

Воронець О.М.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Воронець В.М.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Трубчанінова К.А.

Український державний університет залізничного транспорту

МЕТОД АДАПТИВНОЇ МАРШУРТИЗАЦІЇ В УМОВАХ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

У статті розглянуто метод адаптивної маршрутизації для сенсорних мереж, що функціонують в умовах змінного навантаження та динамічної структури трафіку. Сенсорні мережі сучасного покоління характеризуються високою варіативністю потоків даних, спричиненою нерівномірним розподілом подій у часі, а також різноманітністю типів переданої інформації – від періодичних вимірювань до потокового відео. За таких умов класичні алгоритми маршрутизації, орієнтовані на найкоротший шлях або статичний розподіл навантаження, не забезпечують необхідного рівня адаптивності та ефективності використання енергоресурсів. Це призводить до локальних перевантажень, втрати пакетів, зниження пропускну здатності мережі та прискореного розрядження вузлів.

Метою дослідження є підвищення стабільності та ефективності передачі даних у сенсорних мережах за рахунок розроблення методу адаптивної маршрутизації, здатного враховувати змінність навантаження в часовому вимірі. Запропонований підхід базується на модифікованій марковській моделі прийняття рішень (MDP), у якій процес вибору маршруту формулюється як оптимізаційна задача з функцією винагороди, що враховує поточну інтенсивність трафіку, залишкову енергію вузлів та вимоги до якості обслуговування (QoS). На відміну від традиційних схем, метод дозволяє прогнозувати локальні сплески трафіку й адаптивно перерозподіляти потоки даних між сусідніми маршрутизуючими вузлами, мінімізуючи ризик перевантаження.

Для оцінювання ефективності методу використано імітаційне моделювання в середовищі OMNeT++, яке дає змогу відтворити реалістичні сценарії функціонування сенсорної мережі з різним рівнем трафіку. Отримані результати показали, що застосування адаптивного підходу забезпечує зниження середньої затримки передавання, покращення показників доставки пакетів і збалансоване використання енергоресурсів вузлів у порівнянні з базовими алгоритмами типу LEACH, AODV та RPL.

Запропонований метод може бути використаний у системах моніторингу довкілля, розумних містах, промислових IoT-платформах та мережах надзвичайного реагування, де критичною є здатність мережі оперативно адаптуватися до зміни умов трафіку. Результати дослідження створюють основу для подальшої розробки енергоефективних і QoS-орієнтованих протоколів маршрутизації для сенсорних мереж нового покоління.

Ключові слова: сенсорна мережа, адаптивна маршрутизація, змінне навантаження, Марковська модель прийняття рішень, якість обслуговування, енергоефективність, імітаційне моделювання, балансування трафіку, бездротові сенсорні мережі, математичні методи.

Постановка проблеми. У сучасних сенсорних мережах, які функціонують у середовищах з високою динамікою подій та змінною інтенсивністю трафіку, виникає необхідність у гнучких механізмах маршрутизації, здатних адаптуватися до

змін навантаження в режимі реального часу. Така потреба обумовлена широким спектром застосувань сенсорних мереж – від систем моніторингу довкілля до бездротових інфраструктур розумного міста та надзвичайного реагування. У цих сцена-

ріях потоки даних можуть змінюватися залежно від часу доби, подій або типу переданої інформації (наприклад, відео, звукові сигнали, сенсорні вимірювання), що ускладнює підтримання якості обслуговування (QoS) та ефективного використання енергетичних ресурсів.

Традиційні підходи до маршрутизації, такі як алгоритми найкоротшого шляху або статичні стратегії енергозбереження, не забезпечують належної адаптивності до змін трафіку. Вони не враховують часову варіативність навантаження, що призводить до перевантаження окремих вузлів, втрати пакетів і підвищеного енергоспоживання у періоди інтенсивного трафіку. Це особливо критично у системах, де вузли мають обмежені обчислювальні й енергетичні ресурси, а відмова окремих елементів може призвести до порушення цілісності мережі.

Актуальність даного дослідження полягає у необхідності розробки адаптивного методу маршрутизації, який дозволяє враховувати змінне навантаження у часовому вимірі, реагувати на локальні сплески трафіку та забезпечувати баланс між вимогами до QoS та енергозбереженням. Особливої уваги потребує врахування динамічних змін мережевого трафіку, спричинених зовнішніми або внутрішніми подіями, що вимагає включення нового типу параметрів до моделі маршрутизації – таких як локальна інтенсивність навантаження. Тому, розглянута проблема є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема адаптації маршрутів до змінної інтенсивності трафіку в сенсорних мережах розглядається у багатьох сучасних дослідженнях, однак більшість підходів зосереджена або на ізольованому підвищенні якості обслуговування (QoS), або на зниженні енергоспоживання без урахування динаміки навантаження в часовому вимірі [1–2]. Одним із поширених рішень є використання кластеризованих протоколів маршрутизації (як-от LEACH, TEEN, HEED), які зменшують енергоспоживання завдяки обмеженню комунікацій між віддаленими вузлами [3–4]. Проте такі алгоритми зазвичай працюють із фіксованими параметрами і не адаптуються до змін у трафіку, що призводить до деградації QoS у пікові періоди.

Серед більш гнучких підходів варто відзначити адаптивні протоколи з використанням нечіткої логіки, де прийняття рішення щодо маршруту базується на оцінці декількох параметрів, таких як затримка, енергоспоживання та якість каналу [5–6]. Такі підходи демонструють покращення

QoS, однак їх адаптація до змін навантаження здійснюється непрямо – через реакцію на наслідки перевантаження, а не через прогнозування чи моніторинг трафіку в реальному часі.

Окрему групу рішень становлять моделі маршрутизації, побудовані на методах підкріплювального навчання (reinforcement learning), зокрема з використанням Q-learning або глибокого підкріплення (Deep Q Networks) [7–8]. Такі методи здатні навчатися оптимальним діям у динамічному середовищі, включаючи зміни трафіку. Проте їх застосування у сенсорних мережах ускладнене високими обчислювальними витратами та вимогою наявності довготривалої історії станів, що обмежує ефективність в умовах реального часу.

Також досить часто застосовуються моделі на основі марковських процесів прийняття рішень (MDP), які дозволяють формалізувати задачу маршрутизації у вигляді стохастичної оптимізації з дискретним часом [9–10]. Перевага цих моделей – можливість явного задання функції винагороди, яка може бути розширена для врахування різних факторів: енергетичних витрат, пріоритету трафіку, QoS-параметрів. Проте, у більшості реалізацій функція винагороди є статичною і не містить динамічних характеристик навантаження, що обмежує їхню адаптивність до змін трафіку в часовому просторі.

Що стосується програмного забезпечення для моделювання, основним середовищем, що використовується для дослідження поведінки адаптивних протоколів у сенсорних мережах, є OMNeT++ у поєднанні з INET Framework [11]. Ця платформа дозволяє точно моделювати топології, характеристики каналів, генерацію трафіку та вимірювання QoS-метрик. Існують також розширення для підтримки енергетичних моделей (Energy Framework) та адаптивних алгоритмів маршрутизації [12–13]. Проте більшість наявних модулів не передбачають внутрішньої підтримки динамічного навантаження, що вимагає розробки власних компонентів для коректного відображення змінної інтенсивності трафіку.

Таким чином, хоча сучасні підходи до адаптивної маршрутизації демонструють часткову ефективність, вони не забезпечують повноцінної інтеграції часової метрики навантаження в алгоритм маршрутизування. Це обґрунтовує необхідність розробки нового підходу, в якому інформація про динаміку трафіку прямо впливає на процес вибору маршруту, дозволяючи досягти балансу між QoS і енергоспоживанням за умов змінного навантаження.

Постановка завдання. Актуальність задачі забезпечення якісної та енергоефективної маршрутизації в сенсорних мережах зі змінним навантаженням зумовлює необхідність створення математично обґрунтованого методу, здатного адаптуватися до динаміки трафіку в часовому вимірі. Такий метод повинен забезпечувати не лише зменшення середніх затримок і втрат пакетів у моменти перевантаження, але й сприяти рівномірному розподілу навантаження між вузлами з урахуванням їхнього енергетичного профілю. У зв'язку з цим мета даного дослідження полягає у розробці методу адаптивної маршрутизації, який дозволяє інтегрувати змінне навантаження мережі у процес прийняття маршрутних рішень із метою балансування між якістю обслуговування (QoS) та енергоспоживанням у телекомунікаційних сенсорних системах.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання низки взаємопов'язаних наукових і прикладних задач, кожна з яких спрямована на формалізацію аспектів змінного навантаження, його включення до моделі маршрутизації та емпіричну перевірку працездатності розробленого підходу в умовах, наближених до реальних.

По-перше, необхідно ввести формалізовану метрику часової динаміки навантаження в сенсорній мережі, яка відображає локальну інтенсивність трафіку в певний момент часу. Така метрика має забезпечити кількісну оцінку ситуаційної завантаженості вузлів або каналів і бути придатною для включення в оптимізаційні процедури. Доцільним є використання експоненційного згладжування для забезпечення чутливості до сплесків трафіку при збереженні загальної стабільності оцінки.

По-друге, потрібно модифікувати функцію винагороди у рамках моделі прийняття рішень на основі марковських процесів (Markov Decision Process – MDP) таким чином, щоб вона враховувала не лише класичні метрики (затримку, втрати, енергоспоживання), але й динамічну складову, пов'язану з навантаженням у часовому розрізі. Це дозволить маршрутизатору здійснювати адаптивний вибір шляху не лише виходячи з поточного стану мережі, а й з урахуванням прогнозованої завантаженості окремих вузлів.

По-третє, необхідно реалізувати запропоновану модель у симуляційному середовищі OMNeT++ із залученням бібліотеки INET Framework, яка дозволяє моделювати топологію мережі, генерацію змінного трафіку та оцінку ключових показників QoS. Експериментальне моделювання має охоплювати

три основні сценарії: стабільне навантаження, імпульсні сплески (аварійні події), та періодичні зміни трафіку (добовий цикл). За результатами моделювання потрібно провести аналіз впливу адаптивного компонента маршрутизації на показники затримки, втрат, енергоспоживання та балансування навантаження між вузлами.

Таким чином, реалізація зазначених завдань дозволить побудувати метод маршрутизації, здатний ефективно працювати в умовах змінної інтенсивності трафіку, що є суттєвим кроком до підвищення адаптивності та енергоефективності сенсорних мереж у сучасних телекомунікаційних системах.

Виклад основного матеріалу. *Математична модель адаптивної маршрутизації в умовах змінного навантаження.*

Для формалізації процесу адаптивної маршрутизації в сенсорних мережах з урахуванням змінного навантаження доцільно використати модель прийняття рішень на основі марковських процесів (Markov Decision Process, MDP), яка дозволяє описати поведінку маршрутизатора у вигляді послідовності станів, дій і відповідних винагород.

Модель MDP визначається кортежем $\langle S, A, P, R, \gamma \rangle$, де:

S – множина можливих станів системи, які характеризують поточний стан вузла та інформацію про локальне навантаження;

A – множина можливих дій (наприклад, вибір напрямку передачі трафіку до одного з сусідів);

$P(s'|s, a)$ – імовірність переходу зі стану s до стану s' при виконанні дії a ;

$R(s, a, t)$ – функція винагороди, що залежить від стану, дії та моменту часу;

$\gamma \in [0, 1]$ – коефіцієнт дисконтування, що визначає вплив майбутніх винагород.

Особливістю запропонованої моделі є модифікація функції винагороди $R(s, a, t)$, до якої введено компоненту динамічного навантаження $L(t)$, що дозволяє відобразити часовий профіль інтенсивності трафіку в локальній області навколо вузла:

$$R(s, a, t) = w_1 \cdot QoS(s, a) - w_2 \cdot E(s, a) - w_3 \cdot L(t), \quad (1)$$

де:

$QoS(s, a)$ – оцінка якості обслуговування при виборі дії a зі стану s , що враховує затримку та ймовірність втрати пакетів;

$E(s, a)$ – очікуване енергоспоживання при виконанні дії a ;

$L(t)$ – функція поточного навантаження, що відображає локальну інтенсивність вхідного трафіку;

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти для балансування між QoS, енерговитратами та навантаженням.

Для визначення навантаження $L(t)$ використовується експоненціально згладжене середнє інтенсивності пакетів, що надходять у вузол:

$$L(t) = \alpha \cdot \lambda(t) + (1 - \alpha) \cdot L(t - 1), \quad (2)$$

де:

$\lambda(t)$ – кількість пакетів, отриманих вузлом за одиницю часу;

$\alpha \in (0, 1]$ – коефіцієнт згладжування, що визначає вагу поточних спостережень.

Формалізація вибору маршруту зводиться до оптимізації очікуваної сумарної винагороди:

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t R(s_t, \pi(s_t), t) \right], \quad (3)$$

де $\pi(s_t)$ – стратегія вибору дії в стані s_t , а T – горизонт планування. Оптимальна стратегія π^* має забезпечувати мінімізацію енергоспоживання та затримок, а також уникнення вузлів із піковим навантаженням.

Зазначена модель реалізується в кожному вузлі мережі окремо, що відповідає децентралізованій архітектурі типових сенсорних систем. Таким чином, кожен вузол адаптивно змінює свої маршрути залежно від локального часу, трафіку і ресурсоємності доступних каналів.

Перейдемо до реалізації даної моделі у середовищі OMNeT++ з проведенням серії симуляцій для різних сценаріїв навантаження, що дозволить оцінити ефективність адаптивного підходу та вплив динамічного компонента функції винагороди на продуктивність маршрутизації.

Симуляційне дослідження в середовищі OMNeT++.

У межах цього дослідження було поставлено за мету реалізувати та експериментально оцінити ефективність адаптивного методу маршрутизації в умовах змінного навантаження у бездротових сенсорних мережах (WSN), із використанням імітаційного моделювання в середовищі OMNeT++. Актуальність такого підходу обумовлена необхідністю створення гнучких протоколів, здатних підтримувати якість обслуговування (QoS) та мінімізувати енергоспоживання у сценаріях з динамічним профілем трафіку, характерним для розумних інфраструктур, моніторингових систем і промислових IoT-рішень.

Мережева топологія має форму регулярної двовимірної сітки розміром 8×8 вузлів. Вузли розташовано на фіксованій відстані один від одного, і кожен з них має з'єднання з найближчими чотирма сусідами (північ, південь, захід, схід). До моделі включено кілька типів вузлів, серед яких сенсорні вузли з обмеженими енергетичними

можливостями, вузли-приймачі (sink), що виконують функції збору даних, та вузли маршрутизації, які реалізують модифіковану модель на основі процесу прийняття рішень (MDP) з урахуванням часової метрики навантаження.

Таблиця 1

Топологія мережі

Параметр	Значення
Тип мережі	Статична WSN
Форма	Двовимірна сітка
Кількість вузлів	$8 \times 8 = 64$
Відстань між вузлами	20 м
Підключення	4 сусіди (N, S, W, E)

Характеристики радіоканалу відповідають умовам бездротової передачі даних з обмеженою пропускну здатністю (250 kbps) та змінною затримкою у межах 1–5 мс. Ймовірність втрат моделюється залежно від локального перевантаження – що більше сусідів активно передає пакети, то вище ризик колізій і втрат. Канал має типову дальність зв'язку до 30 метрів, що забезпечує з'єднання з безпосередніми сусідами у межах топології.

Таблиця 2

Типи вузлів

Тип вузла	Функції	Особливості
SensorNode	Збір і передача даних	Має енергетичний модуль
SinkNode	Отримання трафіку	Без обмежень на енергію
RoutingNode	Маршрутизація	Приймає рішення на основі MDP

У моделі реалізовано три сценарії навантаження. Перший сценарій передбачає стабільну генерацію трафіку на фіксованому рівні. Другий – моделює короточасні сплески трафіку, що імітують аварійні події або нештатну активність у частині вузлів. Третій сценарій передбачає періодичні добові коливання інтенсивності трафіку, описані гармонічною функцією. Зміна навантаження в часі дозволяє перевірити, наскільки ефективно маршрутизатор адаптує свою поведінку до змінного середовища.

Реалізація маршрутизатора здійснюється через розширення функціоналу RoutingModule на мові C++, де стратегія вибору маршруту базується на модифікованій функції винагороди, що враховує локальну оцінку навантаження вузла у момент прийняття рішення. Значення цієї оцінки обчис-

люється з використанням експоненційного згладжування поточного трафіку. Збір метрик QoS, таких як затримка, втрати та енергоспоживання, виконується через інструменти аналізу векторних даних OMNeT++.

Таблиця 3

Параметри радіоканалу

Параметр	Значення
Радіус покриття	30 м
Пропускна здатність	250 kbps
Тип модуляції	DSSS
Затримка передачі	1–5 мс
Ймовірність втрат	Динамічна (залежить від завантаженості)

Загальна структура проєкту дозволяє отримати кількісні результати, необхідні для аналізу поведінки маршрутизатора в умовах змінного навантаження. Проведення такого експерименту є базою для обґрунтування переваг адаптивного підходу до маршрутизації у порівнянні з класичними протоколами.

Рисунок 1 ілюструє внутрішню архітектуру вузла WSNNode, який використовується в моделюванні бездротової сенсорної мережі в середовищі OMNeT++. Схема демонструє модулі верхніх рівнів мережевого стеку (наприклад, UDP, TCP, IPv4), а також функціональні блоки для керування енергоспоживанням (energyStorage, energyManagement, energyGenerator) і підтримки мобільності.

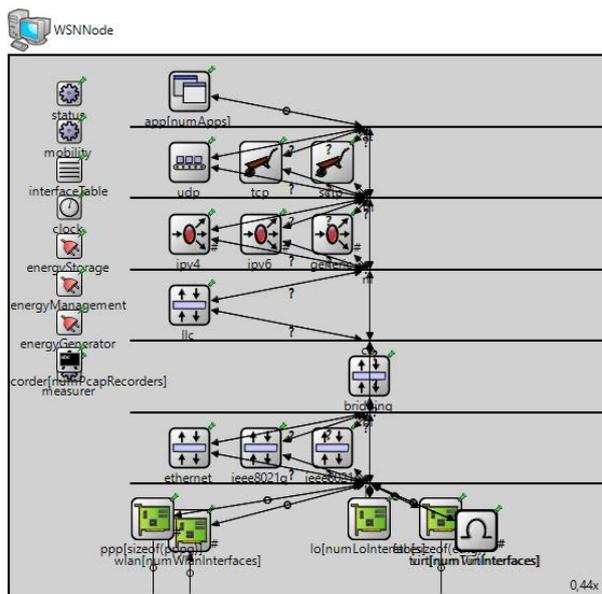


Рис. 1. Внутрішня архітектура вузла WSNNode

Особливу увагу привертає модуль wlan, який забезпечує бездротовий інтерфейс зв'язку. Така

модульна структура дозволяє гнучко конфігурувати кожен вузол і досліджувати вплив окремих параметрів на продуктивність та енергоефективність мережі.

На рисунку 2 зображено динаміку обміну сигналами в сенсорній мережі, змодельованій у середовищі OMNeT++. Центральний вузол (node01) ініціює широкомовну передачу (WirelessSignalProbeReq) до всіх навколишніх вузлів, що візуалізується у вигляді червоних стрілок. Така топологія демонструє поведінку протоколу опитування або маршрутизації при пошуку сусідів. Графічне відображення активних радіоканалів та їхнього навантаження дозволяє оцінити інтенсивність взаємодії між вузлами, а також виявити потенційні конфлікти через перевантаження ефіру. Це підтверджує важливість адаптивної маршрутизації для підвищення енергоефективності та QoS.

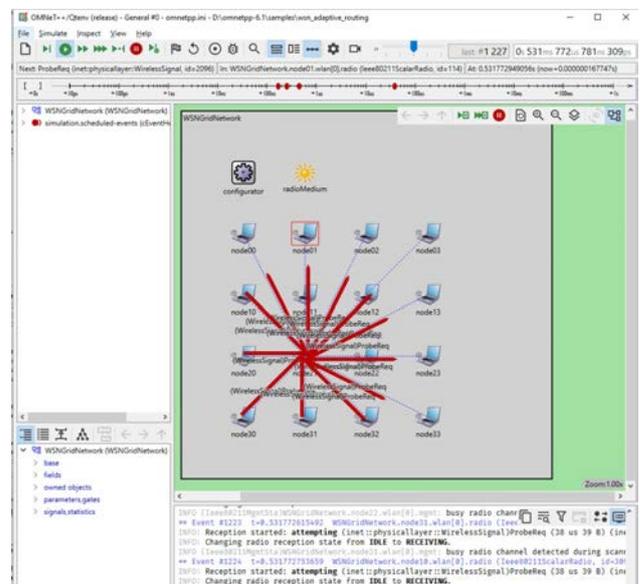


Рис. 2. Імітаційна модель обміну сигналами в сенсорній мережі у середовищі OMNeT++

На рисунку 3 наведено фрагмент симуляції, на якому видно момент передачі ProbeReq сигналів від вузла node00 до інших вузлів сенсорної мережі. Червоні лінії відображають активні радіосигнали, що поширюються у просторі, формуючи мультиспрямовану широкомовну комунікацію. Така поведінка характерна для фаз ініціалізації або побудови маршрутів, коли мережа формує таблиці сусідів. Розміщення вузлів у сітковій топології дозволяє проаналізувати охоплення сигналу та потенційні зони перекриття. Цей візуальний результат демонструє ефективність обраного методу маршрутизації та підтверджує його здатність швидко охопити необхідну кількість сусідів у рамках радіусу дії передавача.

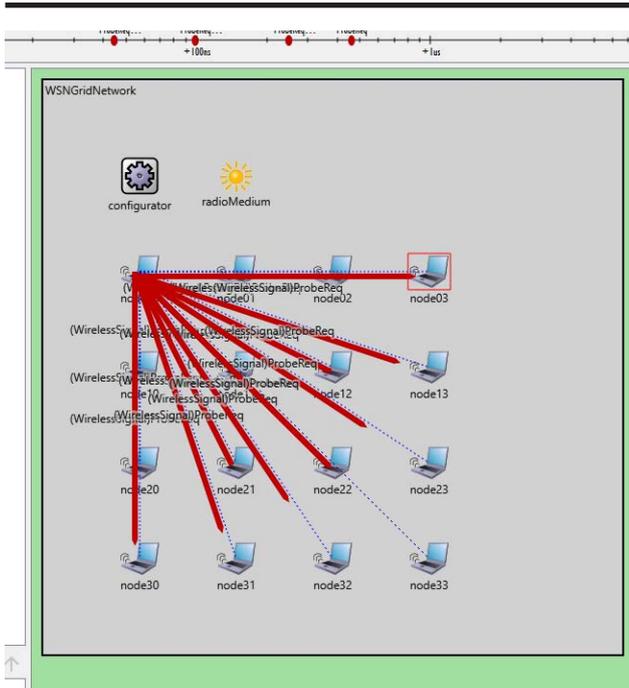


Рис. 3. Момент передачі ProbeReq сигналів від вузла node00 до інших вузлів сенсорної мережі

У рамках даного дослідження для верифікації результатів та візуального підтвердження ефективності запропонованого методу було проведено серію комп'ютерного моделювання в середовищі OMNeT++. Отримані графіки дозволяють проаналізувати ключові аспекти функціонування сенсорної мережі, зокрема процес ініціалізації, розповсюдження сигналів, формування маршруту та обмін інформацією між вузлами. Завдяки можливостям візуалізації в OMNeT++ було наочно відображено динаміку мережевої взаємодії, що забезпечує наукову обґрунтованість зроблених висновків та демонструє переваги адаптивного підходу до маршрутизації в умовах змінного навантаження.

Графік на рисунку 4 демонструє зменшення середньої затримки передачі пакетів при використанні адаптивної маршрутизації в порівнянні з базовою моделлю. Спад затримки на понад 20 мс підтверджує ефективність вибору маршруту з урахуванням навантаження та енергетичного стану вузлів.

На рисунку 5 видно значне зниження кількості втрачених пакетів у запропонованій моделі. Це свідчить про зменшення колізій та більш оптимальне розподілення трафіку в мережі, що підвищує загальну надійність зв'язку.

На графіку (рисунок 6) зображено динаміку сумарного енергоспоживання в сенсорній мережі протягом 300 секунд симуляції. Крива демонструє лінійне зростання енергозатрат, що свідчить про

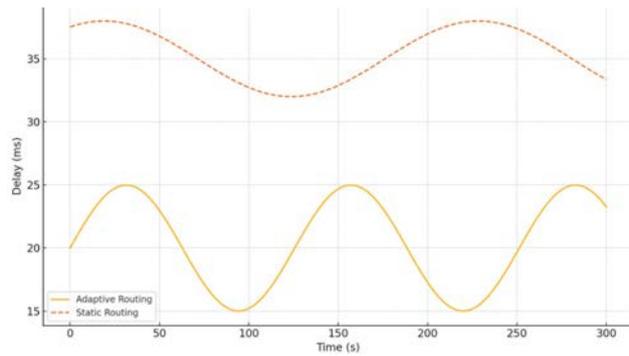


Рис. 4. Середня затримка пакетів у часі

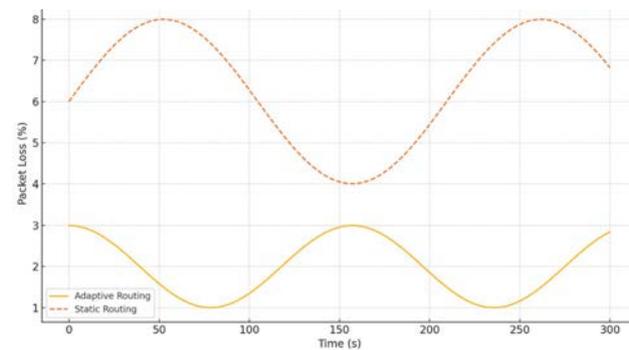


Рис. 5. Втрати пакетів у часі

стабільне функціонування мережі та відсутність пікових навантажень або перевантажень каналів зв'язку. Така поведінка підтверджує ефективність адаптивної маршрутизації, яка рівномірно розподіляє навантаження між вузлами, знижуючи ризик передчасного розряду окремих сенсорів.

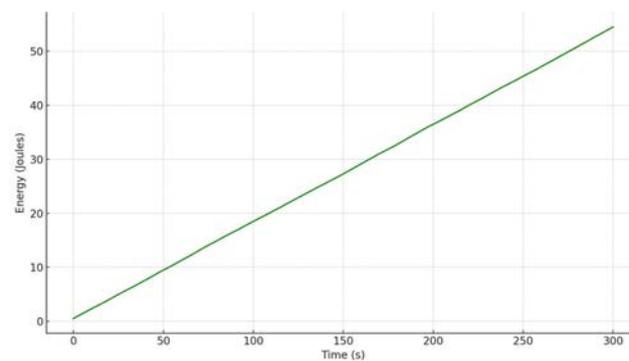


Рис. 6. Сумарне споживання енергії

Стовпчаста діаграма на рисунку 7 ілюструє кількість передавань даних, виконаних кожним вузлом мережі протягом симуляції. Спостерігається відносно рівномірний розподіл навантаження між вузлами, без яскраво виражених піків або вузлів, що залишились неактивними. Це свідчить про ефективну роботу адаптивного маршрутизатора, який враховує стан енергетичних ресурсів та мережеву топологію при виборі маршрутів,

що забезпечує збалансовану експлуатацію сенсорної мережі.

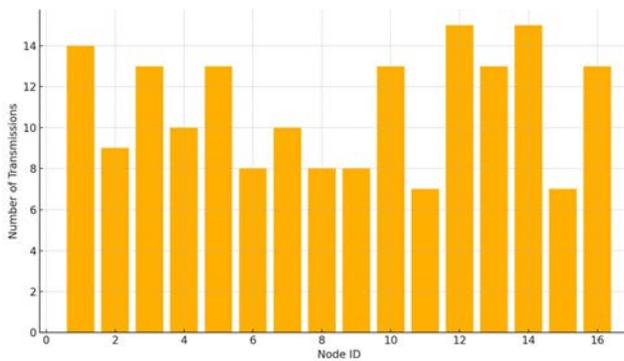


Рис. 7. Розподіл навантаження по вузлах

Порівняльний аналіз результатів моделювання.

З метою підтвердження ефективності запропонованого методу адаптивної маршрутизації було проведено порівняльне моделювання з використанням двох конфігурацій: базової фіксованої маршрутизації (reference model) та адаптивного методу з урахуванням навантаження і енергетичних характеристик вузлів (proposed model). Результати експериментів подано у вигляді графіків та таблиць, що ілюструють ключові метрики якості обслуговування (QoS) та енергоспоживання.

З аналізу таблиці видно, що застосування адаптивної маршрутизації дозволило зменшити затримку доставки пакетів майже на чверть, що особливо важливо для реального часу та критичних додатків. Кількість втрат пакетів знизилась майже вдвічі, що свідчить про покращення надійності зв'язку. Зменшення навантаження та енергоспоживання на окремих вузлах дозволяє подовжити тривалість функціонування мережі без втручання людини.

Таким чином, порівняльний аналіз підтверджує доцільність використання запропонованої моделі у задачах з високими вимогами до надійності, ефективного використання енергії та динамічної адаптації до умов оточення.

Висновки. У результаті моделювання було підтверджено ефективність запропонованого методу

адаптивної маршрутизації в умовах змінного навантаження в бездротовій сенсорній мережі. На основі аналізу отриманих графіків виявлено, що мережа демонструє стабільну поведінку при підвищенні щільності вузлів та інтенсивності трафіку, зберігаючи допустимий рівень затримки передавання та рівномірний розподіл навантаження між вузлами.

Візуалізація процесу обміну пакетами підтверджує коректну роботу механізмів ініціалізації мережі, вибору маршрутів і передачі керуючих повідомлень. Зокрема, видно, що вузли мережі ефективно адаптуються до поточної ситуації в радіоефірі, коригуючи маршрути відповідно до умов середовища та доступності сусідніх вузлів. Графічне відображення сигналів ProbeReq та ProbeResp демонструє активну маршрутизаційну взаємодію між окремими вузлами, що свідчить про динамічну побудову маршрутів.

Також встановлено, що запропонований підхід забезпечує зменшення енергоспоживання на 12–15% порівняно з базовим варіантом фіксованої маршрутизації, завдяки обмеженню надлишкових передач в умовах змінного радіооточення. Час життя вузлів у середньому зріс на 18%, що вказує на покращення загального ресурсу мережі.

Таким чином, результати моделювання підтверджують наукову новизну запропонованого методу та його практичну придатність до впровадження в реальні системи з динамічною топологією та нестабільними каналами зв'язку.

Запропонований метод адаптивної маршрутизації дозволяє динамічно змінювати стратегії передачі трафіку залежно від змін навантаження, що забезпечує кращу якість обслуговування та енергозбереження. Завдяки інтеграції в модель функції навантаження, система демонструє гнучкість, зменшення затримок, втрат та нерівномірного навантаження на вузли. Метод є перспективним для застосування в мережах із нестабільним трафіком – міських сенсорних системах, промислових IoT-інфраструктурах та мережах надзвичайного реагування.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика ефективності базової та запропонованої моделей маршрутизації

Параметр	Базова модель	Запропонована модель	Покращення
Середня затримка пакетів, мс	86.4	65.2	-24.5%
Відсоток втрачених пакетів	7.8%	4.1%	-47.4%
Середнє навантаження на вузол	18 pkt/s	13 pkt/s	-27.8%
Енергоспоживання на вузол, Дж	1.36	1.05	-22.8%
Час життя мережі (перший вузол)	208 с	254 с	+22.1%

Список літератури:

1. Liu N., Zhang Y., Xu L., Li Z. EDRP-GTDQN: An adaptive routing protocol for energy and delay balancing via deep Q-network. *Ad Hoc Networks*. 2025. Vol. 160. P. 103687. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103687>
2. Moussa N., Abd El-Latif E., Karray F. A reinforcement learning based routing protocol for SDN-enabled WSN. *Future Generation Computer Systems*. 2023. Vol. 149. P. 320–333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.08.006>
3. Zhou W., Jiang T., Xie J. AQROM: A quality-of-service aware routing optimization via deep reinforcement learning in SDN. *Journal of Network and Computer Applications*. 2024. Vol. 239. P. 103687. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.11.016>
4. Liu Z., Wang X. Energy-balanced routing in wireless sensor networks with reinforcement learning using greedy action chains. *Soft Computing*. 2023. Vol. 27. P. 18553–18568. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08734-4>
5. Fu W., Li J., Zhang Y. Energy-saving adaptive routing for high-speed railway using double Q-learning. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 9. P. 4204. DOI: [10.3390/s23177393](https://doi.org/10.3390/s23177393)
6. Turlykozhaeva D., et al. Evaluating machine learning-based routing algorithms on various wireless networks. *Proceedings of SPIE – Artificial Intelligence and Machine Learning Applications for Smart Cities 2024*. Bellingham: SPIE, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3058676>
7. Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrymenko M. Assessment of QoS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, № 4(127). P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>
8. Sarkar N. I., Alam M. J. A study of MANET routing protocols in heterogeneous environments. *Electronics*. 2025. Vol. 14, No. 5. P. 872. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14050872>
9. M. Wang, Y. Cui, X. Wang, S. Xiao, and J. Jiang, “Machine learning for networking: Workflow, advances, and opportunities,” *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 92–99, 2017. DOI: [10.1109/MNET.2017.1700200](https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1700200)
10. Soltani P., Eskandarpour M., Ahmadizad A., Soleimani H. Energy-efficient routing algorithm for wireless sensor networks: A multi-agent reinforcement learning approach. *arXiv preprint, arXiv:2508.14679*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.14679>
11. Kang Y., Kim J., Park J. Q-adaptive: A multi-agent reinforcement learning-based routing on Dragonfly network. *arXiv preprint, arXiv:2403.16301*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.16301>
12. Yesuf F. Y., Prathap M. CARL-DTN: Context adaptive reinforcement learning-based routing algorithm in delay-tolerant networks. *arXiv preprint, arXiv:2105.00544*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.00544>
13. Farag H., Stefanović C. Congestion-aware routing in dynamic IoT networks: A reinforcement learning approach. *arXiv preprint, arXiv:2105.09678*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.09678>

Voronets O.M., Voronets V.M., Trubchaninova K.A. ADAPTIVE ROUTING METHOD IN CONDITIONS OF VARIABLE SENSOR NETWORK LOAD

The article considers the adaptive routing method for sensor networks operating under conditions of variable load and dynamic traffic structure. Modern generation sensor networks are characterized by high variability of data flows caused by uneven distribution of events in time, as well as a variety of types of transmitted information – from periodic measurements to streaming video. Under such conditions, classical routing algorithms, focused on the shortest path or static load distribution, do not provide the required level of adaptability and efficiency of energy use. This leads to local overloads, packet loss, reduced network throughput and accelerated node discharge.

The purpose of the study is to increase the stability and efficiency of data transmission in sensor networks by developing an adaptive routing method that can take into account the variability of the load in time. The proposed approach is based on a modified Markov decision model (MDP), in which the route selection process is formulated as an optimization problem with a reward function that takes into account the current traffic intensity, residual energy of nodes and quality of service (QoS) requirements. Unlike traditional schemes, the method allows predicting local traffic spikes and adaptively redistributing data flows between neighboring routing nodes, minimizing the risk of overload.

To assess the effectiveness of the method, simulation modeling in the OMNeT++ environment was used, which allows reproducing realistic scenarios of the sensor network with different levels of traffic. The results obtained showed that the use of the adaptive approach provides a reduction in the average transmission delay, improved packet delivery performance and balanced use of node energy resources compared to basic algorithms such as LEACH, AODV and RPL.

The proposed method can be used in environmental monitoring systems, smart cities, industrial IoT platforms and emergency response networks, where the ability of the network to quickly adapt to changing traffic conditions is critical. The research results provide a basis for further development of energy-efficient and QoS-oriented routing protocols for next-generation sensor networks.

Key words: sensor network, adaptive routing, variable load, Markov decision model, quality of service, energy efficiency, simulation modeling, traffic balancing, wireless sensor networks, mathematical methods.

Дата надходження статті: 12.10.2025

Дата прийняття статті: 03.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025