

**Якименко М.С.**

<https://orcid.org/0000-0003-3290-6088>

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Босько В.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-4933-9676>

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Бокій А.Р.**

<https://orcid.org/0009-0006-1426-261X>

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Лисенко І.А.**

<https://orcid.org/0000-0003-4394-4960>

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Мелешко Є.В.**

<https://orcid.org/0000-0001-8791-0063>

Центральноукраїнський національний технічний університет

## МЕТОДИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В MESH-МЕРЕЖАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

У статті досліджено сучасні методи енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, що функціонують в умовах обмежених енергетичних ресурсів вузлів, динамічної топології та зростаючих вимог до якості передачі даних. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення тривалості функціонування IoT-мереж, зниження енергоспоживання вузлів і забезпечення стабільності передачі інформації в розподілених середовищах.

Метою статті є систематизація існуючих підходів до енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, аналіз їх переваг і обмежень, а також визначення перспективних напрямів розвитку в даній області. У роботі виконано класифікацію методів маршрутизації за принципами організації та критеріями оптимізації, зокрема виділено кластеризаційні, ієрархічні (RPL-орієнтовані), балансувальні, QoS-орієнтовані, інтелектуальні та протокольні-орієнтовані підходи.

Проведений аналіз показав, що кластеризаційні методи забезпечують зниження енергоспоживання за рахунок агрегування даних, однак є чутливими до вибору вузлів-координаторів. Протоколи на основі RPL відзначаються стандартизованістю та широким застосуванням, проте не завжди ефективно використовують можливості Mesh-архітектури. Балансувальні методи дозволяють підвищити тривалість функціонування мережі шляхом рівномірного розподілу навантаження, але можуть збільшувати затримку передачі. Інтелектуальні підходи, засновані на алгоритмах машинного навчання та swarm intelligence, демонструють високий рівень адаптивності, проте обмежені складністю реалізації на ресурсно обмежених пристроях.

У результаті дослідження встановлено, що енергоефективна маршрутизація в IoT Mesh-мережах потребує комплексного врахування енергетичних, топологічних та трафікових характеристик мережі. Визначено, що перспективним напрямом є розроблення адаптивних багатокритеріальних методів маршрутизації, здатних забезпечити баланс між енергоефективністю, надійністю та обчислювальними витратами.

**Ключові слова:** Інтернет речей, Mesh-мережі, комп'ютерні мережі, бездротові сенсорні мережі, маршрутизація, енергоефективність, кластеризація, балансування навантаження, адаптивні алгоритми, QoS.

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) призводить до значного збільшення кількості підключених пристроїв, що функціонують у складі розподілених бездротових мереж. Одним із перспективних підходів до організації таких мереж є використання Mesh-архітектури, яка забезпечує підвищену надійність, масштабованість та здатність до самовідновлення за рахунок багатошляхової передачі даних.

Разом із тим, вузли IoT-мереж, як правило, характеризуються обмеженими енергетичними ресурсами, обчислювальною потужністю та пропускну здатністю каналів зв'язку. У таких умовах традиційні алгоритми маршрутизації, орієнтовані переважно на мінімізацію затримок або довжини маршруту, не забезпечують ефективного використання енергоресурсів мережі, що призводить до передчасного виходу з ладу окремих вузлів та зниження загальної функціональної стійкості системи.

Особливою актуальності набуває задача побудови енергоефективних методів маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, які враховують не лише топологічні характеристики мережі, але й енергетичний стан вузлів, інтенсивність трафіку та динаміку змін мережевого середовища. Існуючі підходи до вирішення цієї задачі часто є або надто спрощеними, або потребують значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх застосування в реальних IoT-системах.

Таким чином, виникає необхідність дослідження та вдосконалення методів і моделей енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, які забезпечують збалансоване використання ресурсів вузлів, підвищують тривалість функціонування мережі та зберігають прийнятний рівень якості обслуговування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних роботах підкреслюється, що традиційні алгоритми маршрутизації не враховують специфіку IoT-середовища, зокрема обмеженість ресурсів, динамічність топології та необхідність масштабованості [1, 2]. Значна частина досліджень присвячена вдосконаленню класичних протоколів маршрутизації для бездротових сенсорних мереж, які стали основою IoT [3, 8].

Зокрема, кластерні протоколи типу LEACH забезпечують зменшення енергоспоживання за рахунок агрегування даних і розподілу ролей між вузлами [3]. Подальший розвиток отримали протоколи на основі стандарту RPL, які використовують деревоподібну структуру маршрутизації

та дозволяють враховувати різні метрики, включаючи енергоспоживання, затримку та надійність передачі [4, 9].

Останні дослідження демонструють перехід до адаптивних методів маршрутизації, зокрема із застосуванням машинного навчання, еволюційних алгоритмів та swarm intelligence [5, 10, 11]. Такі підходи дозволяють динамічно змінювати маршрути залежно від стану мережі та залишкової енергії вузлів [12].

Окремий напрям пов'язаний із застосуванням Mesh-архітектури, яка забезпечує багатошляхову передачу даних і підвищену відмовостійкість мережі [6, 13]. У сучасних дослідженнях аналізуються також стандарти Zigbee, Thread та інші технології, орієнтовані на побудову IoT Mesh-мереж [7, 14].

Важливим аспектом є балансування навантаження між вузлами мережі, оскільки використання одних маршрутів призводить до нерівномірного виснаження енергоресурсів [8, 15]. У зв'язку з цим розробляються методи, що враховують залишкову енергію вузлів і стан каналів зв'язку [16, 17].

Також у сучасних роботах досліджуються питання безпеки та надійності маршрутизації в IoT Mesh-мережах, включаючи виявлення атак, забезпечення довіри та захист передачі даних [18, 19].

Незважаючи на значну кількість досліджень, універсального підходу до енергоефективної маршрутизації в IoT Mesh-мережах наразі не існує [1, 5, 20].

**Мета роботи.** Метою статті є дослідження та систематизація існуючих методів енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, аналіз їх ефективності з урахуванням обмежених енергетичних ресурсів вузлів, динаміки топології мережі та вимог до якості обслуговування, а також визначення переваг і обмежень цих методів.

**Виклад основного матеріалу.** Як показав аналіз публікацій, енергоефективна маршрутизація в Mesh-мережах Інтернету речей розвивається переважно у межах кількох основних підходів: кластеризаційних, ієрархічних, географічних, багатокритеріальних, інтелектуальних та балансувальних методів [1, 5, 8]. Їх спільною метою є зниження енергоспоживання вузлів, продовження часу функціонування мережі та збереження прийнятної якості передачі даних.

Одним із найвідоміших підходів є кластеризаційна маршрутизація, представлена протоколом LEACH та його модифікаціями [3]. У таких

методах вузли мережі об'єднуються у кластери, а окремі з них виконують роль голів кластерів, агрегуючи дані та передаючи їх далі. Перевагою цього підходу є зменшення кількості прямих передач і, відповідно, зниження енергоспоживання. Водночас ефективність LEACH значною мірою залежить від правильного вибору голів кластерів, а при нерівномірному розподілі навантаження окремі вузли можуть швидко виснажувати свій енергетичний ресурс [3, 8, 12].

Інший поширений напрям становлять протоколи на основі RPL, які широко застосовуються в IoT-мережах із малопотужними й ненадійними каналами зв'язку [4, 9]. Їх перевагою є підтримка стандартизованої маршрутизації в мережах IPv6 та можливість використання різних цільових функцій для врахування енергії, затримки, якості каналу та інших параметрів. Разом із тим RPL зазвичай орієнтований на деревоподібну структуру маршрутів, що не завжди повною мірою реалізує потенціал Mesh-мережі з її багатошляховістю та самовідновленням [4, 9].

В окрему групу доцільно виділити методи балансування навантаження, у яких вибір маршруту виконується з урахуванням залишкової енергії вузлів і рівномірного розподілу трафіку [8, 15, 16]. Такі підходи зменшують ймовірність передчасного виходу з ладу найбільш навантажених вузлів і сприяють підвищенню загальної тривалості життя мережі. Однак вони можуть супроводжуватися зростанням затримки передачі, оскільки енергооптимальний маршрут не завжди є найкоротшим [16, 17].

Значний інтерес у сучасних дослідженнях викликають інтелектуальні методи маршрутизації, засновані на *swarm intelligence*, генетичних алгоритмах, нечіткій логіці та машинному навчанні [5, 10, 11]. Їх перевага полягає в адаптивності до змін топології мережі, навантаження та енергетичного стану вузлів. Такі методи дозволяють розглядати маршрутизацію як задачу багатокритеріальної оптимізації, де одночасно враховуються енергоспоживання, затримка, надійність і пропускна здатність. Водночас реалізація подібних алгоритмів у реальних IoT-пристроях обмежується їх обчислювальною складністю та вимогами до пам'яті [5, 10].

Окремий практичний напрям пов'язаний із застосуванням Mesh-архітектури в стандартах Zigbee, 6LoWPAN і Thread [7, 14]. У цих технологіях енергоефективність досягається не лише на рівні алгоритмів маршрутизації, а й за рахунок оптимізації протоколів доступу до середовища, коротких пакетів, сплячих режимів і локальної ретрансляції даних. Проте в таких системах методи маршрутизації зазвичай тісно прив'язані до конкретного протоколу, що обмежує їх універсальність [7, 14].

Таким чином, аналіз існуючих методів показує, що кожен із підходів має свої переваги та обмеження. Кластеризаційні методи забезпечують простоту та зменшення енергоспоживання, але чутливі до вибору вузлів-агрегаторів; RPL-підходи добре інтегруються з IoT-інфраструктурою, але тяжіють до ієрархічної організації; балансувальні методи покращують розподіл ресурсу вузлів, проте можуть збільшувати довжину маршрутів; інтелектуальні алгоритми є найбільш адаптивними, але вимагають більших обчислювальних ресурсів [3–5, 8–11, 15, 16]. Отже, вибір методу енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей повинен визначатися не лише рівнем енергозбереження, а й вимогами до масштабованості, затримки, складності реалізації та особливостей конкретного середовища застосування.

Наведене порівняльне дослідження показує, що найбільш простими для реалізації є кластерні та стандарто-орієнтовані методи, однак вони не завжди забезпечують достатню адаптивність у динамічних Mesh-мережах. Найбільш перспективними з погляду якості прийняття рішень є багатокритеріальні, *swarm*- та AI-орієнтовані підходи, оскільки вони дозволяють одночасно враховувати енергетичний стан вузлів, якість каналів і параметри трафіку [5, 10, 11]. Разом із тим для реальних IoT-систем критичним залишається компроміс між ефективністю маршрутизації та складністю її реалізації на обмежених за ресурсами пристроях [1, 2, 8]. Тому в практичних сценаріях доцільним є поєднання простих енергоорієнтованих механізмів із адаптивними критеріями вибору маршруту, що дозволяє досягти прийняттого балансу між енергоефективністю, надійністю та обчислювальними витратами.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження встановлено, що енергоефективна маршрутизація є одним із ключових факторів забезпечення ефективного функціонування Mesh-мереж Інтернету речей, оскільки більшість вузлів таких мереж характеризується обмеженими енергетичними ресурсами та працює в умовах динамічної топології.

Показано, що існуючі методи енергоефективної маршрутизації можуть бути умовно поділені на кілька основних груп: кластеризаційні, ієрархічні (зокрема RPL), балансувальні, QoS-орієнтовані, інтелектуальні (на основі *swarm intelligence* та машинного навчання), а також протокольно-орієнтовані рішення, реалізовані в сучасних IoT-стандартах. Визначено, що кожен із підходів має власні переваги та обмеження, пов'язані з рівнем енергоефективності, складністю реалізації, адаптивністю та здатністю працювати в умовах динамічної мережі.

Встановлено, що кластерні та RPL-подібні методи є найбільш поширеними завдяки віднос-

**Порівняльна характеристика методів  
енергоефективної маршрутизації в IoT Mesh-мережах**

№	Метод / підхід	Принцип роботи	Основні переваги	Основні недоліки
1	LEACH та LEACH-подібні кластерні методи [3, 8, 12]	Об'єднання вузлів у кластери, передача даних через голови кластерів	Зменшення кількості передач, агрегування даних, зниження енергоспоживання	Нерівномірне навантаження на голови кластерів, залежність від механізму їх вибору
2	RPL-підходи [4, 9]	Побудова ієрархічного маршрутизуючого графа для малопотужних мереж	Стандартизованість, підтримка IPv6, можливість використання різних метрик	Обмежена гнучкість у чисто mesh-сценаріях, залежність від цільових функцій
3	Балансувальні енергоорієнтовані методи [8, 15, 16]	Вибір маршруту з урахуванням залишкової енергії вузлів	Подовження часу життя мережі, запобігання перевантаженню окремих вузлів	Можливе збільшення затримки та довжини маршруту
4	QoS-орієнтовані методи [17]	Урахування енергії, затримки, надійності та пропускну здатності	Компроміс між якістю обслуговування та енергоефективністю	Більша складність вибору маршруту
5	Swarm intelligence / еволюційні методи [5, 11]	Оптимізація маршрутів на основі колективної поведінки або еволюційного пошуку	Адаптивність, багатокритеріальна оптимізація, гнучкість	Значні обчислювальні витрати
6	AI / ML-орієнтовані методи [10]	Побудова маршрутів на основі прогнозування стану мережі та навчання	Висока адаптивність, можливість врахування багатьох параметрів	Складність реалізації на малопотужних вузлах, потреба в даних для навчання
7	Протокольні-орієнтовані Mesh-рішення (Zigbee, Thread, 6LoWPAN) [7, 14]	Використання вбудованих механізмів маршрутизації в IoT-стандартах	Практична придатність, сумісність із реальними IoT-пристроями	Обмежена універсальність, залежність від конкретної технології

ній простоті та стандартизованості, проте вони не завжди забезпечують ефективне балансування навантаження в Mesh-мережах. Балансувальні підходи дозволяють підвищити тривалість функціонування мережі за рахунок рівномірного використання ресурсів вузлів, однак можуть призводити до збільшення затримок передачі. Інтелектуальні методи демонструють найвищий потенціал адаптивності та багатокритеріальної оптимізації, але їх практичне застосування обмежується обчислювальними ресурсами IoT-пристроїв.

Узагальнено, що ефективна енергоефективна маршрутизація в Mesh-мережах Інтернету речей повинна враховувати не лише залишкову енергію вузлів, але й топологічні характеристики мережі, інтенсивність трафіку, якість каналів зв'язку та вимоги до

якості обслуговування. При цьому ключовим є досягнення компромісу між енергоефективністю, затримкою, надійністю та складністю реалізації алгоритмів.

Визначено, що перспективним напрямом розвитку є розробка адаптивних методів маршрутизації, які поєднують прості енергоорієнтовані механізми з елементами інтелектуального аналізу стану мережі, що дозволяє забезпечити ефективне функціонування IoT Mesh-мереж у реальних умовах експлуатації. Напрямок подальших досліджень полягає у створенні узагальнених моделей енергоефективної маршрутизації, здатних інтегрувати багатокритеріальні показники функціонування мережі, забезпечити адаптивність до змін середовища та бути придатними для реалізації на ресурсно обмежених пристроях Інтернету речей.

#### Список літератури:

1. Akkaya K., Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*. 2005. Vol. 3(3). P. 325–349. DOI: 10.1016/j.adhoc.2003.09.010.
2. Mansour M., Gamal A., Ahmed A. I., Said L. A., Elbaz A., Herencsar N., Soltan A. Internet of Things: A Comprehensive Overview on Protocols, Architectures, Technologies, Simulation Tools, and Future Directions. *Energies*. 2023. Vol. 16(8). Art. 3465. DOI: 10.3390/en16083465.
3. Heinzelman W. R., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. IEEE. 2000. P. 1–10. DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982.
4. Winter T., Thubert P., Brandt A., Hui J., Kelsey R., Levis P., Pister K., Struik R., Vasseur J., Alexander R. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. *RFC 6550*. IETF. 2012. DOI: 10.17487/RFC6550.
5. Kaur L., Kaur R. A survey on energy efficient routing techniques in WSNs focusing IoT applications and enhancing fog computing paradigm. *Global Transitions Proceedings*. 2021. Vol. 2(2). P. 520–529. DOI: 10.1016/j.gltp.2021.08.001.

6. Cilfone A., Davoli L., Belli L., Ferrari G. Wireless Mesh Networking: An IoT-Oriented Perspective Survey on Relevant Technologies. *Future Internet*. 2019. Vol. 11(4). Art. 99. DOI: 10.3390/fi11040099.
7. Connectivity Standards Alliance. *Zigbee Specification*. Revision 23. 15 March 2023. URL: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf>
8. Behera T. M., Samal U. C., Mohapatra S. K., Khan M. S., Appasani B., Bizon N., Thounthong P. Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: Architectures, Strategies, and Performance. *Electronics*. 2022. Vol. 11(15). Art. 2282. DOI: 10.3390/electronics11152282.
9. Darabkh K. A., Al-Akhras M., Zomot J. N., Atiquzzaman M. RPL routing protocol over IoT: A comprehensive survey, recent advances, insights, bibliometric analysis, recommendations, and future directions. *Journal of Network and Computer Applications*. 2022. Vol. 207. Art. 103476. DOI: 10.1016/j.jnca.2022.103476.
10. Gaidhani A. R., Potgantwar A. D. A Review of Machine Learning-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Network Lifetime. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 59(1). Art. 231. DOI: 10.3390/engproc2023059231.
11. Del-Valle-Soto C., Rodríguez A., Ascencio-Piña C. R. A survey of energy-efficient clustering routing protocols for wireless sensor networks based on metaheuristic approaches. *Artificial Intelligence Review*. 2023. Vol. 56(9). P. 9699–9770. DOI: 10.1007/s10462-023-10402-w.
12. Abadi A. F. E., Asghari S. A., Marvasti M. B., Abaei G., Nabavi S., Savaria Y. Reinforcement-Learning-Based Energy Efficient Control and Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 44123–44135. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3167058.
13. Zhang Y., Luo J., Hu H. (Eds.). *Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards*. CRC Press, 2007.
14. Thread Group. *Thread 1.3.0 Public Specification*. 2023. URL: <https://www.threadgroup.org/ThreadSpec>
15. Ogundile O. O., Alfa A. S. A survey on an energy-efficient and energy-balanced routing protocol for wireless sensor networks. *Sensors*. 2017. Vol. 17(5). Art. 1084. DOI: 10.3390/s17051084.
16. Shah R. C., Rabaey J. M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. 2002. DOI: 10.1109/WCNC.2002.993520.
17. Chen D., Varshney P. K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey. *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)*. 2004. Vol. 1. P. 227–233.
18. Tournier J., Lesueur F., Le Mouël F., Guyon L., Ben-Hassine H. A survey of IoT protocols and their security issues through the lens of a generic IoT stack. *Internet of Things*. 2020. Vol. 16. Art. 100264. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100264.
19. Dritsas E., Trigka M. A Survey on Cybersecurity in IoT. *Future Internet*. 2025. Vol. 17(1). Art. 30. DOI: 10.3390/fi17010030.
20. Khan R., Khan S. U., Zaheer R., Khan S. Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges. *Proceedings of the 10th International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*. IEEE. 2012. P. 257–260. DOI: 10.1109/FIT.2012.53

#### **Yakymenko M.S., Bosko V.V., Boki A.R., Lysenko I.A., Meleshko Ye.V. METHODS OF ENERGY-EFFICIENT ROUTING IN MESH NETWORKS OF THE INTERNET OF THINGS**

*The article investigates modern methods of energy-efficient routing in mesh networks of the Internet of Things (IoT), operating under conditions of limited energy resources of nodes, dynamic topology, and increasing requirements for data transmission quality. The relevance of the study is обусловлена the need to extend the lifetime of IoT networks, reduce node energy consumption, and ensure stable data transmission in distributed environments.*

*The aim of the article is to systematize existing approaches to energy-efficient routing in IoT mesh networks, analyze their advantages and limitations, and identify перспективні directions for further development in this field. The study presents a classification of routing methods based on organizational principles and optimization criteria, including clustering-based, hierarchical (RPL-based), load-balancing, QoS-oriented, intelligent, and protocol-oriented approaches.*

*The analysis shows that clustering methods reduce energy consumption through data aggregation but are sensitive to the selection of cluster heads. RPL-based protocols are standardized and widely adopted; however, they do not always fully exploit the capabilities of mesh architectures. Load-balancing methods increase network lifetime by distributing traffic more evenly, though they may lead to higher transmission delays. Intelligent approaches, based on machine learning and swarm intelligence algorithms, demonstrate high adaptability but are limited by implementation complexity on resource-constrained devices.*

*The results indicate that effective energy-efficient routing in IoT mesh networks requires comprehensive consideration of energy, topological, and traffic-related characteristics of the network. It is determined that a promising research direction is the development of adaptive multi-criteria routing methods capable of balancing energy efficiency, reliability, and computational costs.*

**Keywords:** IoT, mesh networks, wireless sensor networks, computer networks, routing, energy efficiency, clustering, load balancing, adaptive algorithms, QoS.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026