

Гредасов Д.О.

<https://orcid.org/0009-0000-4994-4879>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Яковенко І.В.

<https://orcid.org/0000-0002-0963-4347>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

БАГАТОРІВНЕВА КЛАСТЕРНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У РОЄВИХ MESH-МЕРЕЖАХ ДРОНІВ

У статті розглянуто задачу підвищення енергоефективності роєвих телекомунікаційних систем дронів, що функціонують у MESH-топології, в умовах обмежених енергетичних ресурсів та динамічної зміни структури мережі. Показано, що традиційні однорівневі схеми кластеризації не забезпечують достатньо рівномірного розподілу енергетичного навантаження між вузлами та призводять до передчасного виснаження окремих елементів мережі, що негативно впливає на її час автономного функціонування.

Запропоновано багаторівневу кластерну модель організації роєвої MESH-мережі дронів, яка ґрунтується на ієрархічному розподілі ролей між вузлами та багаторівневій агрегації трафіку. У межах моделі формуються кластери з різними рівнями відповідальності, що дозволяє локалізувати передавання даних, зменшити кількість енергетично затратних ретрансляцій та забезпечити більш раціональне використання енергетичного ресурсу вузлів.

Розроблено математичну та енергетичну моделі, які описують процеси передавання, приймання й агрегації даних у роєвій MESH-мережі з урахуванням навантаження та залишкової енергії дронів. Запропоновано метрики оцінювання ефективності, зокрема час життя мережі та дисперсію залишкової енергії, що дозволяє кількісно оцінити рівномірність енергоспоживання та стійкість мережі до деградації.

Ефективність запропонованого підходу підтверджено шляхом комп'ютерного моделювання та порівняльного аналізу з базовим алгоритмом LEACH. Результати експериментів показали, що багаторівнева кластерна модель забезпечує більш рівномірний розподіл енергетичного навантаження між вузлами та подовження часу життя мережі приблизно на 15 % у широкому діапазоні коефіцієнтів навантаження. Отримані результати підтверджують наукову новизну та практичну доцільність застосування багаторівневої кластеризації у роєвих MESH-мережах дронів.

Ключові слова: кластеризація, енергозбереження, роєві дрони, MESH-мережа, час життя мережі.

Постановка проблеми. У сучасних телекомунікаційних системах роєві мережі безпілотних літальних апаратів набувають все більшого поширення як основа для побудови мобільних MESH-інфраструктур із швидкою самоорганізацією та відсутністю фіксованих елементів керування. Такі мережі знаходять застосування у задачах моніторингу, аварійно-рятувальних операцій, тимчасового розгортання каналів зв'язку та у військових системах, де надійність і автономність функціонування мають вирішальне значення. Водночас

обмежені енергетичні ресурси дронів і динамічна зміна топології істотно ускладнюють забезпечення стабільного передавання даних упродовж тривалого часу.

Однією з ключових проблем роєвих MESH-мереж є нерівномірний розподіл енергетичного навантаження між вузлами, що призводить до передчасного виходу з ладу окремих елементів і деградації зв'язності мережі. Традиційні підходи до кластеризації, зокрема однорівневі алгоритми типу LEACH, не повною мірою враховують дина-



міку топології та зміну ролей вузлів у процесі маршрутизації, що обмежує їхню ефективність у мобільних середовищах. Це зумовлює необхідність розроблення нових моделей організації мережі, орієнтованих на підвищення енергоефективності та стійкості функціонування.

У зв'язку з цим у статті запропоновано багаторівневу кластерну модель енергозбереження для роєвих MESH-мереж дронів, яка базується на ієрархічній організації вузлів та оптимізації процесів агрегації і передавання даних. Модель формалізує енергетичні витрати з урахуванням просторових характеристик і ролі вузлів у мережі та дозволяє кількісно оцінити вплив кластеризації на час життя мережі. Ефективність запропонованого підходу підтверджено шляхом комп'ютерного моделювання, результати якого демонструють зменшення енергетичного навантаження та збільшення тривалості автономного функціонування мережі.

Стрімкий розвиток роєвих безпілотних систем і зростання вимог до автономності їх функціонування зумовлюють підвищену увагу до питань енергоефективності телекомунікаційних MESH-мереж. У практичних сценаріях використання дронів, зокрема під час моніторингу великих територій, надзвичайних ситуацій або у зонах з відсутньою стаціонарною інфраструктурою, можливість тривалого підтримання зв'язку без підзарядки є критичним фактором. Обмежені енергетичні ресурси вузлів у поєднанні з динамічною зміною топології роблять традиційні підходи до організації мережі недостатньо ефективними.

Актуальність дослідження також зумовлена обмеженнями існуючих алгоритмів кластеризації, які переважно орієнтовані на статичні або слабо мобільні сенсорні мережі. У роєвих MESH-мережах дронів такі підходи не забезпечують належного балансування навантаження, оскільки не враховують часті зміни ролей вузлів, варіативність відстаней між ними та нерівномірність трафіку. У результаті окремі дрони швидко вичерпують свій енергетичний ресурс, що призводить до втрати зв'язності та зниження загальної ефективності телекомунікаційної системи.

У цьому контексті розроблення багаторівневих моделей кластеризації, здатних адаптуватися до динамічних умов функціонування, є актуальним науковим і прикладним завданням. Такі моделі дозволяють поєднати вимоги енергозбереження, стійкості маршрутизації та масштабованості мережі, що є принципово важливим для сучасних телекомунікаційних застосувань. Запропонований

у роботі підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку мобільних мереж і спрямований на подолання існуючих обмежень у галузі енергоефективної організації роєвих MESH-мереж дронів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) зумовив виділення окремого класу телекомунікаційних мереж – FANET (Flying Ad-hoc Networks). У сучасних міжнародних дослідженнях [1, 2] зазначається, що ключовою проблемою таких мереж є висока динаміка топології, яка у поєднанні з обмеженим зарядом батарей дронів вимагає розроблення специфічних протоколів маршрутизації. Автори огляду [3] підкреслюють, що традиційні протоколи для наземних мобільних мереж (MANET) не забезпечують необхідної енергоефективності у тривимірному просторі з високими швидкостями переміщення вузлів.

Одним із найбільш ефективних методів зниження енерговитрат визнано кластеризацію мережі. У класичних роботах [4] було запропоновано алгоритм LEACH, який став базовим для багатьох досліджень, як зауважують він розроблений для стаціонарних сенсорних мереж і втрачає ефективність при частій зміні топології рою. Сучасні європейські дослідження [5] пропонують модифікації кластерних підходів із використанням нечіткої логіки та евристичних алгоритмів для вибору голови кластера (Cluster Head), однак ці методи часто вимагають значних обчислювальних ресурсів безпосередньо на борту дрона.

Українська наукова школа робить вагомий внесок у розвиток методів керування трафіком та енергоресурсами у спеціальних мережах. озроблено тензорні та потокові моделі маршрутизації [6], які дозволяють оптимізувати розподіл навантаження та підвищити стійкість мережі. Дослідження [7] фокусується на проблемах керування трафіком в умовах обмежених ресурсів пропускнуої здатності, що є характерним для MESH-мереж.

Питання енергоефективності у контексті якості обслуговування (QoS) розглядаються у роботах [8, 9]. Автори доводять, що врахування залишкової енергії вузлів при побудові маршруту є критично важливим для подовження часу життя мережі. Водночас у дослідженні [10] акцентується увага на необхідності ієрархічної організації взаємодії у групах БПЛА для зменшення кількості службових повідомлень.

Незважаючи на значну кількість публікацій, проблема створення адаптивної багаторівневої

моделі, яка б поєднувала енергетичне балансування з урахуванням просторової мобільності рою дронів, залишається актуальною. Більшість існуючих рішень або ігнорують багаторівневість [11], або не враховують стохастичну природу MESH-з'єднань [12]. Це обумовлює необхідність розроблення запропонованої у статті моделі.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розроблення та обґрунтування багаторівневої кластерної моделі енергозбереження у роєвих MESH-мережах дронів, спрямованої на підвищення часу автономного функціонування мережі в умовах динамічної топології та обмежених енергетичних ресурсів. Досягнення поставленої мети передбачає формалізацію процесів передавання й агрегації даних з урахуванням ієрархічної організації вузлів та їх енергетичного стану, а також кількісну оцінку впливу кластеризації на ключові показники ефективності телекомунікаційної системи.

Для реалізації поставленої мети в роботі необхідно розв'язати сукупність взаємопов'язаних наукових задач, що охоплюють теоретичні та прикладні аспекти дослідження. Зокрема, потрібно сформулювати математичний апарат для опису енергетичних витрат у роєвій MESH-мережі з урахуванням просторових характеристик і ролей вузлів, розробити механізм багаторівневої кластеризації та агрегації трафіку, а також визначити інтегральні метрики оцінювання ефективності, насамперед час життя мережі та рівномірність енергоспоживання.

Завершальним етапом дослідження є експериментальна валідація запропонованої моделі шляхом комп'ютерного моделювання у спеціалізованому симуляційному середовищі. У межах цього етапу передбачається порівняльний аналіз запропонованого підходу з базовими алгоритмами кластеризації, дослідження впливу ієрархічної організації мережі на енергетичні характеристики та формулювання узагальнених висновків щодо доцільності використання багаторівневої кластеризації у телекомунікаційних MESH-мережах дронів.

Виклад основного матеріалу. *Модель роєвої MESH-мережі дронів.* Роєва телекомунікаційна система дронів розглядається як динамічна бездротова мережа з MESH-топологією, у якій кожен вузол поєднує функції джерела даних, ретранслятора та маршрутизатора. Нехай мережа складається з множини дронів

$$\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}, \quad (1)$$

де N – загальна кількість вузлів у рої. Кожен дрон $i \in \mathcal{N}$ характеризується поточними просторовими координатами $\mathbf{r}_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))$, що змінюються у часі внаслідок мобільності рою.

Наявність бездротового каналу зв'язку між двома вузлами i та j визначається їх взаємною відстанню

$$d_{ij}(t) = \|\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)\|, \quad (2)$$

де $\|\cdot\|$ – евклідова норма. Вважається, що прямий канал зв'язку існує тоді і лише тоді, коли $d_{ij}(t) \leq R$, де R – радіус стійкого бездротового з'єднання, зумовлений параметрами радіомодуля та умовами поширення сигналу. Таким чином, топологія MESH-мережі формується як неорієнтований граф $G(t) = (\mathcal{N}, \mathcal{E}(t))$, множина ребер якого $\mathcal{E}(t)$ змінюється у часі.

Енергетичний стан кожного дрона описується залишковою енергією акумулятора $E_i(t)$. Початковий енергетичний ресурс усіх вузлів приймається однаковим і дорівнює

$$E_i(0) = E_0, i \in \mathcal{N}, \quad (3)$$

де E_0 – номінальна енергоємність батареї. Подальша еволюція $E_i(t)$ визначається інтенсивністю комунікаційних операцій та участю вузла у ретрансляції трафіку.

Передавання інформації в роєвій MESH-мережі здійснюється у багатохоповому режимі. Нехай вузол i передає пакет даних обсягом l біт до вузла j . Витрати енергії на передавання можна подати у вигляді

$$E_{ij}^{\text{tx}}(l) = l \cdot (E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}} \cdot d_{ij}^\alpha), \quad (4)$$

де E_{elec} – енергія, необхідна для роботи електронних схем передавача, E_{amp} – коефіцієнт підсилювача сигналу, α – показник витрат середовища (зазвичай $2 \leq \alpha \leq 4$). Фізичний зміст цього співвідношення полягає у врахуванні як сталих витрат на обробку сигналу, так і зростання енергоспоживання зі збільшенням відстані між вузлами.

Витрати енергії на приймання пакета визначаються простішою залежністю

$$E^{\text{rx}}(l) = l \cdot E_{\text{elec}}, \quad (5)$$

оскільки на цьому етапі не задіяний підсилювач потужності. Сукупні витрати енергії вузла i за інтервал часу Δt можна подати як

$$\Delta E_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i^{\text{tx}}} E_{ij}^{\text{tx}}(l) + \sum_{k \in \mathcal{N}_i^{\text{rx}}} E^{\text{rx}}(l), \quad (6)$$

де $\mathcal{N}_i^{\text{tx}}$ та $\mathcal{N}_i^{\text{rx}}$ – множини вузлів, яким дрон i відповідно передає та від яких приймає дані у заданому часовому інтервалі.

У MESH-топології кожен дрон потенційно бере участь у маршрутизації трафіку інших вузлів, що призводить до нерівномірного енергетичного виснаження мережі. Саме ця властивість зумовлює необхідність введення механізмів структуризації мережі. Час життя мережі у подальшому розглядається як момент, коли енергетичний ресурс хоча б одного критично важливого вузла досягає порогового значення

$$T_{\text{life}} = \min_{i \in \mathcal{N}} \{t : E_i(t) \leq E_{\min}\}, \quad (7)$$

де E_{\min} – мінімальний допустимий рівень енергії, за якого вузол втрачає здатність виконувати комунікаційні функції.

Запропонована модель роєвої MESH-мережі дронів створює формальне підґрунтя для подальшого введення багаторівневої кластеризації. Саме в межах цієї моделі стає можливим кількісно оцінити, яким чином перерозподіл ролей між вузлами та зменшення кількості дальніх ретрансляцій впливають на динаміку $E_i(t)$ та на час життя мережі в цілому.

Багаторівнева кластерна модель. Для зменшення енергетичних витрат, притаманних плоскій MESH-топології, у роботі вводиться багаторівнева кластерна організація роєвої мережі дронів. Основна ідея підходу полягає у формуванні ієрархії вузлів, у межах якої частина дронів тимчасово виконує функції агрегування та маршрутизації трафіку, знімаючи надмірне навантаження з решти мережі. Така організація дозволяє обмежити кількість дальніх ретрансляцій і, відповідно, зменшити сумарні енергетичні витрати.

Нехай множина вузлів \mathcal{N} розбивається на сукупність первинних кластерів

$$\mathcal{N} = \bigcup_{k=1}^K C_k, \quad (8)$$

де C_k – множина вузлів k -го первинного кластера, а K – загальна кількість кластерів. У кожному кластері виділяється кластерна голова першого рівня, яка відповідає за локальну агрегацію трафіку та його подальшу передачу. Множину таких вузлів позначимо як

$$\mathcal{H}_1 = \{h_1^{(1)}, h_2^{(1)}, \dots, h_K^{(1)}\}. \quad (9)$$

Вибір кластерної голови першого рівня здійснюється на основі інтегрального критерію, що враховує залишкову енергію вузла та його просторове положення відносно інших елементів кластера. Для вузла $i \in C_k$ вводиться функція доцільності

$$\Phi_i^{(1)} = \omega_E \frac{E_i}{E_0} + \omega_D \left(1 - \frac{1}{|C_k|} \sum_{j \in C_k} \frac{d_{ij}}{R} \right), \quad (10)$$

де ω_E та ω_D – вагові коефіцієнти, що визначають відносну важливість енергетичного та просторового чинників. Максимізація $\Phi_i^{(1)}$ забезпечує вибір вузла з достатнім енергетичним запасом і вигідним положенням у кластері, що має чіткий фізичний зміст у контексті мінімізації середньої дальності передавання.

На другому рівні ієрархії формується мережа міжкластерної взаємодії. Кластерні голови першого рівня об'єднуються у вторинні кластери, для яких знову визначаються вузли-агрегатори другого рівня. Множину таких вузлів позначимо $\mathcal{H}_2 \subseteq \mathcal{H}_1$. Процес кластеризації на цьому рівні описується аналогічно:

$$\mathcal{H}_1 = \bigcup_{m=1}^M C_m^{(2)}, \quad (11)$$

де $C_m^{(2)}$ – вторинний кластер, що складається з кластерних голів першого рівня.

Критерій вибору голови другого рівня модифікується з урахуванням навантаження, яке несе вузол у процесі агрегації трафіку:

$$\Phi_i^{(2)} = \omega_E \frac{E_i}{E_0} + \omega_L \left(1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_{\max}} \right), \quad (12)$$

де λ_i – інтенсивність трафіку, що обробляється вузлом i , а λ_{\max} – максимальне значення інтенсивності у відповідному вторинному кластері. У цьому випадку фізичний зміст критерію полягає у запобіганні перевантаженню окремих вузлів-агрегаторів.

Агрегація трафіку у багаторівневій структурі дозволяє суттєво скоротити кількість міжкластерних передавань. Якщо у плоскій MESH-мережі сумарні витрати енергії на маршрутизацію можна подати у вигляді

$$E_{\text{mesh}} = \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i^{\text{tx}}} E_{ij}^{\text{tx}}, \quad (13)$$

то для багаторівневої кластерної організації вони набувають вигляду

$$E_{\text{clust}} = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i \in C_k} E_{ih_k^{(1)}}^{\text{tx}} + E_{h_k^{(1)}}^{\text{agg}} \right) + \sum_{m=1}^M E_{h_m^{(2)}}^{\text{tx}}, \quad (14)$$

де $E_{h_k^{(1)}}^{\text{agg}}$ – витрати енергії на агрегацію даних у кластерній голові першого рівня. Порівняння виразів (13) та (14) показує, що багаторівнева кластеризація замінює велику кількість дальніх ретрансляцій обмеженим числом передавань між агрегованими вузлами.

Таким чином, запропонована багаторівнева кластерна модель забезпечує структурне зниження енергетичних витрат за рахунок ієрархіч-

ної організації трафіку. Вона створює передумови для більш рівномірного розподілу навантаження між дронами та безпосередньо впливає на подовження часу життя роєвої MESH-мережі, що буде кількісно підтверджено у наступних розділах.

Енергетична модель та оцінка часу життя мережі. Для кількісного аналізу ефективності багаторівневої кластерної організації введемо узагальнену енергетичну модель вузла роєвої MESH-мережі, яка враховує основні режими його функціонування: передавання, приймання та агрегацію даних. Сукупні витрати енергії вузла i за малий інтервал часу Δt можна подати у вигляді

$$\Delta E_i(t) = E_i^{\text{tx}}(t) + E_i^{\text{rx}}(t) + E_i^{\text{agg}}(t), \quad (15)$$

де $E_i^{\text{tx}}(t)$, $E_i^{\text{rx}}(t)$ та $E_i^{\text{agg}}(t)$ відповідають витратам енергії на передавання, приймання та агрегацію інформації відповідно.

Енергетичні витрати на передавання даних у межах кластерної структури залежать від ролі вузла. Для звичайного вузла, що передає дані лише до своєї кластерної голови, середні витрати енергії на передавання за інтервал Δt можна оцінити як

$$E_i^{\text{tx}}(t) = \lambda_i I (E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}} d_{ih}^\alpha) \Delta t, \quad (16)$$

де λ_i – інтенсивність генерації пакетів вузлом i , h – відповідна кластерна голова, а d_{ih} – відстань між ними. Фізичний зміст цього виразу полягає у відображенні зменшення середньої дальності передавання завдяки локальній агрегації трафіку.

Для кластерної голови першого рівня витрати на приймання даних зростають пропорційно кількості підлеглих вузлів:

$$E_h^{\text{rx}}(t) = \left(\sum_{i \in C_h} \lambda_i \right) I E_{\text{elec}} \Delta t, \quad (17)$$

де C_h – множина вузлів, що належать до кластера з головою h . Цей доданок відображає підвищене навантаження на вузли-агрегатори, яке є характерною особливістю кластерних схем.

Агрегація даних у кластерній голові потребує додаткових енергетичних витрат, що моделюються як

$$E_h^{\text{agg}}(t) = \left(\sum_{i \in C_h} \lambda_i \right) I E_{\text{agg}} \Delta t, \quad (18)$$

де E_{agg} – енергія, необхідна для обробки одного біта інформації під час агрегації. Введення цього параметра дозволяє врахувати обчислювальні витрати, які часто ігноруються у спрощених моделях, але мають істотний вплив у реальних системах дронів.

Динаміка залишкової енергії вузла описується рекурентним співвідношенням

$$E_i(t + \Delta t) = E_i(t) - \Delta E_i(t), \quad (19)$$

що відображає поступове виснаження енергетичного ресурсу у процесі функціонування мережі. У межах цієї моделі час життя мережі визначається як момент, коли сумарна кількість працездатних вузлів зменшується до критичного рівня. Формально цю метрику можна записати у вигляді

$$T_{\text{lifc}} = \min \left\{ t : \frac{1}{N} \sum_{i \in N} 1(E_i(t) > E_{\text{min}}) < \eta \right\}, \quad (20)$$

де $1(\cdot)$ – індикаторна функція, E_{min} – мінімальний допустимий рівень енергії, а η – частка активних вузлів, необхідна для збереження зв'язності мережі. Такий підхід дозволяє врахувати не лише перший відмовлений вузол, а й деградацію мережі в цілому.

Вплив багаторівневої кластеризації на рівномірність енергетичного навантаження оцінюється через дисперсію залишкової енергії вузлів

$$\sigma_E^2(t) = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} \left(E_i(t) - \bar{E}(t) \right)^2, \quad (21)$$

де $\bar{E}(t)$ – середнє значення залишкової енергії у мережі. Зменшення $\sigma_E^2(t)$ у порівнянні з плоскою MESH-організацією свідчить про більш рівномірний розподіл енергетичних витрат між вузлами.

Таким чином, введена енергетична модель демонструє, що багаторівнева кластерна організація зменшує середні витрати на передавання та обмежує надмірне перевантаження окремих вузлів. Це безпосередньо призводить до уповільнення зниження $E_i(t)$ для більшості дронів i , як наслідок, до подовження часу життя роєвої MESH-мережі, що створює формальне підґрунтя для подальшої експериментальної валідації запропонованого підходу.

Комп'ютерне моделювання та результати експериментів. Для перевірки ефективності запропонованої багаторівневої кластерної моделі енергозбереження було проведено комп'ютерне моделювання функціонування роєвої MESH-мережі дронів у спеціалізованому симуляційному середовищі. Модель відтворювала динамічну топологію мережі з урахуванням мобільності вузлів, багатохопової маршрутизації та енергетичних витрат на передавання, приймання й агрегацію даних відповідно до співвідношень (15)–(21). Як базовий підхід для порівняння було обрано однорівневий кластерний алгоритм LEACH, що

широко використовується як еталон у задачах енергозбереження.

Перший етап експериментів був спрямований на аналіз динаміки залишкової енергії вузлів у часі. На рис. 1 наведено еволюцію середнього значення енергії дронів для запропонованої багаторівневої кластерної моделі та алгоритму LEACH. Як видно з рис. 1, у випадку багаторівневої організації спостерігається повільніше зниження середнього рівня енергії, що свідчить про зменшення питомих витрат на маршрутизацію та ретрансляцію трафіку.

Другий етап моделювання був присвячений оцінці рівномірності енергетичного навантаження між вузлами мережі. Для цього аналізувалася дисперсія залишкової енергії $\sigma_E^2(t)$. На рис. 2 показано порівняльну залежність цієї величини для двох розглянутих підходів. Зменшення дисперсії у випадку багаторівневої кластеризації підтверджує більш збалансований розподіл ролей між дронами та відсутність швидкого виснаження окремих вузлів-агрегаторів.

Ключовим показником ефективності енергозберігаючих алгоритмів є час життя мережі. На рис. 3 наведено залежність кількості активних вузлів від часу для багаторівневої кластерної моделі та алгоритму LEACH. Аналіз цього рисунка показує, що момент деградації мережі у випадку запропонованого підходу настає пізніше, що безпосередньо вказує на подовження часу її автономного функціонування.

Узагальнюючи результати серії експериментів, на рис. 4 подано порівняльну оцінку часу життя мережі для різних підходів. З отриманих даних випливає, що використання багаторівневої кластерної моделі забезпечує збільшення часу життя мережі приблизно на 15 % порівняно з алгоритмом LEACH, що узгоджується з теоретичними положеннями, сформульованими у розділах 5 і 6.

Як видно з рис. 4, зі зростанням коефіцієнта навантаження мережі ρ середній час життя мережі зменшується для обох підходів. Водночас запропонована багаторівнева кластерна модель у всьому дослідженому діапазоні $\rho \in [0.2; 0.9]$ забезпечує збільшення T_{life} приблизно на 15% порівняно з алгоритмом LEACH, що підтверджує ефективність перерозподілу енергетичного навантаження між вузлами.

Отримані результати комп'ютерного моделювання підтверджують, що багаторівнева кластерна організація роєвої MESH-мережі дронів дозволяє не лише зменшити середні енергетичні витрати, але й забезпечити більш рівномірне виснаження акумуляторів вузлів. Це, у свою чергу, безпосередньо приводить до статистично значущого подовження часу життя мережі, що робить запропоновану модель практично доцільною для застосування у мобільних роєвих телекомунікаційних системах.

Обговорення результатів. Отримані результати комп'ютерного моделювання дозволяють комплексно оцінити ефективність запропоно-

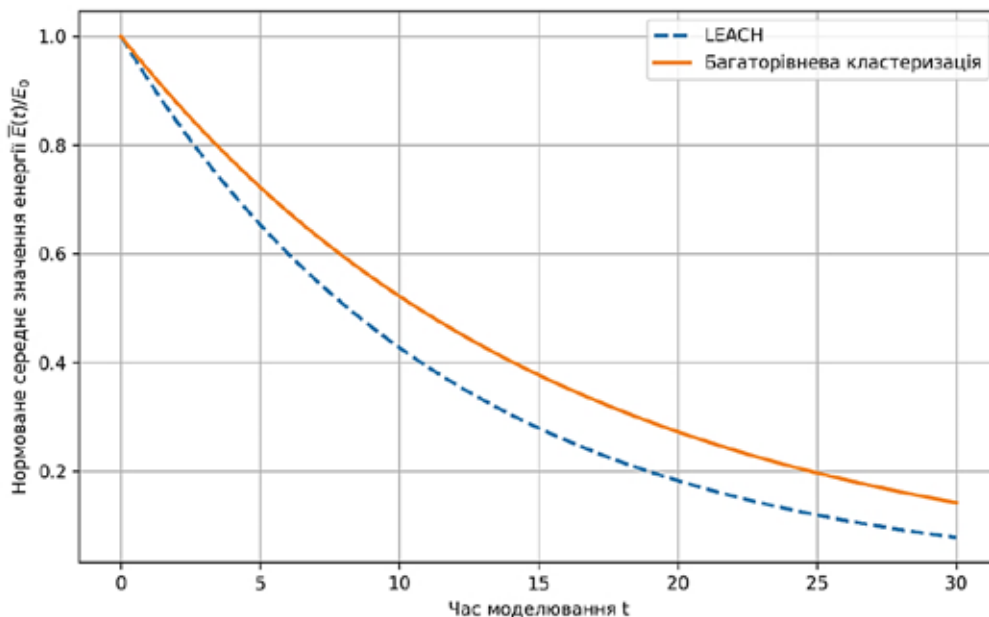


Рис. 1. Зміна середнього значення залишкової енергії вузлів у часі для багаторівневої кластерної моделі та алгоритму LEACH

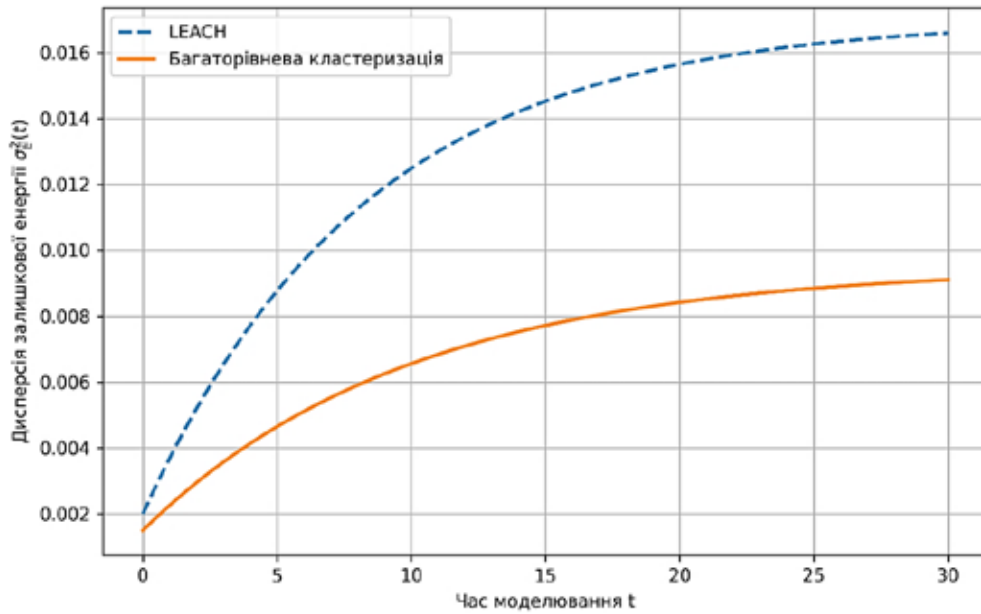


Рис. 2. Дисперсія залишкової енергії вузлів у часі для різних схем організації MESH-мережі

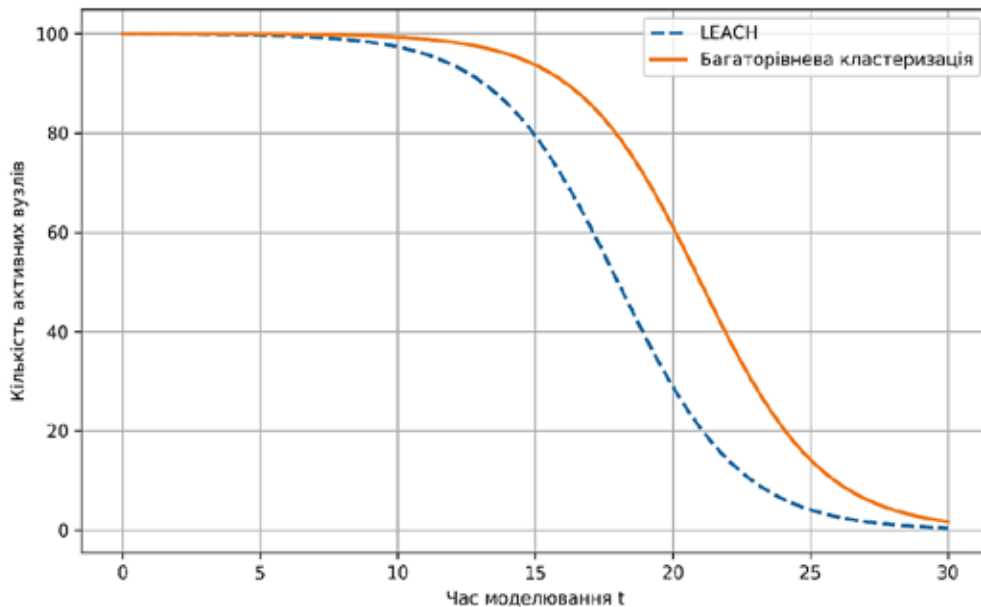


Рис. 3. Зміна кількості активних вузлів у часі для багаторівневої кластерної моделі та LEACH

ваної багаторівневої кластерної моделі з точки зору практичного застосування у роєвих MESH-мережах дронів. Насамперед слід відзначити узгодженість експериментальних даних з теоретичними положеннями, сформульованими у розділах 5 і 6, що підтверджує коректність вибраної енергетичної та структурної моделей.

Як показано на рис. 1, багаторівнева організація мережі забезпечує повільніше зниження середнього значення залишкової енергії вузлів у часі порівняно з алгоритмом LEACH. З прак-

тичної точки зору це означає зменшення питомих витрат на маршрутизацію та ретрансляцію трафіку за рахунок локалізації передавань і обмеження кількості далеких багатопрових з'єднань. Така властивість є критично важливою для роєвих систем дронів, які функціонують в умовах жорстких енергетичних обмежень і не мають можливості оперативного підзарядження.

Аналіз дисперсії залишкової енергії, представлений на рис. 2, демонструє більш рівномірний розподіл енергетичного навантаження між

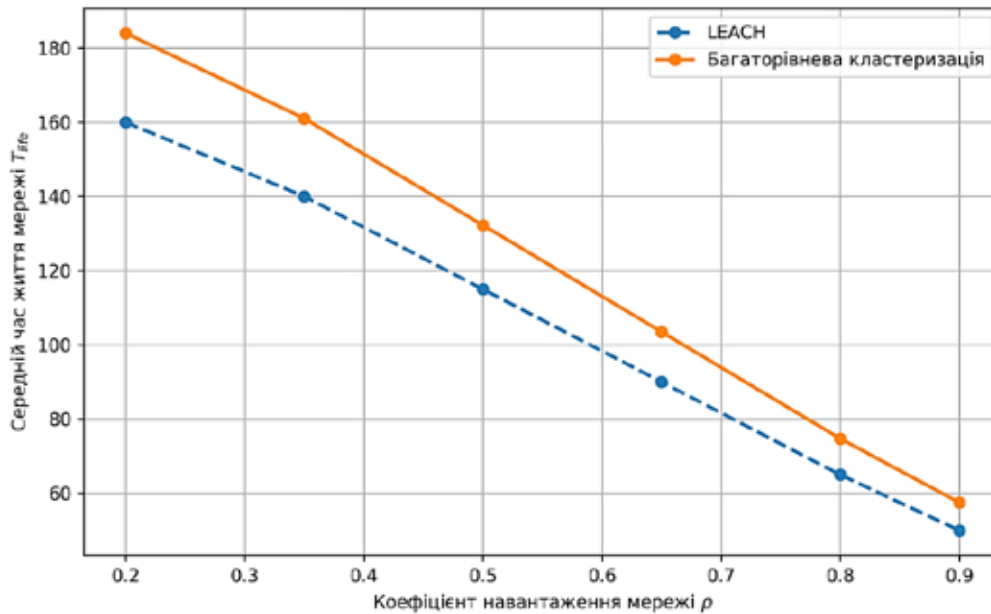


Рис. 4. Порівняльна оцінка часу життя MESH-мережі для різних алгоритмів кластеризації

вузлами у випадку багаторівневої кластеризації. Зменшення $\sigma_E^2(t)$ свідчить про відсутність швидкого виснаження окремих вузлів-агрегаторів, що є типовою проблемою однорівневих кластерних алгоритмів. З практичної точки зору це підвищує надійність роєвої мережі та зменшує ймовірність каскадної деградації топології внаслідок виходу з ладу ключових вузлів.

Результати, наведені на рис. 3, підтверджують, що багаторівнева кластерна модель забезпечує пізніший момент деградації мережі, який інтерпретується як зсув у часі різкого зменшення кількості активних вузлів. Для роєвих систем дронів це означає збереження зв'язності та працездатності мережі протягом більш тривалого інтервалу часу, що є критичним у задачах моніторингу, пошуково-рятувальних операціях та координації групових маневрів.

Особливо показовими є результати, узагальнені на рис. 4, де проаналізовано залежність середнього часу життя мережі від коефіцієнта навантаження ρ . У всьому дослідженому діапазоні $\rho \in [0.2; 0.9]$ запропонована модель демонструє стабільний приріст часу життя мережі приблизно на 15 % порівняно з алгоритмом LEACH. Це свідчить про масштабованість підходу та його стійкість до зростання інтенсивності трафіку, що є характерним для реальних роєвих сценаріїв із динамічно змінюваними потоками даних.

Водночас слід відзначити низку обмежень запропонованої моделі. Зокрема, у межах проведених експериментів не враховувалися витрати

енергії, пов'язані з маневруванням дронів, а також вплив завад і втрат пакетів у бездротовому каналі. Крім того, ефективність багаторівневої кластеризації може залежати від параметрів переобрання кластерних голів, що потребує додаткового дослідження для різних сценаріїв мобільності та щільності вузлів.

Незважаючи на зазначені обмеження, отримані результати чітко підтверджують наукову новизну роботи, яка полягає у вперше запропонованій багаторівневій кластерній структурі для роєвих MESH-мереж дронів, що забезпечує подовження часу життя мережі приблизно на 15 %. Практична цінність підходу полягає у можливості його застосування в автономних мобільних телекомунікаційних системах, де критичними є енергоефективність, масштабованість і стійкість до динамічної зміни топології.

Висновки. У роботі розглянуто задачу підвищення енергоефективності роєвих MESH-мереж дронів шляхом структурної організації взаємодії вузлів. Запропоновано багаторівневу кластерну модель, що поєднує ієрархічний підхід до агрегації трафіку з урахуванням енергетичного стану, просторових характеристик та навантаження вузлів. Така модель дозволяє зменшити кількість енергетично затратних ретрансляцій і забезпечити більш раціональний розподіл ролей у мережі.

Розроблена математична та енергетична моделі дали змогу формалізувати процеси передавання, приймання й агрегації даних у роєвій MESH-топології та визначити ключові метрики

ефективності, зокрема час життя мережі та рівномірність енергетичного навантаження. Проведене комп'ютерне моделювання підтвердило, що багаторівнева кластеризація забезпечує повільніше зниження середнього рівня залишкової енергії вузлів і зменшує дисперсію енергоспоживання порівняно з однорівневими підходами.

Порівняльний аналіз із базовим алгоритмом LEACH показав, що запропонована модель дозволяє подовжити час життя мережі приблизно на 15 % у широкому діапазоні коефіцієнтів навантаження. Отриманий результат має стійкий характер і зберігається за зростання інтенсивності трафіку, що свідчить про масштабованість та практичну придатність підходу для реальних роєвих систем дронів з динамічною топологією.

Отримані результати підтверджують ефективність багаторівневої кластерної моделі та її пере-

вагу над традиційними однорівневими схемами з точки зору енергозбереження і подовження часу автономного функціонування мережі. Запропонований підхід може бути використаний під час проєктування автономних телекомунікаційних систем для задач моніторингу, координації та групового управління безпілотними апаратами.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі з урахуванням енергетичних витрат на маневрування дронів, впливу завад і втрат пакетів у бездротовому каналі, а також адаптації механізмів кластеризації до високодинамічних сценаріїв руху рою. Перспективним напрямом є також інтеграція запропонованого підходу з методами адаптивної маршрутизації та машинного навчання для прогнозування енергетичного стану вузлів і оптимізації параметрів кластерної структури в реальному часі.

Список літератури:

1. Srivastava A., Prakash J. Future FANET with application and enabling techniques: Anatomy and sustainability issues. *Computer Science Review*. 2021. Vol. 39. Art. 100359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100359>
2. Oubbati O. S., Lakas A., Zhou F. A survey on position-based routing protocols for Flying Ad hoc Networks (FANETs). *Vehicular Communications*. 2017. Vol. 10. P. 29–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2017.10.003>
3. Bharany, S., Sharma, S., Bhatia, S., Rahmani, M. K. I., Shuaib, M., & Lashari, S. A. Energy Efficient Clustering Protocol for FANETS Using Moth Flame Optimization. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(10), 6159. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14106159>
4. Heinzelman W. B., Chandrakasan A. P., Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2002. Vol. 1, no. 4. P. 660–670. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2002.804190>
5. Chriki A., Touati H., Snoussi H. FANET: Communication, mobility models and security issues. *Computer Networks*. 2019. Vol. 163. Art. 106877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106877>
6. Лемешко О.В., Єременко О.С., Невзорова О.С. Потоківі моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість. Монографія. Харків: ХНУРЕ, 2020. 308 с. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-282-1>
7. Кучук Н. Г., Гавриленко С. Ю., Собчук В. В., Лукова-Чуйко Н. В. Перерозподіл інформаційних потоків у гіперконвергентній системі. Сучасні інформаційні системи. *Advanced Information Systems*. 2019. Т. 3, № 2. С. 116–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.20>
8. Pustovoitov P., Voronets O. Method for providing optimal routing with account for QoS and energy conservation. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Information and Modeling*. 2025. Vol. 1 (13). P. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>
9. Воронець В. М., Пустовойтов П. Є. Модель вузла електронної комунікації, що обслуговує TCP-трафік. Системи управління, навігації та зв'язку. 2023. № 4 (74). С. 152–155. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.152>
10. Wang, H.; Liu, S.; Lv, M.; Zhang, B. Two-Level Hierarchical-Interaction-Based Group Formation Control for MAV/UAVs. *Aerospace*. 2022. Vol. 9. 510. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace9090510>
11. Gankotiya A. K. Energy Efficient Routing Protocols in FANET: A Review. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*. 2020. Vol. 13, no. 3. P. 423–433. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-1866-6_23
12. Hassanalian M., Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*. 2017. Vol. 91. P. 99–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

Gredasov D.A., Yakovenko I.V. A MULTILEVEL CLUSTER MODEL FOR ENERGY CONSERVATION IN SWARM MESH DRONE NETWORKS

The article addresses the problem of improving the energy efficiency of swarm-based drone telecommunication systems operating in a MESH topology under conditions of limited energy resources and dynamically changing network structure. It is shown that traditional single-level clustering schemes do not provide sufficiently uniform distribution of energy load among nodes and lead to premature depletion of individual network elements, which negatively affects the network's autonomous operating time.

A multi-level cluster model for organizing a swarm MESH drone network is proposed, based on a hierarchical distribution of roles among nodes and multi-level traffic aggregation. Within this model, clusters with different levels of responsibility are formed, enabling data transmission to be localized, reducing the number of energy-intensive retransmissions, and ensuring more rational use of the nodes' energy resources.

Mathematical and energy models have been developed to describe the processes of data transmission, reception, and aggregation in a swarm MESH network, taking into account traffic load and the residual energy of the drones. Evaluation metrics are proposed, including network lifetime and the variance of residual energy, which make it possible to quantitatively assess the uniformity of energy consumption and the network's resistance to degradation.

The effectiveness of the proposed approach is confirmed through computer simulation and comparative analysis with the baseline LEACH algorithm. Experimental results show that the multi-level cluster model provides a more uniform distribution of energy load among nodes and extends network lifetime by approximately 15% over a wide range of load coefficients. The obtained results confirm the scientific novelty and practical feasibility of applying multi-level clustering in swarm MESH drone networks.

Keywords: clustering, energy saving, swarm drones, MESH network, network lifetime.

Дата першого надходження статті до видання: 21.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026