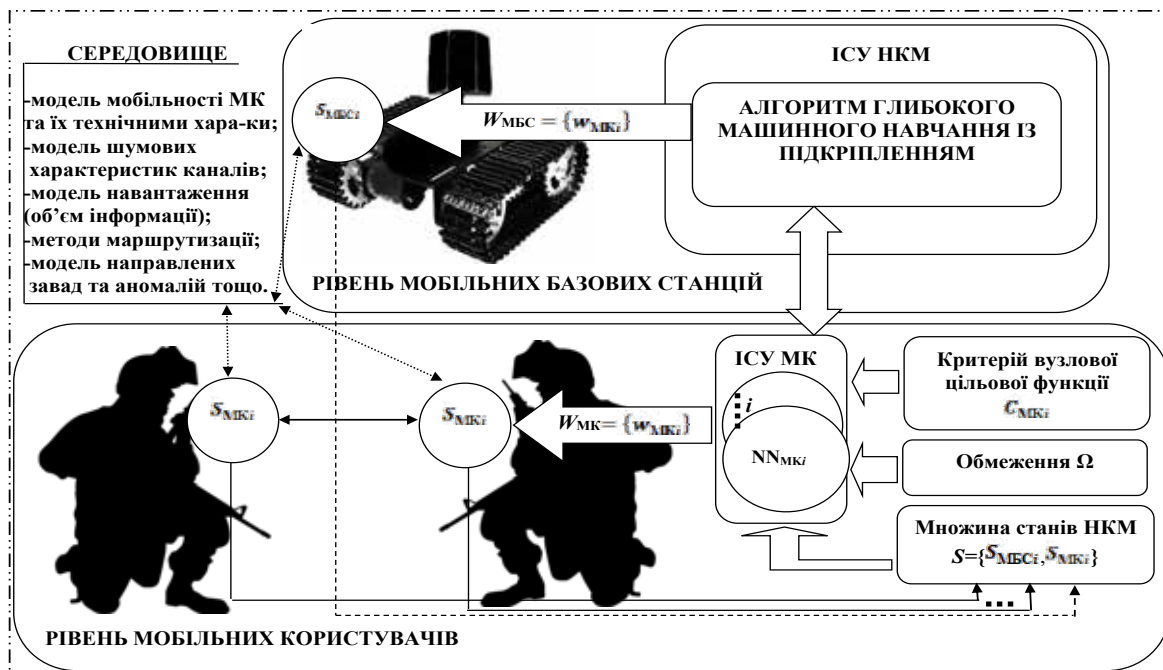


Рис. 2. Загальна структура моделі системи управління наземної комунікаційної мережі вузловими і мережевими ресурсами

Тобто, інтелектуальна система управління (ІСУ) мобільних користувачів, умовно кажучи, 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_{iMK} ІСУ МК реалізує виконання однієї або декількох взаємозалежних користувальницьких цільових функцій (таблиця 1), крім того, до таблиці винесено основні напрямки (способи) реалізації математичних співвідношень, вимоги QoS для передачі відповідно до типу трафіку.

Для вирішення поставленої задачі пропонується представити процес формування управляючих рішень для реалізації цільових функцій як Марківський процес (Markov decision process – MDP).

MDP визначається чотирма складовими: множиною станів S , множиною дій A , функцією переходу P , та функцією винагороди R :

1. *Множина станів S .* Кожен стан $S_i \in S$ може бути вектором, що складається з координат МБС та МК, пропускної здатності наземних комунікаційних вузлів, залишкової енергії кожного вузла в мережі, та інших метрик відповідно до протоколу маршрутизації.

2. Множина дій A . Фактично множиною дій є аргументи цільових функцій управління, тобто $U \in A$. І може включати можливі напрямки переміщення МБС, з метою забезпечення радіопокриття, пропускної здатності маршрутів, часу затримки доставки пакетів тощо.

3. Функція переходу P . Функція переходу $P(s'|s, U)$ визначає ймовірність переходу в стан s' після виконання дії U в стані s .

4. Функція винагороди R . Функція винагороди $R(s, U, s')$ визначає винагороду, отриману після виконання дії U в стані s і переходу в стан s' . В контексті управління мережею це збільшення загальної пропускної здатності мережі або зменшення загальної затримки маршрутів, збільшення часу «життя» вузлів тощо.

Таблиця 1

Перелік математичних моделей (функцій) для реалізації ЦФ

Критерій вузлової (МК) ЦФ ($C_{МК}$)	Математичні моделі (функції та рівняння)	Вимоги QoS передачі заданого типу трафіку		
		Відео передача	Голосова передача (VoIP)	Передача даних
Мінімізація часу затримки передачі пакетів (1)	Рівняння затримки передачі Рівняння затримки обробки Рівняння затримки маршрутизації Загальне рівняння затримки	до 150 ms	до 150 ms	може варіюватися: для більшості даних до 250 ms
Мінімізація джиттера передачі пакетів (2)	Рівняння джиттера Загальне рівняння затримки із урахуванням джиттера	до 30 ms	до 30 ms	для більшості даних до 50 ms
Максимум пропускної здатності (каналу, маршруту, мережі) (3)	Рівняння пропускної здатності (формула Шеннона) Модель каналу зв'язку Модель шуму Модель направлених завод	Висока: від 500 Kbps до 5 Mbps в залежності від якості (роздільна здатність, частота кадрів та ін.)	Нижча: приблизно 64 Kbps до 128 Kbps	Залежить від типу даних: може бути від низької до високої
Мінімізація коефіцієнту втрати переданих пакетів Packet Loss (4)	Рівняння втрати пакетів через помилки передачі Рівняння втрати пакетів через перевантаження Рівняння втрати пакетів через маршрутизацію Загальна втрата пакетів	до 1%	до 0.5%	Залежить від типу даних: для більшості даних до 1%
Максимізація часу функціонування вузла (мережі) (5)	Модель енергоспоживання комунікаційного вузла (мережі)	-	-	-

Метою агента є знаходження політики π , яка максимізує суму винагород, отриманих протягом часу навчання. Політика π визначає ймовірність вибору кожної дії U в кожному стані s . В контексті глибокого навчання з підкріпленням, політика π часто апроксимується нейронною мережею, параметри якої оновлюються під час процесу навчання.

Математично, метою агента є максимізація очікуваної суми винагород:

$$Q^{t+1} \leftarrow Q^t(s_t, a_t) + \alpha \cdot (r_t + \gamma \cdot \max_{a'} Q^{t+1}(s_{t+1}, a') - Q^t(s_t, a_t)) \tag{7}$$

де γ є фактором дисконтування, що визначає, наскільки агент «цінує» майбутні винагороди порівняно з нинішніми.

Алгоритми глибокого навчання з підкріпленням, такі як Deep Q-Network (DQN), використовують політики на основі взаємодії агента з середовищем для оновлення параметрів (рис. 3).

Так, в контексті Q-навчання (7) агента, з метою реалізації цільових функцій (1) для виконання вимог із якості інформаційного обміну (2-6), маємо:

$$Q(s_t, U) = R(s_t, U) + \gamma \cdot \sum_{s_{t+1}} P(s_{t+1} | s_t, U) \max_{U_{t+1}} Q(s_{t+1}, U_{t+1}), \tag{8}$$

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.

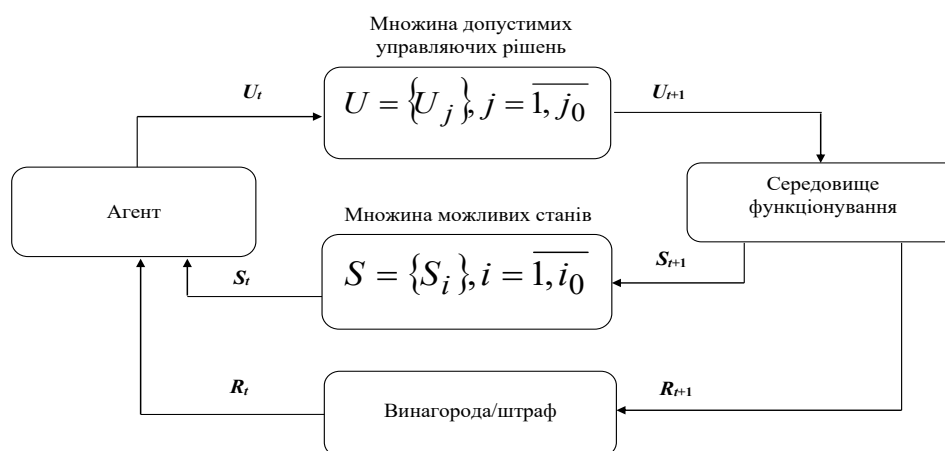


Рис. 3. Загальний процес алгоритму Q-навчання з підкріпленням

Висновки. Використання дворівневої інтелектуальної системи управління дозволяє розділити процес на два етапи: планування та виконання, що може допомогти в управлінні складністю задачі.

На першому рівні, ви використовуєте нейромережі для оптимізації окремих цільових функцій. Це дозволить використовувати нейромережі для моделювання складних функцій і знаходження оптимальних рішень на вузловому рівні.

На другому рівні, використання алгоритму Q-навчання з підкріпленням для адаптації до змін у середовищі в реальному часі дозволяє використовувати інформацію, отриману на першому рівні, для прийняття оптимальних рішень в онлайн режимі.

Використання такого підходу може забезпечити ефективне управління мережею, адаптуючись до змін у середовищі та враховуючи різні цільові функції. Однак, варто зазначити, що реалізація такої системи може бути досить складною, і може накладати часові обмеження на налаштування та тестування різних компонентів системи, щоб досягти оптимальних результатів.

Тому, напрямком подальших досліджень є імітаційне моделювання запропонованої моделі інтелектуального управління ресурсами наземної комунікаційної мережі класу MANET для дослідження її адекватності, крім того необхідно дослідити показники ефективності системи інтелектуального управління у порівнянні із відомими рішеннями.

Список використаних джерел:

1. Беляков Р. О., Фесенко О. Д. Модель мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального призначення. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2023. № 51. С. 130–138. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17.
2. Романюк В. А. Концепція ієрархічної побудови інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET. *НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології*: Збірник тез доповідей Міжнародної кримської конференції КриМіКо. Севастополь, 2012. С. 265.
3. Романюк В. А. Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами. *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ»*. 2012. № 1. С. 109–117.
4. Романюк В. А. Архітектура системи оперативного управління тактичними радіомережами. *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ»*. 2009. № 3. С. 70–76.
5. Deep Reinforcement Learning Aided Packet-Routing for Aeronautical Ad-Hoc Networks Formed by Passenger Planes / D. Liu et al. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. Vol. 70, no. 5. P. 5166–5171. DOI: 10.1109/tvt.2021.3074015.
6. Enhancing Vehicular Ad Hoc Networks' Dynamic Behavior by Integrating Game Theory and Machine Learning Techniques for Reliable and Stable Routing / N. Phull et al. *Security and Communication Networks*. 2022. Vol. 2022. P. 1–11. DOI: 10.1155/2022/4108231.
7. Implementation of Mobility Management Methods for MANET / J. Hosek et al. *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*. 2012. Vol. 1, no. 2-3. DOI: 10.11601/ijates.v1i2-3.39.

8. Model of data flow control subsystem of the MANET class mobile radio network control system / Yu. Kramaska et al. *Scientific Journal of TNTU*. 2022. Vol. 107. No 3. P. 51–59.
9. 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. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19.
10. The Hierarchical Model Of Interaction Between Intelligent Agents In The Manet Control Systems / O. Y. Sova et al. *Information and Telecommunication Sciences*. 2015. No. 1. P. 21–28. DOI: 10.20535/2411-2976.12015.21-28.
11. Жебка В.В. Дослідження методів машинного навчання та їх застосування для прогнозування відтоку користувачів телекомунікаційних послуг. *Зв'язок*. 2020. № 4. DOI: 10.31673/2412-9070.2020.042231.

References:

1. 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.
2. Romaniuk, V. A. (2012). Kontseptsyia yerarkhycheskoho postroenyia yntellektualnikh system upravlenyia taktycheskymy radyosetiamy klassa MANET [The concept of hierarchical construction of intelligent management systems for tactical radio networks of the MANET class]. Proceedings from KryMyKo: *Mezhdunarodna Krymska konferentsiia «NVCh-tekhnyka ta telekomunikatsiyni tekhnologii» – International Crimean conference «Microwave technology and telecommunication technologies»*. (p. 265). Sevastopol: KryMyKo [in Ukrainian].
3. Romaniuk, V. A. (2012). Tsilovi funktsii operatyvnoho upravlinnia taktychnymy radiomerezhamy [Target functions of operational management of tactical radio networks]. *Zbirnyk naukovykh prats VITI NTUU «KPI» – Scientific works collection of MITIT NTUU "KPI"*, 1, 109–117. [in Ukrainian].
4. Romaniuk, V. A. (2009). Arkhitektura systemy operatyvnoho upravlinnia taktychnymy radiomerezhamy [Architecture of the operational management system of tactical radio networks]. *Zbirnyk naukovykh prats VITI NTUU «KPI» – Scientific works collection of MITIT NTUU "KPI"*, 3, 70–76. [in Ukrainian].
5. Liu, D., Cui, J., Zhang, J., Yang, C. Y., & Hanzo, L. (2021). Deep Reinforcement Learning Aided Packet-Routing for Aeronautical Ad-Hoc Networks Formed by Passenger Planes. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(5), 5166–5171. <https://doi.org/10.1109/tvt.2021.3074015>.
6. Phull, N., Singh, P., Shabaz, M., & Sammy, F. (2022). Enhancing Vehicular Ad Hoc Networks' Dynamic Behavior by Integrating Game Theory and Machine Learning Techniques for Reliable and Stable Routing. *Security and Communication Networks*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/4108231>.
7. Hosek, J., Vajsar, P., Bartl, M., & Molnar, K. (2012). Implementation of Mobility Management Methods for MANET. *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*, 1(2-3). <https://doi.org/10.11601/ijates.v1i2-3.39>.
8. Kramaska, Y., Salnyk, S., Vasylenko, S., & Mavrina, O. (2022). Model of data flow control subsystem of the manet class mobile radio network control system. *Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Scientific journal of the Ternopil national technical university*, 107(3), 51–59. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.03.051.
9. 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>.
10. Sova, O. Y., Romanyuk, V. A., Minochkin, D. A., & Polshchikov, K. O. (2015b). The Hierarchical Model Of Interaction Between Intelligent Agents In The Manet Control Systems. *Information and Telecommunication Sciences*, (1), 21–28. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12015.21-28>.
11. Zhebka, V. V. (2020). Doslidzhennia metodiv mashynnoho navchannia ta yikh zastosuvannia dlia prohnozuvannia vidtoku korystuvachiv telekomunikatsiinykh posluh [Research of machine learning methods and their application for forecasting use outflow by telecommunications services]. *Zviazok – Connectivity*, 146(4). <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2020.042231>. [in Ukrainian].