

УДК 004.722.62

DOI: 10.20998/2411-0558.2025.01.05

П. Є. ПУСТОВОЙТОВ, д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків,
О. М. ВОРОНЕЦЬ, аспірант, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ QoS ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

У статті запропоновано метод маршрутизації в сенсорних мережах на основі нечіткої логіки, що дозволяє балансувати між якістю обслуговування (QoS) та енергоспоживанням. Метод використовує інтегральну оцінку маршрутів, яка враховує затримку передачі, пропускну здатність і витрати енергії вузлів. Завдяки нечіткій логіці маршрут вибирається адаптивно, що забезпечує гнучке управління передачею даних у динамічних умовах мережі.

Проведено моделювання та порівняння запропонованого методу з класичними алгоритмами (Dijkstra, AODV, LEACH). Результати показали, що новий підхід забезпечує меншу затримку, вищу пропускну здатність і зниження енергоспоживання, що критично важливо для бездротових сенсорних мереж.

Запропонований метод має високу адаптивність, але потребує налаштування вагових коефіцієнтів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на динамічну оптимізацію параметрів маршрутизації та інтеграцію з іншими адаптивними протоколами.

Ключові слова: оптимальна маршрутизація; енергозбереження; якість обслуговування; сенсорна мережа; управління трафіком; пропускну здатність; метод маршрутизації; кластеризація вузлів.

Вступ.

Сенсорні мережі відіграють ключову роль у сучасних інформаційних системах, забезпечуючи збір, передачу та обробку даних у різних сферах, таких як розумні міста, промислова автоматизація та системи моніторингу навколишнього середовища. Одним із головних викликів у таких мережах є забезпечення якості обслуговування (QoS), включаючи мінімізацію затримок, підтримку необхідної пропускну здатності та забезпечення стабільності зв'язку. Одночасно, вузли сенсорних мереж мають обмежені

енергетичні ресурси, що ускладнює завдання ефективного управління трафіком та потребує оптимізації маршрутів передачі даних.

Традиційні підходи до маршрутизації в сенсорних мережах часто орієнтовані на мінімізацію одного параметра, наприклад, затримки або енергоспоживання, що призводить до компромісних рішень і зниження ефективності мережі. Використання детермінованих алгоритмів, таких як Dijkstra або Bellman-Ford, не завжди дозволяє досягти оптимального балансу між продуктивністю та енергозбереженням, оскільки вони не враховують складні взаємозалежності між параметрами мережевого трафіку. Багатокритеріальна маршрутизація, яка одночасно враховує кілька параметрів, дозволяє підвищити ефективність передачі даних, проте класичні методи не завжди здатні адаптивно реагувати на змінні умови мережевого середовища.

Для розв'язання цієї проблеми пропонується використання нечіткої логіки, яка дозволяє моделювати невизначеність і взаємозалежність факторів, що впливають на вибір маршруту. На основі лінгвістичних змінних та системи нечітких правил можна гнучко оцінювати якість кожного можливого маршруту, збалансовуючи такі параметри, як затримка, пропускна здатність та енергоспоживання. Такий підхід дозволяє адаптивно змінювати маршрутизацію залежно від поточного стану мережі, що сприяє підвищенню загальної продуктивності та продовженню терміну роботи сенсорних вузлів.

Основною метою цього дослідження є розробка методу маршрутизації, який застосовує нечітку логіку для вибору оптимального маршруту, що забезпечує баланс між QoS та енергоспоживанням. Запропонований підхід дозволяє уникнути жорстких детермінованих обмежень і забезпечує більш адаптивну та енергоефективну маршрутизацію в динамічних умовах сенсорних мереж.

Огляд літератури. У сучасних сенсорних мережах забезпечення якості обслуговування (QoS) та енергозбереження є критично важливими аспектами, що впливають на ефективність і тривалість роботи мережі. Після 2020 року було опубліковано низку досліджень, присвячених цим питанням. Зокрема, у [1] розглядаються сучасні методи забезпечення QoS у сенсорних мережах, включаючи адаптивні протоколи маршрутизації та механізми управління трафіком. Автори аналізують вплив різних факторів,

таких як затримка, пропускна здатність і надійність, на загальну продуктивність мережі.

Енергозбереження при маршрутизації є ще одним важливим напрямком досліджень. У [2] представлено підходи до оптимізації енергоспоживання в сенсорних мережах, зокрема через використання кластеризації вузлів та динамічного регулювання потужності передачі. Автори демонструють, як такі методи можуть продовжити термін служби мережі без значного впливу на якість обслуговування.

Використання нечіткої логіки в телекомунікаційних системах набуло популярності завдяки її здатності обробляти невизначеність та неточність даних. У [3] досліджується застосування нечіткої логіки для покращення процесів маршрутизації та управління ресурсами в мережах. Автори показують, як нечіткі системи можуть адаптивно налаштовувати параметри мережі для досягнення оптимального балансу між QoS та енергоспоживанням.

Аналіз існуючих алгоритмів маршрутизації в сенсорних мережах виявляє як їхні переваги, так і недоліки. У [4] проведено порівняльний аналіз різних підходів, включаючи традиційні та сучасні методи, з акцентом на їхню ефективність в умовах обмежених ресурсів. Автори обговорюють, як поєднання різних технік, таких як нечітка логіка та машинне навчання, може покращити продуктивність мережі.

У сучасних дослідженнях іноземні автори приділяють значну увагу питанням забезпечення якості обслуговування (QoS) та енергоефективності в сенсорних мережах. Зокрема, у [5] автори пропонують новий протокол маршрутизації, спрямований на досягнення високої якості обслуговування та енергоефективності в бездротових сенсорних мережах. Це дослідження підкреслює важливість розробки протоколів, які одночасно враховують вимоги QoS та обмеження енергоспоживання.

Інше дослідження [6] зосереджується на використанні глибокого навчання для підвищення енергоефективності при передачі даних у бездротових сенсорних мережах. Автори розробили модель групування на основі глибокого навчання, яка оптимізує процес передачі даних, зменшуючи енергоспоживання та покращуючи загальну продуктивність мережі.

У [7] розглядаються існуючі та майбутні можливості в області енергоефективних підводних бездротових комунікацій та мереж. Це видання є важливим джерелом для дослідників, які працюють над розробкою енергоефективних рішень у специфічних умовах підводних сенсорних мереж.

Дослідження [8] фокусується на динамічній адаптації вже призначених віртуальних ресурсів сенсорної мережі для задоволення змінних потреб додатків. Автори пропонують оптимізаційну структуру, яка динамічно розподіляє додатки між сенсорними вузлами, враховуючи характеристики та обмеження бездротового сенсорного середовища, а також додаткове енергоспоживання, пов'язане з активацією нових вузлів або переміщенням уже активних додатків.

У [9] представлено огляд протоколів управління доступом до середовища (МАС), спрямованих на підвищення енергоефективності в бездротових сенсорних мережах. Автор аналізує різні підходи до зниження енергоспоживання на рівні МАС, що є ключовим для продовження терміну служби мережі.

Формалізація моделі та постановка задачі. У процесі маршрутизації в сенсорних мережах необхідно враховувати кілька взаємопов'язаних параметрів, таких як затримка, пропускна здатність та енергоспоживання. Традиційні методи найкоротшого шляху, які використовують єдиний критерій оптимізації, не дозволяють достатньо гнучко адаптуватися до змінних умов мережі. Оскільки зазначені параметри є нелінійними та часто суперечливими, ефективним підходом до їх обробки є використання нечіткої логіки.

Сенсорну мережу можна представити у вигляді зваженого графа $G=(V,E)$, де V – множина вузлів мережі, а E – множина зв'язків між ними. Кожне з'єднання $(i,j) \in E(i,j)$ характеризується основними параметрами, що впливають на якість обслуговування (QoS) і рівень енергоспоживання. До таких параметрів належать затримка передачі даних d_{ij} , пропускна здатність каналу b_{ij} , а також енергетичні витрати на передачу пакета e_{ij} .

Завдання маршрутизації в сенсорній мережі полягає у виборі оптимального маршруту $P=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ між джерелом S і приймачем D , що забезпечує баланс між мінімізацією затримок, максимізацією пропускної здатності та раціональним використанням енергетичних ресурсів.

Класичні методи маршрутизації, такі як метод Дейкстри або Беллмана-Форда, орієнтовані переважно на мінімізацію однієї метрики (наприклад, довжини шляху), тоді як запропонований підхід використовує нечітку логіку для одночасного врахування всіх ключових параметрів, що дозволяє отримати більш адаптивне рішення для динамічних умов мережі.

$$\min \sum_{(i,j) \in P} d_{ij}, \quad \max \min_{(i,j) \in P} b_{ij}, \quad \min \sum_{(i,j) \in P} e_{ij}, \quad (1)$$

У межах запропонованого підходу кожен зв'язок (i,j) отримує оцінку, що визначає його придатність для маршрутизації. Ця оцінка, названа рейтингом зв'язку R_{ij} , визначається як функція від затримки, пропускної здатності та енергоспоживання:

$$R_{ij} = f(d_{ij}, b_{ij}, e_{ij}), \quad (2)$$

де f — функція нечіткого виведення, яка поєднує значення трьох основних критеріїв для оцінки якості з'єднання.

Для вибору оптимального маршруту застосовується правило:

$$P^* = \arg \max_P \max_{(i,j) \in P} R_{ij}. \quad (3)$$

Це означає, що серед усіх можливих маршрутів P обирається той, у якого найгірший зв'язок (тобто вузьке місце маршруту) має найкращий рейтинг. Такий підхід забезпечує більш збалансовану маршрутизацію, оскільки дозволяє уникати слабких ланок у мережі та вибирати траєкторії, які гарантують достатній рівень QoS при мінімальному енергоспоживанні.

Використання нечіткої логіки дозволяє гнучко адаптувати параметри маршрутизації до змін у мережі, а також зменшити негативний вплив випадкових факторів, що можуть впливати на якість зв'язку. Це особливо важливо для сенсорних мереж, де енергетичні ресурси вузлів обмежені, а умови зв'язку можуть змінюватися в реальному часі.

Метод маршрутизації з нечітко заданими параметрами. Для ефективного застосування нечіткої логіки до задачі маршрутизації необхідно визначити лінгвістичні змінні, які відображають основні характеристики мережевого зв'язку. Оскільки параметри затримки, пропускної здатності та енергоспоживання можуть приймати широкий діапазон значень, доцільно розбити їх на нечіткі множини, які описують їх

якісні стани. Це дозволяє враховувати невизначеність та варіативність мережевих параметрів, що виникає через нестабільність трафіку, зміни в навантаженні та обмежені енергетичні ресурси вузлів.

Для затримки передачі даних d_{ij} вводяться три нечіткі множини: мала (Low), середня (Medium) і висока (High). Значення малої затримки відповідають мережевим з'єднанням із швидким передаванням пакетів, середня затримка може спостерігатися в умовах часткового завантаження мережі, а висока – у перевантажених або слабкостабільних каналах.

Пропускна здатність каналу b_{ij} класифікується як низька (Low), середня (Medium) і висока (High). Високі значення пропускної здатності характерні для стабільних і швидких з'єднань, що можуть забезпечувати безперебійну передачу великих обсягів даних. Низька пропускна здатність свідчить про те, що канал є перевантаженим або має технічні обмеження, що впливають на якість сервісу.

Енергоспоживання e_{ij} поділяється на низьке (Low), середнє (Medium) і високе (High). Низьке енергоспоживання є бажаним для сенсорних мереж, оскільки воно продовжує термін роботи вузлів. Високе споживання енергії вказує на те, що передача даних по конкретному каналу є ресурсомісткою і може швидко виснажити енергетичні резерви вузлів, що робить такі з'єднання менш придатними для довготривалої маршрутизації.

Визначені лінгвістичні змінні дозволяють створити базу нечітких правил, які формалізують процес вибору маршруту. Завдяки цьому методу маршрутизації може приймати рішення, враховуючи взаємозв'язок між затримкою, пропускною здатністю та енергоспоживанням, забезпечуючи баланс між якістю обслуговування та економією енергетичних ресурсів мережі. Визначимо функції належності, наприклад, для затримки:

$$\mu_L(d) = \begin{cases} 1, & d \leq d_{\min}, \\ \frac{d_{\max} - d}{d_{\max} - d_{\min}}, & d_{\min} \leq d \leq d_{\max}, \\ 0, & d \geq d_{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

де d_{\min} та d_{\max} – відповідно мінімальна та максимальна затримка.

Нечітке виведення.

Задамо базу правил нечіткої логіки:

– якщо d_{ij} мала, b_{ij} висока, e_{ij} низьке – відповідно R_{ij} високе;

– якщо d_{ij} середня, b_{ij} середня, e_{ij} середнє – відповідно R_{ij} середнє;

– якщо d_{ij} висока, b_{ij} низька, e_{ij} високе – відповідно R_{ij} низьке.

Загальна формула для розрахунку рейтингу зв'язку:

$$R_{ij} = (\mu_k(d_{ij}) \cdot w_d + \mu_k(b_{ij}) \cdot w_b + \mu_k(e_{ij}) \cdot w_e), \quad (5)$$

де w_d, w_b, w_e – вагові коефіцієнти.

Опис методу обробки вхідних параметрів і прийняття рішення.

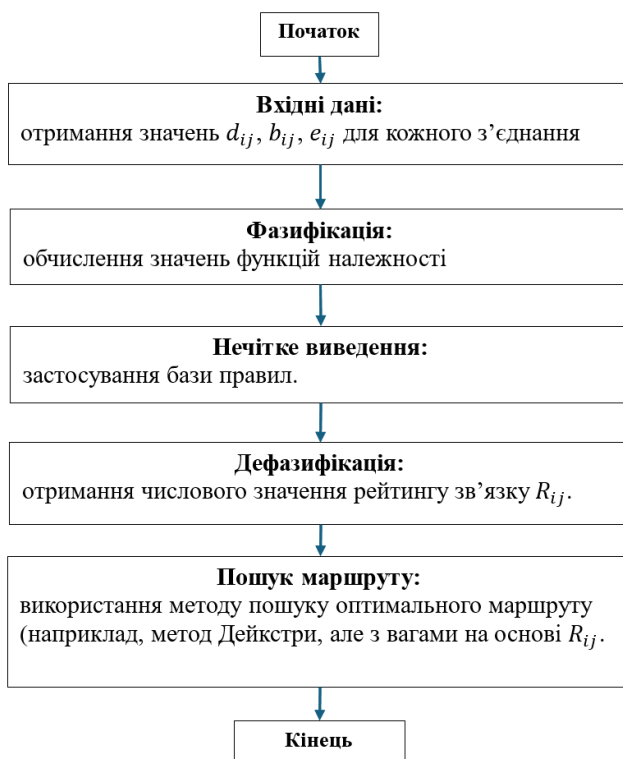


Рис.1. Схема роботи методу обробки вхідних параметрів і прийняття рішення

Розглянемо у якості прикладу три маршрути з наступними параметрами, значення d_{ij}, b_{ij}, e_{ij} яких задано у табл. 1.

Для оцінки придатності маршрутів використовуються функції належності, що визначають ступінь відповідності кожного параметра заданим лінгвістичним змінним. Для кожного маршруту обчислюються значення функцій належності для затримки, пропускну здатності та енергоспоживання.

Таблиця 1

Оцінені значення d_{ij} , b_{ij} , e_{ij} маршрутів

Маршрут	Затримка d (мс)	Пропускна здатність b	Енергоспоживання e (мДж)
P_1	10	50	2
P_2	20	30	4
P_3	30	20	6

Розглянемо три можливі маршрути. Для першого маршруту P_1 значення функцій належності становлять: $\mu_d = 0.9$, $\mu_b = 0.8$, $\mu_e = 0.9$. Це означає, що затримка на цьому маршруті мала, пропускна здатність висока, а енергоспоживання є оптимальним. Для другого маршруту P_2 відповідні значення дорівнюють $\mu_d = 0.6$, $\mu_b = 0.5$, $\mu_e = 0.6$, що вказує на середню якість зв'язку за всіма параметрами. У третього маршруту P_3 функції належності мають значення $\mu_d = 0.3$, $\mu_b = 0.2$, $\mu_e = 0.3$, що свідчить про високі затримки, низьку пропускну здатність і значне енергоспоживання, роблячи цей варіант менш привабливим.

Для обчислення загального рейтингу маршруту використовуємо вагові коефіцієнти, які відображають важливість кожного критерію. Припустимо, що вагові значення дорівнюють $w_d = 0.4$, $w_b = 0.4$, $w_e = 0.2$. Відповідно, рейтинг для першого маршруту обчислюється як:

$$R_{P1} = 0.9 \cdot 0.4 + 0.8 \cdot 0.4 + 0.9 \cdot 0.2 = 0.86.$$

Для другого маршруту отримуємо:

$$R_{P2} = 0.6 \cdot 0.4 + 0.5 \cdot 0.4 + 0.6 \cdot 0.2 = 0.56.$$

Для третього маршруту значення рейтингу становить:

$$R_{P3} = 0.3 \cdot 0.4 + 0.2 \cdot 0.4 + 0.3 \cdot 0.2 = 0.26.$$

Оскільки критерієм вибору маршруту є максимальне значення рейтингу R_P , найкращим маршрутом серед розглянутих варіантів є R_{P1} із найвищим рейтингом 0.86. Таким чином, метод маршрутизації на основі нечіткої логіки дозволяє ефективно балансувати між мінімізацією затримки, максимізацією пропускну здатності та оптимізацією

енергоспоживання, забезпечуючи вибір найбільш стабільного та енергоефективного маршруту.

Реалізація методу та експериментальні дослідження. Для оцінки ефективності запропонованого методу маршрутизації було проведено серію експериментів у моделюючому середовищі Network Simulator, де порівнювались затримка, пропускна здатність, енергоспоживання та інтегральний рейтинг маршрутів. Аналіз проводився для трьох рівнів мережевого навантаження: низьке, середнє та високе. У дослідженні розглядалися такі методи маршрутизації: запропонований метод, Dijkstra, AODV та LEACH.

Для аналізу затримки у маршрутах отримано дані експерименту, які наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз затримки пакетів (*ms*)

	Низьке завантаження	Середнє завантаження	Високе завантаження
Запропонований метод	10	12	15
Dijkstra	15	18	25
AODV	20	25	30
LEACH	22	28	35

Графік на рис. 2 показує середні значення затримки передавання пакетів для різних рівнів мережевого навантаження. Видно, що запропонований метод забезпечує найменшу затримку у порівнянні з іншими методами. Зокрема, при низькому навантаженні затримка складає 10 мс, а при високому – 15 мс, тоді як методи AODV та LEACH демонструють значно вищі затримки (до 35 мс). Це пояснюється тим, що запропонований підхід оптимізує вибір маршрутів на основі нечіткої логіки, уникаючи перевантажених або енергомістких зв'язків.

Для аналізу пропускної здатності маршруту було отримано дані експерименту та наведено у таблиці 3.

Табл. 3 містить дані про середню пропускну здатність каналів для різних методів. Запропонований метод демонструє вищі значення пропускної здатності (рис. 3) порівняно з традиційними методами, зокрема при високому навантаженні він підтримує швидкість 4.8 Мбіт/с, тоді як

AODV падає до 3.0 Мбіт/с. Це свідчить про ефективний баланс між QoS та оптимізацією використання ресурсів мережі.

Для аналізу енергоспоживання обраного маршруту було отримано дані експерименту та наведено у табл. 4.

Таблиця 3

Порівняльний аналіз затримки пакетів (*Mbms*)

	Низьке завантаження	Середнє завантаження	Високе завантаження
Запропонований метод	5,5	5	4,8
Dijkstra	4,8	4,2	3,5
AODV	4,2	3,8	3
LEACH	4	3,5	2,8

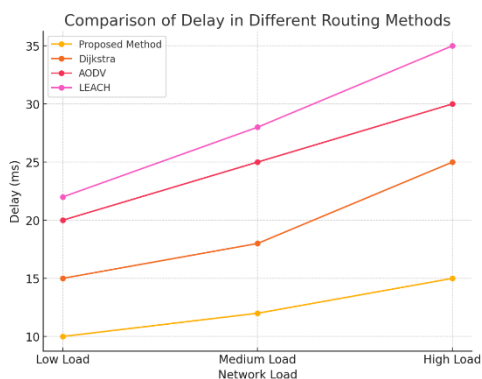


Рис. 2. Графік порівняння затримки пакетів (*ms*) для різних методів від навантаження

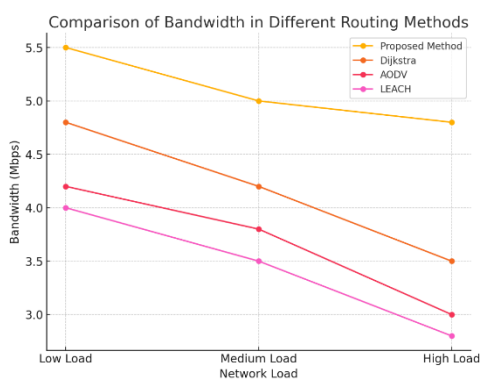


Рис. 3. Графік порівняння пропускної здатності (*Mbps*) каналів для різних методів навантаження

Таблиця 4

Порівняльний аналіз енергоспоживання каналу (*mJ*)

	Низьке завантаження	Середнє завантаження	Високе завантаження
Запропонований метод	1,5	1,8	2,2
Dijkstra	2	2,5	3
AODV	2,5	3	3,5
LEACH	2,8	3,2	3,8

У табл. 4 наведені дані про енергоспоживання кожного маршруту. Як видно з результатів (рис. 4), запропонований метод забезпечує найнижче енергоспоживання, що є критично важливим для сенсорних мереж.

Наприклад, при високому навантаженні середнє енергоспоживання для запропонованого підходу становить 2.2 мДж, тоді як AODV і LEACH витрачають до 3.8 мДж. Це пояснюється тим, що метод використовує нечітку логіку для вибору маршрутів, уникаючи енергомістких вузлів.

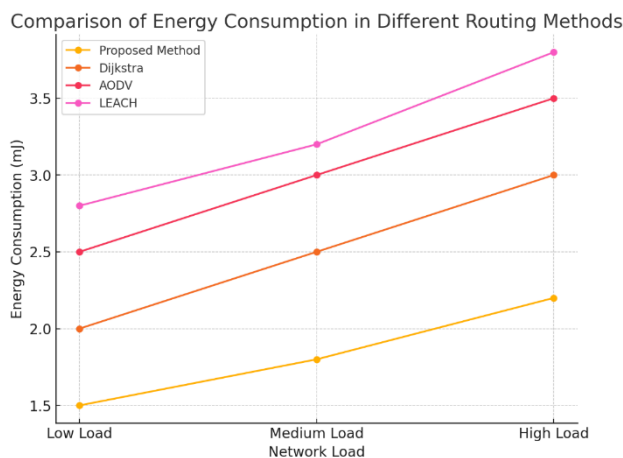


Рис. 4. Графік порівняння енергоспоживання каналу (mJ) каналів для різних методів від навантаження

Інтегральна оцінка маршрутизації є ключовим показником ефективності методу, оскільки вона дозволяє одночасно враховувати кілька критично важливих параметрів: затримку, пропускну здатність і енергоспоживання. У традиційних підходах до маршрутизації часто використовується лише один оптимізаційний критерій, наприклад, мінімізація затримки або зниження енергоспоживання. Проте такі підходи можуть призводити до небажаних компромісів, коли, наприклад, маршрут із найменшою затримкою може мати надмірне енергоспоживання або недостатню пропускну здатність.

Використання інтегральної оцінки на основі нечіткої логіки дозволяє забезпечити збалансований вибір маршруту, який оптимально поєднує всі три параметри. Це особливо важливо для сенсорних мереж, де ресурси обмежені, а умови мережевого середовища можуть змінюватися в реальному часі. Метод маршрутизації, заснований на інтегральній оцінці,

враховує якість зв'язку не лише на окремих ділянках мережі, а й у контексті загальної продуктивності системи.

Таблиця 5

Порівняльний аналіз інтегральної характеристики каналу

	Низьке завантаження	Середнє завантаження	Високе завантаження
Запропонований метод	1	0,867839	0,755427
Dijkstra	0,772818	0,592451	0,333269
AODV	0,560451	0,377713	0,135717
LEACH	0,472734	0,267878	0

Крім того, такий підхід дає можливість динамічно адаптувати маршрутизацію під поточні умови, що робить мережу більш стійкою до змін трафіку та доступності ресурсів. Інтегральна оцінка забезпечує прийняття гнучких рішень, які відповідають як вимогам QoS, так і завданням енергоефективності, що є критично важливим для сучасних бездротових мереж.

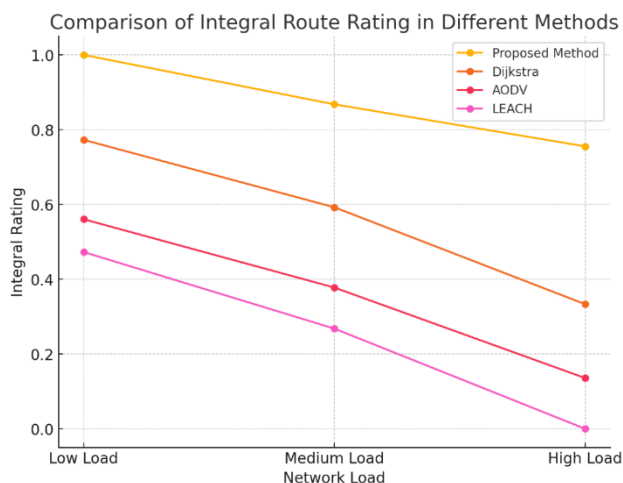


Рис. 5. Графік порівняння інтегральної оцінки каналів для різних методів від навантаження

Остання табл. 5 та графік 5 демонструють інтегральний рейтинг кожного методу, який обчислюється на основі нечітких множин із ваговими коефіцієнтами. Видно, що запропонований метод отримує найвищі значення рейтингу у всіх сценаріях, що підтверджує його

ефективність у збалансованій маршрутизації. У випадку високого навантаження рейтинг становить 0.86, тоді як у AODV він не перевищує 0.56. Це свідчить про кращу адаптацію до змінних умов мережі та оптимальне балансування між QoS і енергозбереженням.

Обговорення результатів. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого методу маршрутизації, що базується на використанні нечіткої логіки для балансування між затримкою, пропускну здатністю та енергоспоживанням. Порівняння з класичними методами, такими як Dijkstra, AODV та LEACH, показало, що запропонований підхід дозволяє зменшити середню затримку передачі даних, забезпечити стабільну пропускну здатність і значно знизити енергоспоживання вузлів. Це особливо важливо для сенсорних мереж, де обмежені енергетичні ресурси потребують оптимального розподілу для продовження терміну роботи всієї системи. Інтегральна оцінка маршрутизації показала, що метод ефективно адаптується до змін мережевого навантаження, вибираючи маршрути, які забезпечують найкращий баланс між QoS і витратами енергії.

Основною перевагою запропонованого підходу є здатність приймати рішення в умовах невизначеності та динамічних змін у мережі. Нечітка логіка дозволяє гнучко враховувати різноспрямовані фактори, що впливають на якість маршрутизації, та формувати оптимальні рішення, недоступні при використанні жорстких детермінованих правил. Проте обмеженням є необхідність точного налаштування функцій належності та вагових коефіцієнтів, що впливають на вибір маршруту. Через додаткові обчислювальні витрати метод може бути складним для впровадження в системах з обмеженими ресурсами.

Перспективним напрямком досліджень є динамічне регулювання вагових коефіцієнтів залежно від стану мережі та характеру трафіку. Також можливе використання адаптивних методів оптимізації для зміни правил нечіткого виведення в режимі реального часу. Інтеграція з сучасними протоколами керування трафіком може ще більше підвищити продуктивність сенсорних мереж у складних умовах.

Висновки. Аналіз отриманих результатів підтверджує ефективність запропонованого підходу. Використання нечіткої логіки дозволяє

одночасно мінімізувати затримку, максимізувати пропускну здатність та зменшувати енергоспоживання. У порівнянні з класичними методами (Dijkstra, AODV, LEACH), запропонований метод забезпечує кращі результати за всіма ключовими показниками. Це робить його перспективним рішенням для енергозбереження та забезпечення якості обслуговування у сенсорних мережах.

Запропонований метод нечіткої маршрутизації дозволяє ефективно балансувати між якістю обслуговування (QoS) і енергозбереженням у сенсорних мережах. Використання нечіткої логіки для оцінки зв'язків у мережі дозволяє уникнути жорстких критеріїв вибору маршруту, забезпечуючи адаптивність до змін у мережевому середовищі. Завдяки цьому метод здатний знаходити маршрути, які мінімізують затримку передачі, максимізують пропускну здатність і зменшують енергоспоживання, що є критично важливим для бездротових сенсорних мереж із обмеженими ресурсами.

Розроблений метод маршрутизації був протестований у різних сценаріях мережевого навантаження, і результати підтвердили його ефективність порівняно з традиційними підходами, такими як Dijkstra, AODV і LEACH. Отримані розрахунки показали, що запропонований метод забезпечує нижчі затримки та енергоспоживання при збереженні високої пропускну здатності. Таким чином, він може бути рекомендований для використання у мережах, де важливо підтримувати баланс між продуктивністю та тривалістю роботи вузлів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптацію вагових коефіцієнтів у режимі реального часу, що дозволить ще більше покращити ефективність маршрутизації в динамічних умовах експлуатації.

References:

1. Boukerche R., Pazzi W.N., and Araujo R.B. (2006), "QoS dynamic routing for wireless sensor networks", *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2(4), pp. 410–442; doi:10.1145/1163673.1163682
2. Sibi S.A., and Annabel L.S.P. (2025), "Network lifetime improvement in wireless sensor networks using energy-efficient bat-moth flame optimization technique", *Scientific Reports*, 15(1), Article 18065, pp. 1–12; doi:10.1038/s41598-025-88550-y
3. Rao P.R., Lipare A., Edla D.R., and Parne S.R. (2023), "An Energy-Efficient Routing Algorithm for WSNs Using Fuzzy Logic", *Sensors*, 23(19), Article 8074, pp. 1–18; doi:10.3390/s23198074
4. Bellani S., and Yadav M. (2024), "Comparative Analysis of Neural Network-Based Routing Algorithms for Wireless Sensor Networks", *Proc. of the 2024 International Conference on*

Signal Processing and Advance Research in Computing (SPARC), pp. 418–420; doi:10.1109/SPARC61891.2024.10827846

5. Xiao J., et al. (2024), "A novel energy efficient QoS secure routing algorithm for WSNs", *Scientific Reports*, 14(1), Article 77686, pp. 1–13; doi:10.1038/s41598-024-77686-y

6. Khan M.A., et al. (2023), "Maximizing energy efficiency in wireless sensor networks for data transmission using deep learning", *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), pp. 1001–1010; doi:10.1016/j.aej.2023.09.001

7. Khan M.A., et al. (2020), "Energy-Efficient Underwater Wireless Communications and Networking", *IGI Global*, 339 p.; doi:10.4018/978-1-7998-3641-3

8. Delgado C., Canales M., Ortín J., Gállego J.R., Redondi A., Bousnina S., and Cesana M. (2024), "Energy-aware Dynamic Resource Allocation in Virtual Sensor Networks", *arXiv preprint*, arXiv:2402.08443, pp. 1–12; doi:10.48550/arXiv.2402.08443

9. Khan M.A., et al. (2024), "A survey on energy efficient medium access control for acoustic underwater wireless sensor networks", *Ad Hoc Networks*, 135, Article 103026, pp. 1–20; doi:10.1016/j.adhoc.2024.103026

Статтю представив д-р техн. наук, проф. УкрДУЗТ К. А. Трубчанінова.

Надійшла (Received) 27.05.2025

Pustovoitov Pavlo, Dr.Sci.Tech, Professor
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
Курпичова стр., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel./phone: +3(8-097) 737-44-91, e-mail: p.pustovoitov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-3884-0200

Voronets Oleksandr, PhD student
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
Курпичова стр., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel./phone: +3(8-050) 161-97-05, e-mail: oleksandr.voronets@infiz.khpi.edu.ua
ORCID ID: 0009-0005-5714-2370

УДК 004.722.62

Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахування QoS та енергозбереження / Пустовойтов П.Є., Воронець О.М. // . // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2025. – № 1 (13). – С. 64 – 79.

У статті запропоновано метод маршрутизації в сенсорних мережах на основі нечіткої логіки, що дозволяє балансувати між якістю обслуговування (QoS) та енергоспоживанням. Метод використовує інтегральну оцінку маршрутів, яка враховує затримку передачі, пропускну здатність і витрати енергії вузлів. Завдяки нечіткій логіці маршрут вибирається адаптивно, що забезпечує гнучке управління передачею даних у динамічних умовах мережі.

Проведено моделювання та порівняння запропонованого методу з класичними алгоритмами (Dijkstra, AODV, LEACH). Результати показали, що новий підхід забезпечує меншу затримку, вищу пропускну здатність і зниження енергоспоживання, що критично важливо для бездротових сенсорних мереж.

Запропонований метод має високу адаптивність, але потребує налаштування вагових коефіцієнтів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на динамічну оптимізацію параметрів маршрутизації та інтеграцію з іншими адаптивними протоколами.

Ключові слова: оптимальна маршрутизація; енергозбереження; якість обслуговування; сенсорна мережа; управління трафіком; пропускну здатність; метод маршрутизації; кластеризація вузлів.

UDC 004. 722.62

Method for providing optimal routing with account for QoS and energy conservation / Pustovoitov P.E., Voronets O.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2025. – № 1 (13). – P. 64 – 79.

The article proposes a routing method in sensor networks based on fuzzy logic, which allows balancing between quality of service (QoS) and energy consumption. The method uses integral route estimation, which takes into account transmission delay, throughput and energy consumption of nodes. Thanks to fuzzy logic, the route is chosen adaptively, which provides flexible data transmission control in dynamic network conditions.

The proposed method is simulated and compared with classical algorithms (Dijkstra, AODV, LEACH). The results show that the new approach provides lower latency, higher throughput and reduced energy consumption, which is critically important for wireless sensor networks.

The proposed method has high adaptability, but requires setting weight coefficients. Further research can be aimed at dynamic optimization of routing parameters and integration with other adaptive protocols.

Keywords: optimal routing; energy saving; quality of service; sensor network; traffic management; throughput; routing method; node clustering