

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/12>**Сушин І.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ПІДТРИМКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ РІЗНОРІВНЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ

Досліджено, що мобільні сенсорні мережі являють собою вагому частину безпроводових сенсорних мереж в цілому. Відбуваються процеси їх постійного вдосконалення, такі як використання сенсорів спрямованої дії, застосування двох і більше рівнів телекомунікаційних аероплатформ тощо. Використання ефективних методів, які дозволятимуть покращити показники мережі є ключовим аспектом. Це створює наукову задачу, яка полягає у розробці методики оцінки ефективності методу підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії за допомогою телекомунікаційних аероплатформ різнорівневого розташування.

У статті розглянуто перелік можливих параметрів, які будуть обрані для виконання порівняння, сформовано необхідні вхідні дані для проведення імітаційного моделювання. Також наведено структуру мобільних сенсорних мереж із використанням телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) на основі яких побудовано математичні моделі. А саме мобільна мережа сенсорів всеспрямованої дії з використанням одного рівня БПЛА та мобільна мережа сенсорів спрямованої дії із використанням двох рівнів БПЛА. На нижчому рівні знаходяться БПЛА з меншими енергетичними можливостями (зазвичай гелікоптерного типу), а на верхньому – з більшим (зазвичай літакового типу). В обох випадках інформація передається до псевдосупутника, який має зв'язок із класичними мережами зв'язку.

За допомогою програмного середовища Matlab виконано розрахунки середньої довжини маршруту, затримки, кількості БПЛА апаратів на шляху від вузла до псевдосупутника, їх медіани та моди, а також середньої пропускної здатності. Тренд залежності пропускної здатності від відстані збігається із раніше проведеними розрахунками у програмному комплексі Atoll. Отримані результати підтверджують актуальність та можливість використання мобільної мережі сенсорів спрямованої дії із використанням багаторівневих телекомунікаційних аероплатформ у подальших наукових та виробничих цілях.

**Ключові слова:** МСМ, телекомунікаційна аероплатформа, сенсори спрямованої дії, сенсори всеспрямованої дії, БПЛА.

**Постановка проблеми.** Мобільні сенсорні мережі (МСМ) з кожним роком займають все більш вагому частину безпроводових мереж у зв'язку зі збільшенням кількості воєнних конфліктів, катаклізмів різного характеру тощо. Їх можна характеризувати як розподілену систему безпроводних вузлів (малого розміру) здатну самоорганізуватися. Основними якостями МСМ з використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА) є можливість моніторингу різноманітних параметрів, обміну інформації на великих територіях по маршрутах, що проходять через інші вузли і БПЛА до найближчого мережевого

елемента (МЕ) (наприклад, супутник чи базова станція) систем загального користування чи безпосередньо до центру обробки інформації. Тому їх розвиток є актуальним, в тому числі із використанням ТА, а саме організації та покращення зв'язності між МЕ.

У класичних МСМ із використанням ТА сенсорні вузли мають всеспрямовану дію (використовують відповідний тип антен), а безпілотні літальні апарати (БПЛА) розташовуються на одному рівні [1, 2], але не завжди це дозволяє досягнути потрібної пропускної здатності чи внести обмеження довжини маршруту від сенсора

(вузла) до супутника чи базової станції та інших параметрів. Також важливим є ефективне використання наявного обмеженого ресурсу БПЛА. Тому варто розглянути мобільну мережу сенсорів спрямованої дії [3, 4] із застосуванням ТА різномірного розташування [5, 6], що дозволить покращити ключові параметри.

Для оцінки ефективності наземно-повітряної мережі (НПМ) важливо визначити перелік параметрів: час розгортання, функціонування, кількість необхідних ТА, відсоток покриття, пропускна здатність, затримка тощо, а також вхідних параметрів: площа покриття, характеристики приймально-передавального обладнання, детальний опис топології тощо. Виходячи з цього виникає потреба у формуванні методики оцінки ефективності НПМ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Класична топологія НПМ мережі полягає у використанні вузлів всеспрямованої дії на нульовому рівні та БПЛА, які розташовуються на одному рівні. Існуючі праці показують, що їх вдосконалення полягає у впровадженні нових алгоритмів кластеризації, обльоту та позиціонування [7–9]. У МСМ такого типу вузли дозволяють приймати та передавати сигнал у всіх напрямках, що дозволяє їх використовувати у сценаріях швидко змінних подій і переміщення у просторі, проте в такому випадку ефективність споживання енергії лишається низькою або виникають обмеження у максимальній відстані лінії зв'язку або пропускній здатності [3, 4]. Також використання одного рівня БПЛА вимагає більшої їх кількості, що не завжди є можливим. Тому для усунення вищевказаних недоліків були запропоновані МСМ з вузлами спрямованої дії із використанням двох та більше рівнів БПЛА [5, 6], які дозволяють використовувати вже наявні вдосконалення алгоритмів із різними протоколами доступу. Але і досі існує необхідність у їх оцінці і порівнянні для прийняття рішення про подальше впровадження у подальших наукових та виробничих цілях.

**Постановка завдання.** Наукові дослідження та розробки, які забезпечують покращення зв'язності мережевих елементів НПМ являють собою вагомий напрямок у їх розвитку із подальшим впровадженням у цивільних та військових сферах.

Далі постає задача формування можливих параметрів оцінки їх ефективності та відповідної методики. Тому необхідно виходячи з існуючих досліджень та методів [1–2, 7–10] провести порівняння із запропонованою мобільною мережею сенсорів спрямованої дії з використанням ТА різномірного розташування. Для цього потрібно

створити математичні моделі із задалегідь обраними вхідними даними, що дозволять провести експеримент (імітаційне моделювання) та зробити висновки.

**Виклад основного матеріалу.** Важливо розуміти, що оцінка ефективності може здійснюватися пофазно: під час оперативного керування, зміни конфігурації (нарощування або зменшення), планування або розгортання. На виконання кожної фази відводиться необхідний час  $T_{\text{необх}}$  (задається часове обмеження), а ефективність визначається згідно правила  $T_{\text{необх}} \rightarrow \min$  або  $T \leq T_{\text{необх}}$ , якістю прийнятих рішень центром керування мережі (ЦКМ), затратними ресурсами (вузли, ТА) та енерговитратами. Робота системи керування складається з наступних підсистем: планування та оптимізації покриття, телекомунікацій та енергоменеджменту. Відповідно для кожної з них є певні показники для оцінки ефективності (табл. 1).

Таблиця 1

**Показники для оцінки ефективності підсистем**

Планування та оптимізація покриття	Телекомунікацій	Енергоменеджменту
Час розгортання	Зв'язність	Витрата енергії
Відсоток покриття	Пропускна здатність	Час функціонування
Кількість вузлів	Затримка	
Кількість ТА	Обсяг трафіку	
	Навантаження	

Перша підсистема забезпечує покриття певної площі, об'єкта, населеного пункту тощо для обміну/збору інформації такої як стан предмету моніторингу або передача інформації до нього. Друга підсистема має забезпечити обмін даних з вузлами і ТА, включно до базової станції (або супутника) з необхідною якістю. Перед цим процесом мають бути виконане розгортання мережі з формуванням кластерів та точок обміну інформації ТА, маршруту польоту. Третя підсистема відповідає за розподіл енерговитрат між мережевими елементами (кожен з яких має своє джерело живлення). Головна її ціль збільшення тривалості роботи мережі та її елементів за умови мінімально необхідної якості покриття, обміну/збору даних.

Для раціонального порівняння ефективності представленої телекомунікаційної системи була запропонована методика, що складається з чотирьох етапів.

На першому необхідно задати параметри НПМ:

1. Характеристики МЕ: потужність трансмітерів  $P_i$ , робоча частота  $f_p$ , смуга пропускання  $\Delta f$ , тип антен, коефіцієнти їх підсилення  $G_i$  виходячи

із точності вимірювань, якості передачі мультимедійних даних, часу обміну/збору, повноти отриманої інформації тощо).

2. Характеристики мережі: площа покриття, кількість МЕ ( $N_{\text{вуз}}$ ,  $N_{\text{ТА}}$ ), їх координати, топологія (кількість кластерів та вузлів у них, ліній зв'язку, алгоритм вибору головного вузла кластеру (ГВК) тощо), протокол доступу, вид обслуговування (з гарантією чи без), час роботи.

3. Характеристики методу обміну/збору інформації, а саме: їх тип (попередньо з кожного вузла, з ГВК); МЕ, що виконує організацію кластеру та керування мережею (ЦКМ або ТА або ГВК); алгоритми побудови маршруту польоту (загальний або локальний) та кластерів виходячи із цільової функції (мінімізація кількості ТА, максимізація часу роботи мережі та інші).

На другому етапі потрібно обрати показники оцінки ефективності (із таблиці 1).

На третьому етапі відбувається побудова математичних моделей НІМ (однорівнева з сенсорами всеспрямованої дії та дворівнева з сенсорами спрямованої дії) та проведення експерименту (імітаційного моделювання).

На четвертому етапі отримуємо результати та залежності показників ефективності від різних умов функціонування мережі. Виходячи з вищезазначеного, на останньому етапі необхідно виконати порівняння та зробити висновки.

Для порівняння було побудовано дві математичні моделі: однорівнева з сенсорами всеспрямованої дії (рис. 1) та дворівнева з сенсорами спрямованої дії (рис. 2). Вузли сенсорної мережі розташовуються на нульовому рівні на висоті до 1.5 м, а висота псевдосупутника з яким зв'язуються

БПЛА становить 20 км. В однорівневій моделі висота БПЛА становить до 1км. А в дворівневій моделі: висота БПЛА першого рівня 1,5–2 км, другого – 5–15 км. Усі мережеві елементи розташовані випадковим чином на площі  $50 \text{ км}^2$ . Кількість вузлів нульового рівня  $N_{\text{вуз}}$  становить 600. БПЛА в однорівневій моделі  $N_{\text{ТА}} = 400$ , в дворівневій –  $N_{\text{ТА}} = 360$  (60 з яких розташовуються на другому рівні). Дальність зв'язку визначалася згідно методики [3] з технологією доступу IEEE 802.11ax. Максимальний радіус обльоту БПЛА першого рівня 4000 м, другого – 8000 м. Потужність передавача вузла 20 dBm, БПЛА першого рівня 25 dBm, другого – 30 dBm, робоча частота 2447 МГц, смуга пропускання 20 МГц. Коефіцієнт підсилення антен вузлів в однорівневій моделі 5 dBi, а в дворівневій – 17 dBi. Розмір пакета передачі даних – 1024 біт.

Головними вузлами кластеру виступають БПЛА першого рівня, які встановлюють зв'язок з доступними у радіусі дії вузлами нульового рівня. У однорівневій моделі БПЛА першого рівня також встановлюють зв'язок з найближчими БПЛА для підтримки зв'язності, а в дворівневій моделі – БПЛА другого рівня (вони являють собою ГВК для БПЛА першого рівня).

Ефективність вдосконаленої моделі оцінювалася за наступними параметрами: довжина маршруту, кількість мережевих елементів, середня пропускна здатність та затримка від вузла нульового рівня до псевдосупутника. Для розрахунку цих показників будемо користуватися методикою запропонованою у розділі 3 та специфікаціями стандарту IEEE 802.11ax у програмному комплексі MATLAB. Кількість проведених вимірювань 10000.

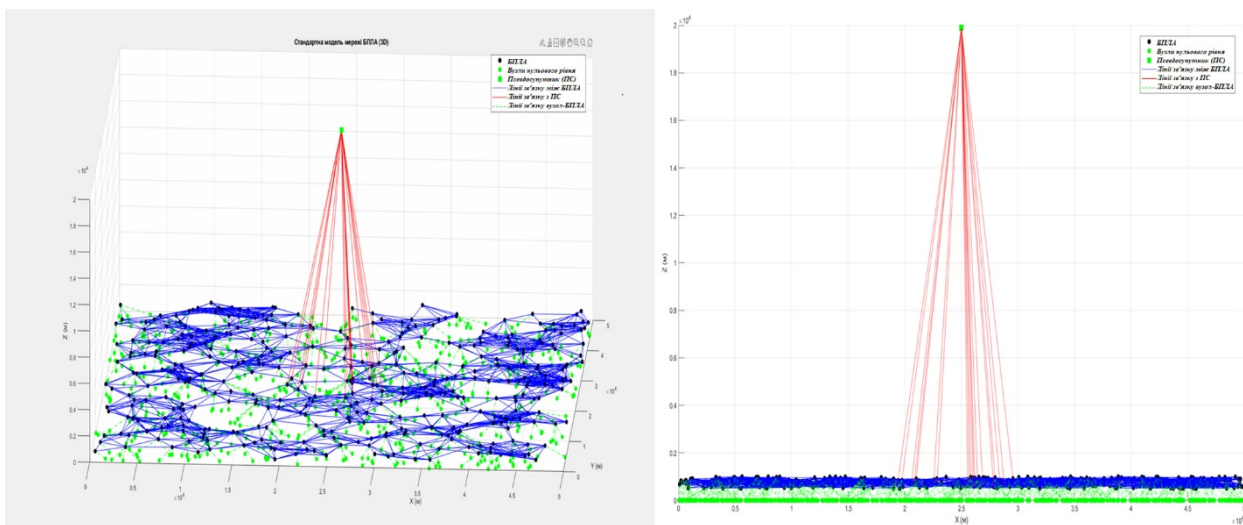


Рис. 1. Однорівнева модель НІМ з вузлами всеспрямованої дії



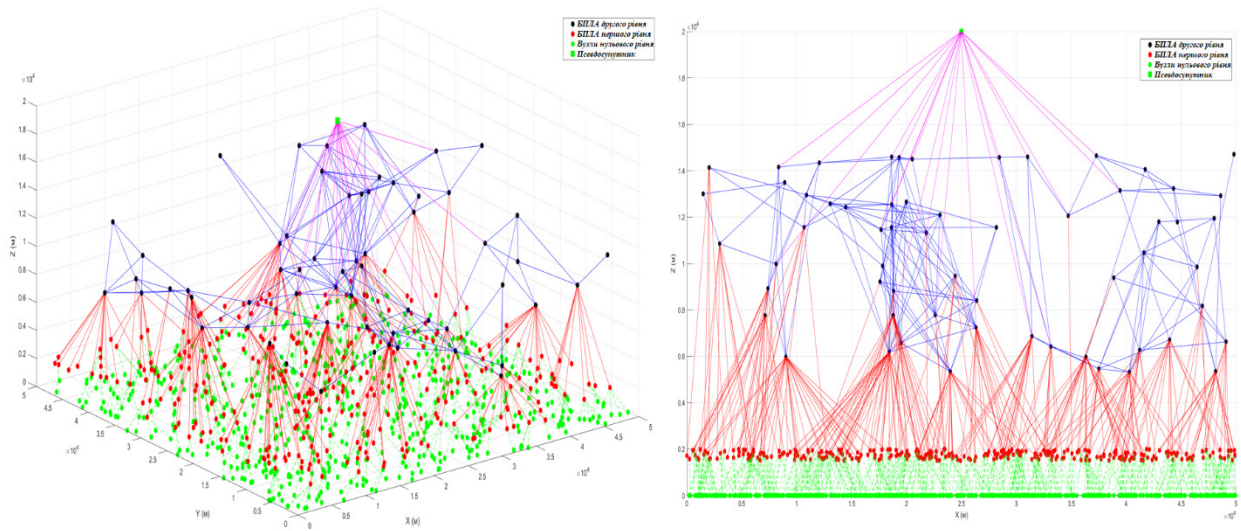


Рис. 2. Дворівнева модель НІМ з вузлами спрямованої дії



Рис. 3. Вимірювання середньої, максимальної та мінімальної довжин маршруту

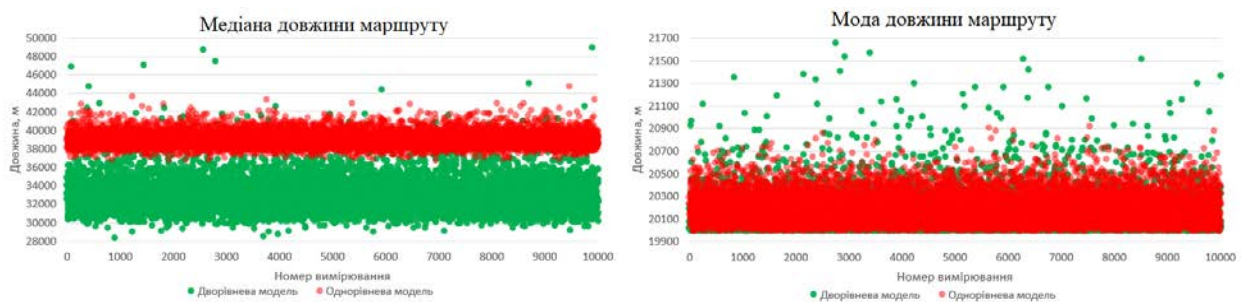


Рис. 4. Вимірювання медіани та моди довжини маршруту

На рисунках 3 та 4 відображено результати імітаційного моделювання для довжини маршруту: середні, максимальні, мінімальні значення, а також їх мода та медіана. Дивлячись на отримані результати можна зробити висновок, що відстань маршруту у вдосконаленій (дворівневій) моделі менша на 1,5–15,2% (за показниками моди, медіани, середнього).

На рисунку 5 відображено результати імітаційного моделювання для кількості мережевих елементів на маршруті від вузла нульового рівня до псевдосупутника включно: середні, максимальні, значення, а також їх мода та медіана. Мінімальні значення для однорівневої моделі – 2, для дворівневої – 3. Дивлячись на отримані результати можна зробити висновок, що кількість МЕ у вдосконаленій (дворівневій) моделі менша на 20–43% за зазначеними вище показниками.

Також були отримані результати середніх значень пропускних здатностей та затримок (рис. 6) від вузлів до псевдосупутника. Отримана пере-

вага у дворівневій моделі становить 41 та 29 відсотків відповідно. Далі слід звернути увагу на залежності середньої пропускної здатності, середніх затримок та кількості МЕ від відстаней (рис. 7 та рис. 8). Із залежності представлені на рисунку 7 можна зробити висновок, що пропускна здатність зменшується зі збільшенням відстані, що збігається із розрахунками у програмному комплексі Atoll [3]. А залежності на рисунку 8 демонструють збільшення затримки та кількості МЕ зі збільшенням відстані відповідно. Узагальнені результати імітаційного моделювання для обох моделей та їх порівняння наведені у таблиці 2.

**Висновки.** У статті запропоновано методику у якій описується підхід до оцінки ефективності MCM та раціонального порівняння запропонованої моделі із існуючою. Він складається з чотирьох етапів, а саме: задання вхідних параметрів мережевих елементів та мережі в цілому, обрання доступних показників ефективності, побудова математичних моделей на основі вказаної інфор-

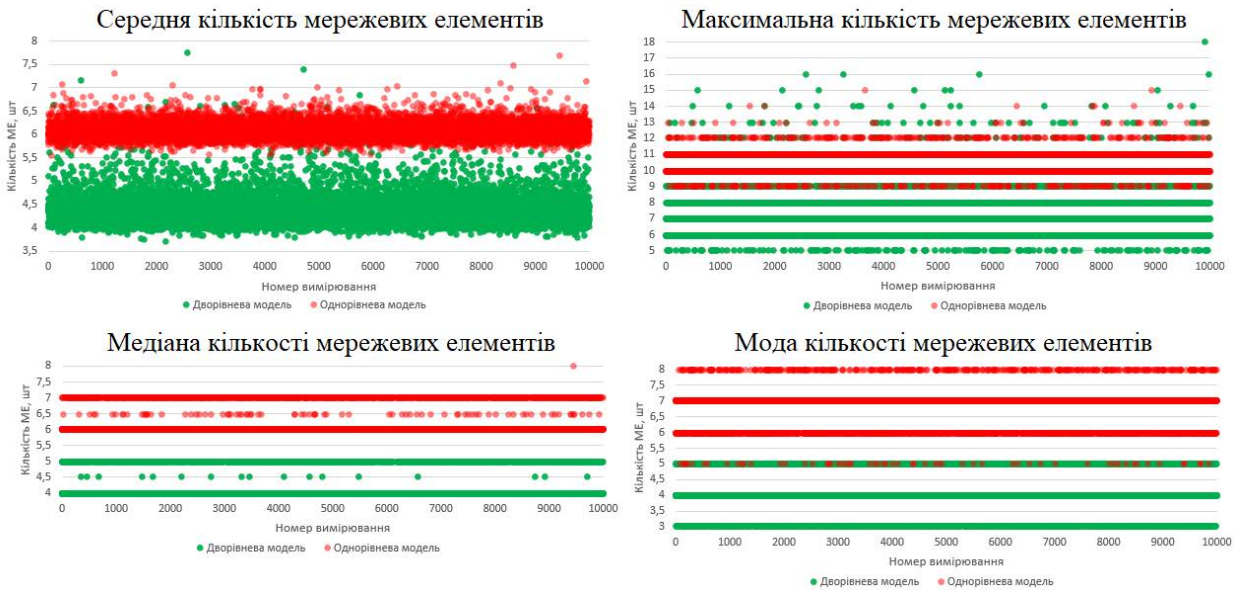


Рис. 5. Вимірювання середньої, максимальної кількості мережевих елементів, їх медіани і моди

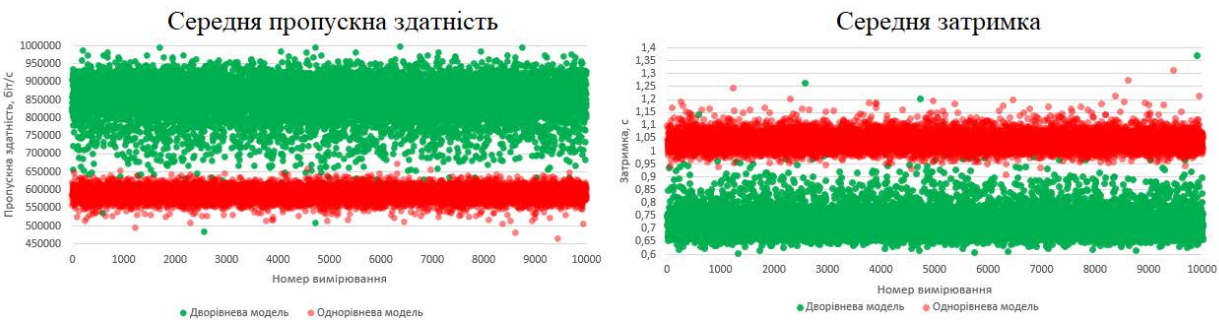


Рис. 6. Вимірювання середньої пропускної здатності та затримок



Рис. 7. Залежність середньої пропускної здатності від середньої відстані

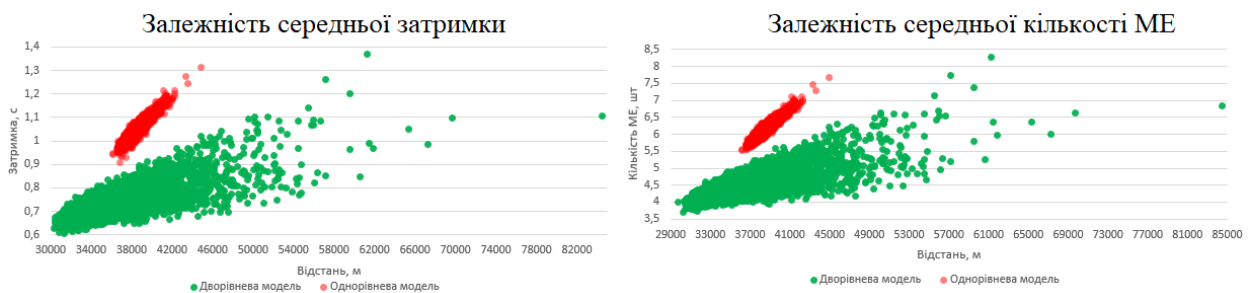


Рис. 8. Залежність середньої затримки та середньої кількості МЕ від середньої відстані

Таблиця 2

Узагальнені результати імітаційного моделювання

Показник	Однорівнева модель	Дворівнева модель	Різниця, %
Середня довжина маршруту, м	37649,13	33673,45	10,55
Максимальна довжина маршруту, м	58340,52	62871,89	-7,77
Мінімальна довжина маршруту, м	20397,6	20075,12	1,58
Медіана довжини маршруту, м	38413,1	32561,065	15,23
Мода довжини маршруту, м	20397,6	20075,12	1,58
Середня кількість МЕ, шт.	6,04	4,351	28,04
Максимальна кількість МЕ, шт.	10	8	20
Мінімальна кількість МЕ, шт.	2	3	-50
Медіана кількості МЕ, шт.	6	4	33,33
Мода кількості МЕ, шт.	7	4	42,86
Пропускна здатність, біт/с	602846,77	852071,01	-41,34
Загальна затримка, с	1,02	0,72	29,25

мації та отримання результатів з підготовкою необхідних залежностей.

Було визначено перелік показників для оцінки ефективності в кожній із підсистем керування мережею (планування та оптимізації покриття, телекомунікацій, енергоменеджменту).

Представлено дві математичні моделі: МСМ все-спрямованої дії із використанням одного рівня ТА і МСМ спрямованої дії із використанням ТА дво-

рівневого розташування. Отримані результати імітаційного моделювання запропонованої та існуючої моделі на основі яких були побудовані візуальні представлення і порівняння у вигляді сімейства графіків та загальної таблиці. А також представлено залежності середніх значень затримок, пропускної здатності та кількості МЕ від середньої довжини маршруту.

Отримані результати показують, що відстань маршруту у вдосконаленій (дворівневій) моделі



менша на 1,5–15,2% (за показниками моди, медіани, середнього) та на 7,8% більша за максимальним показником. Кількість МЕ у вдосконаленій моделі менша на 20 – 43% за розглянутими показниками (крім показника мінімальної кількості де він становить 3), а перевага у середній пропускній здатності та затримці становить 41 та 29 відсотків відповідно.

Загалом бачимо збільшення пропускної здатності у представленій моделі за середнім показником, зменшення необхідної кількості мережевих елементів (ТА) і довжини маршруту від вузла до псевдосупутника. Проте мінімальна необхідна

кількість ТА (включно із псевдосупутником) в запропонованій моделі на одну одиницю більше (що є її необхідною умовою функціонування), а також у невеликій кількості вимірювань середня довжина маршруту у запропонованій моделі більша ніж в існуючій, що зумовлено розташуванням мережевих елементів (ТА і сенсорів) на значній відстані один від одного. Наукова новизна полягає у перевірці ефективності вперше запропонованого вдосконаленого методу підтримки зв'язності мобільної сенсорної мережі, який можливо використовувати у подальших наукових та виробничих цілях.

### Список літератури:

1. V. Romaniuk, O. Lysenko, V. Novikov, and I. Sushyn, Development of methods of positioning, localization and data collection from nodes of a free mobile sensor network using intelligent adaptive telecommunication AEROPLATFORMS, Information and Telecommunication Sciences, 2021 no. 2, pp. 40–49.

2. Sushyn, I., Lysenko, O., Romaniuk, V., Yavisiya, V., Kyselov, V., Novikov, V. UAV Connectivity Maintenance in Wireless Sensor Networks. In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1198, 2024, pp 843–857.

3. Сушин І.О., Лисенко О.І. «Універсальна методика передачі даних із застосуванням сенсорів спрямованої дії», Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки, том 35 (74) № 2, с. 6–14, 2024.

4. Сушин І.О., Лисенко О.І., Авдеєнко Г.Л., «Застосування сенсорів спрямованої дії в мобільних безпроводових сенсорних мережах», Вісімнадцята міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», с. 199-202, 15–19 квітня 2024р.

5. Сушин І.О., Буткевич Г.Ю., «Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ», Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки, том 34 (73) № 6, с. 39–46, 2023.

6. Сушин І.О., Лисенко О.І., «Програма оцінки зв'язності вузлів безпроводових епізодичних мереж при умові застосування бпла», Сімнадцята міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», с. 36-41, 18–21 квітня 2023р.

7. Валуцький С.В. Вдосконалений метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ. Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». 2014. Вип. 7. С. 25–34.

8. Шабельник Т., Кривенко С, Конєва О. Система автоматичного пілотування безпілотних летальних апаратів в умовах відсутності радіозв'язку. Кібербезпека: освіта, наука, техніка київського університету імені Бориса Грінченка. №1 (9), 2020.

9. Гримуд А.Г., Романюк В.А., Модель пошуку траєкторії польоту телекомунікаційною аероплатформою для збору даних з вузлів кластеризованої бездротової сенсорної мережі військового призначення, Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень No 1(74), 2022 Національного університету оборони України імені Івана Черняховського.

10. Романюк В.А., Лисенко О.І., Романюк А.В., Новіков В.І., Гуйда О.Г., Метод збору інформації з вузлів безпроводової сенсорної мережі з використанням інтелектуальних адаптивних літаючих інформаційно-телекомунікаційних роботів, Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки, том 32 (71) ч.2 №2, 2021р, с. 25–35.

### **Sushyn I.O., Lysenko O.I. EVALUATION OF METHOD EFFECTIVENESS FOR MAINTAINING CONNECTIVITY IN A MOBILE NETWORK WITH DIRECTED ACTION SENSORS USING TELECOMMUNICATION AERIAL PLATFORMS AT DIFFERENT LOCATION LEVELS**

*It has been studied that mobile sensor networks are a significant part of wireless sensor networks in general. There are processes of their constant improvement with advancements such as directed action sensors and the implementation of multi-layers telecommunication aerial platforms, etc. Using effective methods to enhance*

*network performance is crucial, creating a scientific challenge to develop a methodology for evaluating the effectiveness of procedures for maintaining connectivity in mobile networks with directed action sensors using telecommunication aerial platforms at different location levels.*

*The article considers the list of possible parameters which will be selected for comparison, and forms the necessary input data for simulation modelling. Also presented the structure of mobile sensor networks utilizing telecommunication aerial platforms (UAVs), based on which mathematical models are built. Specifically, a mobile network with omni-directed action sensors using one level of UAVs and a mobile network with directed action sensors using two levels of UAVs. The lower level consists of UAVs with lower power (generally helicopter-type), while the upper level includes UAVs with higher power (generally airplane-type). In both cases, information is transmitted to a pseudo-satellite connected to traditional communication networks.*

*The average route length, delay, number of UAVs from the node to the pseudo-satellite, their median, mode, along with average throughput were calculated using Matlab software environment. The throughput against distance trend aligns with previous calculations performed in the Atoll software. These results confirm the actuality of mobile networks with directed action sensors using multi-layer telecommunication aerial platforms for scientific and industrial purposes.*

**Key words:** *MSN, telecommunication aerial platform, directed action sensors, omni-directed action sensors, UAVs.*