

ПИРИГ ЯРОСЛАВ

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0001-2104-8439>e-mail: yaroslav.r.pyrih@lpnu.ua**ПИРИГ ЮЛІЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-8973-4005>e-mail: yuliia.v.klymash@lpnu.ua

АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційно-комунікаційних технологій зростає потреба у забезпеченні ефективної та надійної маршрутизації даних у сучасних мережах. З огляду на різноманітність архітектур мереж постає завдання оптимального вибору стратегії маршрутизації, що дозволяє задовольнити специфічні вимоги до затримки, пропускної здатності, енергоефективності та відмовостійкості. У роботі представлено класифікацію стратегій маршрутизації даних для безпроводних сенсорних мереж та здійснено аналіз аспектів їх застосування. Правильно обрана стратегія дозволить оптимально використовувати мережеві ресурси та відповідати вимогам конкретної області застосування безпроводних сенсорних мереж.

Ключові слова: маршрутизація, безпроводна сенсорна мережа, класифікація, сенсорний вузол.

PYRIH YAROSLAV, PYRIH YULIYA

Lviv Polytechnic National University

ANALYSIS OF DATA ROUTING STRATEGIES FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Amid the rapid development of information and communication technologies, there is an increasing demand for efficient and reliable data routing in next-generation computer and telecommunication systems. Wireless Sensor Networks (WSNs), which are widely applied across various domains – from environmental monitoring to healthcare and industrial automation – require a customized approach to routing strategy selection due to their constrained energy resources, dynamic topologies, and high node densities. Given the growing diversity of network architectures and the rising performance requirements, it becomes essential to identify optimal routing mechanisms capable of balancing delivery latency, throughput, energy consumption, and fault tolerance. This paper presents a structured review and analysis of recent studies dedicated to data transmission characteristics in WSNs. Particular attention is given to the importance of routing strategy classification in the context of designing an efficient WSN architecture, as it enables not only the systematization of existing solutions but also the justification of the most appropriate approach based on the network parameters. A comprehensive classification of routing strategies is shown, including: by route discovery method (proactive, reactive, hybrid), by network architecture (flat, hierarchical, location-based); by operational model (multipath, query-based, negotiation-based, QoS-based, and data-centric (further categorized into coherent and non-coherent approaches); by communication initiator (source-based and destination-based). The study explores the implementation specifics of each strategy, highlighting their advantages and potential limitations in the context of WSNs operating under energy and computational constraints. It has been found that the choice of an appropriate routing strategy significantly affects data transmission efficiency, network stability, delivery delays, and energy expenditure – key parameters for the practical deployment of WSNs across application areas ranging from environmental monitoring to industrial systems. The results obtained in this review may be used to improve routing algorithms and adapt them to specific operational conditions of sensor networks.

Keywords: routing, wireless sensor network, classification, sensor node.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 02.05.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційно-комунікаційних технологій зростає потреба у забезпеченні ефективної та надійної маршрутизації даних у сучасних мережах. З огляду на різноманітність архітектур мереж постає завдання оптимального вибору стратегії маршрутизації, що дозволяє задовольнити специфічні вимоги до затримки, пропускної здатності, енергоефективності та відмовостійкості.

Існуючі підходи до маршрутизації мають свої переваги й обмеження, що залежать від характеру трафіку, топології мережі, інтенсивності її динаміки та обчислювальних ресурсів вузлів. Незважаючи на значну кількість досліджень, їх аналіз є досі актуальним. Це зумовлено зростаючим попитом на розгортання інфокомунікаційних мереж у критично важливих галузях, зокрема в інтелектуальних транспортних системах, охороні здоров'я, військових технологіях, сільському господарстві, «розумному місті» тощо [1,2]. В умовах обмежених енергетичних, обчислювальних та комунікаційних ресурсів сенсорних вузлів надзвичайно важливо забезпечити передавання даних. Методи маршрутизації повинні враховувати такі фактори, як щільність вузлів, частота генерації даних, рівень мобільності, топологічна надійність, необхідність балансування навантаження тощо. З огляду на це, аналіз стратегій маршрутизації даних є важливим для підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж.

Аналіз досліджень та публікацій

Безпроводна сенсорна мережа (БСМ) є видом децентралізованої телекомунікаційної системи завдяки своїй здатності до самоорганізації, локальної обробки даних, гнучкій масштабованості та стійкості до відмов. Її децентралізована архітектура дозволяє ефективно працювати в умовах обмежених ресурсів та забезпечує високу надійність і адаптивність до динамічних умов середовища.

Основним елементом такої мережі є сенсорний вузол (СВ), який здійснює вимірювальну, обчислювальну та комунікаційну функції. СВ через технічні особливості своєї будови володіють обмеженими обчислювальними ресурсами, такими як обсяг пам'яті, потужність трансивера, обмежений ресурс батареї тощо. Саме тому досі актуальним напрямком досліджень є протоколи доставки інформації, використання яких дозволяє ефективно застосовувати ресурси вузлів БСМ, що в свою чергу позитивно впливає на тривалість часу життя такої мережі. Це питання активно досліджується у ряді робіт, зокрема в [3] розглянуто математичну модель впливу факторів погіршення каналу на стратегію маршрутизації високошвидкісних мереж.

Робота [4] присвячена самоорганізованій маршрутизації на основі глибокого навчання з підкріпленням (DRL). За умов обмеженої інформації про трафік пропонується рішення використовувати винагороди для гармонізації непрямих взаємодій між транспортними засобами шляхом спільного вивчення індивідуальної та загальної ефективності. Автори [5] досліджують підвищення якості обслуговування (QoS) у БСМ за допомогою методів машинного навчання для оптимізації протоколів маршрутизації. Показано, що у порівнянні із традиційними методами маршрутизації пропонується рішення позитивно впливає на тривалість життя мережі, енергоефективність та мінімізацію затримок. У [6] представлено метод маршрутизації на основі протоколу LEACH та алгоритму Дейкстри для врахування енергії поточного вузла, щільності кластера, що дозволяє уникнути короткого часу життя мережі завдяки ефективному балансуванню енергетичного навантаження.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: аналіз особливостей застосування стратегій маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах для виявлення переваг, недоліків та доцільності їх використання у конкретних сценаріях.

Виклад основного матеріалу

Для забезпечення ефективної передачі даних у сучасних безпроводних мережах використовуються різноманітні стратегії маршрутизації, вибір яких обумовлюється багатьма факторами. На рис. 1 представлено варіант їх класифікації. Розглянемо особливості функціонування стратегій маршрутизації на основі способу визначення маршрутів [7]. При проактивній маршрутизації маршрути даних формуються та оновлюються завчасно, використовуючи узгоджені і точні таблиці маршрутизації мережеских вузлів, які оновлюються при виникненні будь-яких змін у мережі, наприклад додавання / видалення вузлів тощо. Ідея такої стратегії базується на наявності актуальних маршрутів у довільний момент часу, що дозволить при потребі оперативно здійснювати передачу даних.

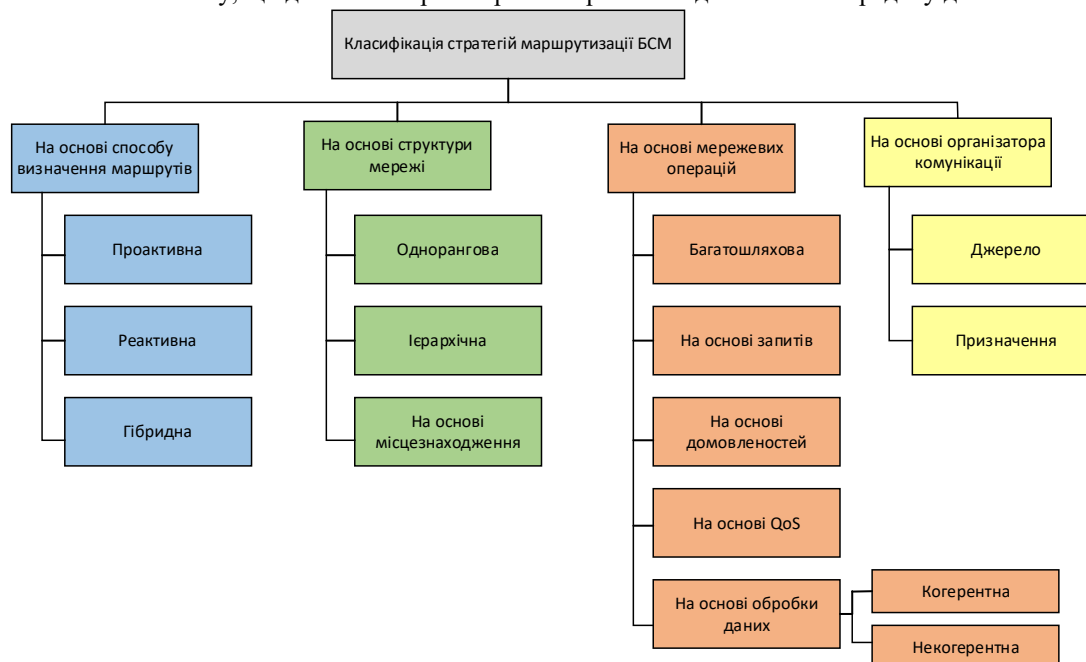


Рис. 1. Класифікація стратегій для забезпечення маршрутизації у БСМ

Основними перевагами проактивної маршрутизації є забезпечення низьких затримок у процесі передачі даних завдяки наявності наперед визначених маршрутів та стабільності роботи мережі завдяки оперативному реагуванню на зміни у топології. Проте використання даної стратегії характеризується використанням значних обчислювальних / мережеских ресурсів, що негативно впливає на величину

енергоспоживання.

Протоколи на основі проактивної маршрутизації можуть застосовуватись для однорангових та ієрархічних мережах, зокрема для додатків, які потребують мінімальної затримки у процесі своєї роботи. Проактивна маршрутизація найбільш ефективна у мережах, топологія яких є стабільною або змінюється нечасто.

При реактивній маршрутизації вузол, який хоче здійснити відправку даних до певного вузла (вузол-джерело), до якого відсутній маршрут, посилає запит на його формування. Кожен вузол, який отримує такий запит, визначає чи він задіюється для формування маршруту. Після визначення маршруту ті вузли, які є його складовими, надсилають відповідну інформацію назад до вузла-джерела, який зберігає її. Таким чином, сформувався необхідний маршрут, по якому здійснюється передача даних. Одєю з переваг цього типу стратегії маршрутизації є ефективність використання мережевих ресурсів, оскільки процес визначення маршрутів здійснюється тільки при необхідності. При цьому при одночасному формуванні великої кількості запитів на може виникнути перенавантаження мережі.

Гібридна маршрутизація поєднує проактивну і реактивну стратегії, що дозволяє застосовувати оптимальну стратегію в залежності від поточних вимог та мережевих умов. Перевагами її використання є:

- адаптивність, яка досягається завдяки використанню відповідної стратегії маршрутизації для кожного конкретного випадку,
- оптимізація енергоспоживання при використанні реактивної маршрутизації для переведення СВ у режим «сну»,
- балансування навантаження, яке полягає в раціональному його розподілі між різними маршрутами, для підтримки необхідної пропускної здатності та уникнення перевантаження у мережі.

До недоліків можна віднести складність реалізації та налаштування параметрів, що обумовлюється необхідністю координації проактивної та реактивної стратегій, та більш високі вимоги до мережевих ресурсів для підтримки обох стратегій маршрутизації одночасно. Отже, гібридна маршрутизація є ефективною стратегією при сукупності різних мережевих сценаріїв, що обумовлює її використання у великих БСМ із динамічно змінною топологією.

Розглянемо особливості функціонування стратегій маршрутизації на основі структури мережі [8,9]. Однорангова маршрутизація застосовується у мережах, де кожен вузол має однаковий статус (ранг) та відсутній центральний вузол. У випадку недоступності певного вузла інші вузли здійснюють автоматичну зміну маршрутів для формування оптимального шляху передачі даних. Кожен вузол приймає рішення про участь у маршруті самостійно на основі інформації про стан мережі. Даний вид стратегії не потребує складної ієрархії чи централізованого управління, що обумовлює його простоту. Також для однорангової маршрутизації характерна гнучкість та стійкість до відмов. Проте у мережах із великою кількістю вузлів число можливих маршрутів може бути значним, що негативно впливатиме на використання мережевих ресурсів.

Ієрархічна маршрутизація базується на використанні розподілу вузлів за рівнями, кожен з яких характеризується певними функціями. Центральні (кореневі) вузли відповідають за маршрутизацію трафіку між різними підмережами чи сегментами мережі, здійснюють управління роботою вузлів нижчих рівнів та забезпечують надійність мережі на основі аналізу її стану для виявлення проблем та приймання необхідних рішень для відновлення її працездатності.

Застосування ієрархічної маршрутизації сприяє більш ефективному використанню мережевих ресурсів, зокрема при поділі мережі на підмережі, кожна з яких має свою структуру та особливості функціонування. Також цей вид стратегії маршрутизації є більш надійним, ніж однорангова маршрутизація, оскільки ієрархічна структура мережі забезпечує краще управління, що дозволяє уникнути перевантаження певних вузлів для підвищення ефективності роботи мережі. Одним із основних недоліків ієрархічної маршрутизації є підвищена складність розгортання мережі при зміні топології у порівнянні із одноранговою маршрутизацією, що пов'язано із необхідністю переналаштування різних рівнів мережі.

Маршрутизація на основі місцезнаходження базується на використанні інформації щодо фізичного розміщення вузлів у мережах, яка отримується шляхом застосування технік геолокації. Після отримання інформації про місцезнаходження мережевих вузлів, здійснюється створення маршрутів. Дану маршрутизацію доцільно використовувати для мереж, де розташування вузлів безпосередньо впливає на ефективність процесу передачі даних, зокрема в мобільних мережах.

Розглянемо особливості функціонування стратегій маршрутизації на основі мережевих операцій [10]. Суть багатошляхової маршрутизації полягає у використанні декількох маршрутів для передавання одного й того ж інформаційного потоку. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервність зв'язку навіть у разі виходу з ладу одного з маршрутів, оскільки дані можуть бути перенаправлені альтернативними шляхами. Для забезпечення ефективності цієї стратегії необхідно, щоб вузли мережі здійснювали постійне спостереження за актуальним станом маршрутизованих маршрутів і вчасно реагували на зміни в топології або параметрах мережі. Серед основних переваг цієї стратегії можна виділити високу надійність передачі даних, адаптивність до змін у структурі мережі. До недоліків можна віднести необхідність більш складних обчислювальних алгоритмів, що, у свою

чергу, збільшує навантаження на ресурси мережевих вузлів. Отже, багатошляхова маршрутизація доцільна для тих типів мереж, де ключовим критерієм є забезпечення високої відмовостійкості та надійності зв'язку, зокрема для критично важливих застосувань.

При маршрутизації на основі запитів мережеві вузли використовують запити для визначення найкращого маршруту. Такі запити надсилаються вузлом-джерелом до множини вузлів чи конкретного вузла, після чого ті, вузли, які отримали запит, обробляють його і у відповідь надсилають свою інформацію про маршрути. Вузол - джерело здійснює аналіз отриманої інформації, на основі чого вибирає оптимальний маршрут, використовуючи необхідний критерій. Цей вид маршрутизації дозволяє вузлам здійснювати вибір оптимальних маршрутів, враховуючи поточний стан мережі та ресурсів, що доцільно для мереж із мінливими умовами. Одним із недоліків, які виникають при маршрутизації на основі запитів, є збільшення величини затримки у зв'язку із часовими затратами на надсилання запитів і отримання відповідей.

Маршрутизація на основі домовленостей здійснює формування маршрутів на основі попередньої конфігурації або відповідних домовленостей, при цьому маршрути визначаються заздалегідь і не змінюються автоматично з часом або із врахуванням стану мережі. Основна ідея такої маршрутизації для БСМ полягає в тому, щоб зменшити дублювання інформації і запобігти надсиланню надлишкових даних іншим вузлам шляхом формування серії переговорних повідомлень (домовленостей). До переваг цього виду маршрутизації належить більший рівень контролю над маршрутами, що здійснюється системним адміністратором, та відсутність потреби у постійному автоматичному оновленні та зміні маршрутів залежно від стану мережі. Основним недоліком є складніша адаптація до змінних умов, яка потребує оновлення маршрутів / домовленостей, що обумовлює зростання часових та ресурсних затрат.

При маршрутизації на основі QoS мережа повинна задовольняти певні показники, наприклад, затримку, під час передачі даних. Основна мета даної стратегії полягає в забезпеченні оптимального використання ресурсів мережі і задоволення вимог кінцевих користувачів щодо QoS. Для цього спочатку здійснюється класифікація трафіку на різні категорії чи класи залежно від його характеристик та вимог щодо обслуговування, наприклад за пріоритетом, типом даних тощо. Наступний крок полягає у маркуванні пакетів відповідними позначками для їх ідентифікації щодо приналежності до певного класу. Маршрутизатори здійснюють оцінку стану мережі на основі певних метрик для визначення поточного навантаження та доступності маршрутів. Таким чином, вибирається оптимальний маршрут для кожного класу трафіку. Основним недоліком даного виду маршрутизації є ускладнений процес управління та налаштування QoS, який потребує глибоких знань мережевих протоколів та архітектури мережі.

Маршрутизація на основі обробки даних поділяється на два види: когерентну і некогерентну. При некогерентній маршрутизації вузли локально обробляють вихідні дані, перш ніж відправляти їх на інші вузли для подальшої обробки. При когерентній маршрутизації дані пересилаються до агрегаторів після мінімальної обробки, до якої належить мітка часу, стиснення даних, усунення повторень тощо. Маршрутизація на основі ініціатора комунікації поділяється на два види: джерело та призначення в залежності від того який саме вузол ініціює передачу даних.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі здійснено огляд досліджень, присвячених передачі даних у безпроводних сенсорних мережах. Наведено класифікацію стратегій маршрутизації та здійснено аналіз аспектів їх застосування у сучасних мережах. Показано, що різноманітність стратегій маршрутизації відображає різні вимоги та виклики для БСМ, зокрема обмежені ресурси, динамічно змінну топологію, вимоги до якості обслуговування. Вибір певної стратегії важливий для забезпечення ефективної та надійної роботи мережі. Правильно обрана стратегія дозволить оптимально використовувати мережеві ресурси та відповідати вимогам конкретної області застосування БСМ (наприклад, моніторингу навколишнього середовища, вимірювання параметрів у виробничих процесах тощо). Перспективи подальших досліджень полягають у дослідженні метаевристичних алгоритмів маршрутизації для прийняття ефективних рішень щодо передачі даних в динамічно змінних умовах.

Література

1. Al-Ani, K. W. (2024). A review on metaheuristic algorithms employed in WSN. 2024 ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETSIS), 1454–1458. Bahrain.
2. Nourilidean, S. W., Hassib, M. D., & Mohammed, Y. A. (2023). AD-Hoc routing protocols in WSN-WiFi based IoT in smart home. 2023 15th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE), 82–87. Baghdad & Anbar, Iraq. <https://doi.org/10.1109/DeSE58274.2023.10099981>
3. Mu, H. (2024). High-speed carrier self-organizing network routing strategy based on genetic algorithm. 2024 6th International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT), 344–349. China.
4. Pei, H., Zhang, J., Zhang, Y., Xu, H., & Li, L. (2024). Self-organized routing for autonomous

vehicles via deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(1), 426–437. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3311198>

5. Prabha, K. L., Vijayasri, P., & S, S. (2025). Quality of service in wireless sensor networks: A comparison of routing protocols based on machine learning. 2025 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS), 799–806. Tuticorin, India. <https://doi.org/10.1109/ICEARS64219.2025.10940751>

6. Jiang, T., Zhang, B., He, Z., Sun, D., & Wang, F. (2024). A routing optimization strategy for WSNs based on single-hop and Dijkstra's multi-hop algorithm. 2024 4th International Conference on Neural Networks, Information and Communication Engineering (NNICE), 1141–1144. China.

7. Mukti, F. S., Lorenzo, J. E., Zuhdianto, R., Junikhah, A., Soetedjo, A., & Krismanto, A. U. (2021). A comprehensive performance evaluation of proactive, reactive and hybrid routing in wireless sensor network for real time monitoring system. 2021 International Conference on Computer Science and Engineering (IC2SE), 1–6. Indonesia.

8. Lenka, R. K., Rath, A. K., & Sharma, S. (2019). Routing protocols in WSN assisted IoT infrastructure – A review. 2019 International Conference on Intelligent Computing and Remote Sensing (ICICRS), 1–6. Bhubaneswar, India. <https://doi.org/10.1109/ICICRS46726.2019.9555864>

9. Raghunandan, G. H., & Lakshmi, B. N. (2011). A comparative analysis of routing techniques for wireless sensor networks. 2011 National Conference on Innovations in Emerging Technology, 17–22. Erode, India. <https://doi.org/10.1109/NCOIET.2011.5738826>

10. Shabbir, N., & Hassan, S. R. (2017). Routing protocols for wireless sensor networks (WSNs). In *Wireless Sensor Networks – Insights and Innovations*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70208>

References

1. Al-Ani, K. W. (2024). A review on metaheuristic algorithms employed in WSN. 2024 ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETSYS), 1454–1458. Bahrain.

2. Nourillean, S. W., Hassib, M. D., & Mohammed, Y. A. (2023). AD-Hoc routing protocols in WSN-WiFi based IoT in smart home. 2023 15th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE), 82–87. Baghdad & Anbar, Iraq. <https://doi.org/10.1109/DeSE58274.2023.10099981>

3. Mu, H. (2024). High-speed carrier self-organizing network routing strategy based on genetic algorithm. 2024 6th International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT), 344–349. China.

4. Pei, H., Zhang, J., Zhang, Y., Xu, H., & Li, L. (2024). Self-organized routing for autonomous vehicles via deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(1), 426–437. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3311198>

5. Prabha, K. L., Vijayasri, P., & S, S. (2025). Quality of service in wireless sensor networks: A comparison of routing protocols based on machine learning. 2025 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS), 799–806. Tuticorin, India. <https://doi.org/10.1109/ICEARS64219.2025.10940751>

6. Jiang, T., Zhang, B., He, Z., Sun, D., & Wang, F. (2024). A routing optimization strategy for WSNs based on single-hop and Dijkstra's multi-hop algorithm. 2024 4th International Conference on Neural Networks, Information and Communication Engineering (NNICE), 1141–1144. China.

7. Mukti, F. S., Lorenzo, J. E., Zuhdianto, R., Junikhah, A., Soetedjo, A., & Krismanto, A. U. (2021). A comprehensive performance evaluation of proactive, reactive and hybrid routing in wireless sensor network for real time monitoring system. 2021 International Conference on Computer Science and Engineering (IC2SE), 1–6. Indonesia.

8. Lenka, R. K., Rath, A. K., & Sharma, S. (2019). Routing protocols in WSN assisted IoT infrastructure – A review. 2019 International Conference on Intelligent Computing and Remote Sensing (ICICRS), 1–6. Bhubaneswar, India. <https://doi.org/10.1109/ICICRS46726.2019.9555864>

9. Raghunandan, G. H., & Lakshmi, B. N. (2011). A comparative analysis of routing techniques for wireless sensor networks. 2011 National Conference on Innovations in Emerging Technology, 17–22. Erode, India. <https://doi.org/10.1109/NCOIET.2011.5738826>

10. Shabbir, N., & Hassan, S. R. (2017). Routing protocols for wireless sensor networks (WSNs). In *Wireless Sensor Networks – Insights and Innovations*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70208>