

УДК 004.725

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/10>**Воронець О.М.**<https://orcid.org/0009-0005-5714-2370>Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Пустовойтов П.Є.**<https://orcid.org/0000-0003-3884-0200>Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОЇ ЕНЕРГІЇ ВУЗЛІВ З УРАХУВАННЯМ ТОПОЛОГІЇ ТА НАВАНТАЖЕННЯ В БЕЗДРОТОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

У статті розглянуто проблему оцінювання часу життя вузлів бездротових сенсорних мереж (БСМ), для яких обмеженість енергетичного ресурсу є визначальним чинником тривалості та надійності функціонування. Показано, що традиційні моделі, які базуються на припущеннях про сталий трафік або рівномірне навантаження, не здатні точно описати процес деградації мережі в умовах просторово-часової неоднорідності трафіку та змінних характеристик каналів зв'язку. У роботі сформульовано аналітичну модель енергоспоживання, що враховує миттєві витрати потужності на передавання та приймання даних, залежність втрат енергії від відстані до приймача та інтенсивності потоків інформації.

Запропонована модель дозволяє визначити залишкову енергію вузла як функцію часу, встановити порогові умови його деградації та отримати аналітичний вираз для оцінки тривалості роботи в стаціонарних і динамічно змінних умовах. Особливу увагу приділено критеріям функціонального завершення роботи мережі, зокрема моменту відмови найслабшого вузла та часу, коли частка працездатних елементів зменшується нижче критичного порогу.

Для валідації моделі проведено чисельне моделювання на прикладі мережі з 25 вузлів за різних інтенсивностей трафіку, відстаней передавання та параметрів енергоспоживання. Результати демонструють істотний вплив топологічних та трафікових характеристик на тривалість роботи вузлів і наочно підтверджують адекватність запропонованої аналітичної залежності. Встановлено, що зростання інтенсивності передавання або збільшення середньої відстані до приймача призводить до різкого скорочення часу життя елементів мережі, що узгоджується з теоретичними передбаченнями моделі.

Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальших досліджень, пов'язаних з оптимізацією маршрутизації, балансування навантаження та планування розгортання БСМ, забезпечуючи можливість точного прогнозування деградації та підвищення енергоефективності мережевих систем.

Ключові слова: сенсорна мережа, математична модель, енергія вузлів, якість обслуговування, енергоефективність, імітаційне моделювання, бездротові сенсорні мережі, передача даних, топологія мережі, оптимізація енергоресурсів.

Постановка проблеми. Бездротові сенсорні мережі (БСМ) є ключовим компонентом сучасних інформаційно-комунікаційних систем, що забезпечують збір, передавання та обробку даних у широкому спектрі застосувань – від екологічного моніторингу та систем безпеки

до медичних, промислових і військових задач. Незважаючи на стрімкий розвиток апаратної бази та протоколів зв'язку, проблема обмеженого енергетичного ресурсу сенсорних вузлів залишається критичною для забезпечення довготривалої та надійної роботи мережі. У зв'язку



з цим особливого значення набуває задача точного оцінювання часу життя окремих вузлів та всієї мережі в цілому.

У більшості практичних випадків сенсорні вузли функціонують у складних умовах, де інтенсивність трафіку, топологія мережі та характеристики каналів зв'язку можуть змінюватися в часі. Це створює необхідність у розробці моделей, здатних враховувати неоднорідність навантаження та просторово-часову динаміку процесів енергоспоживання. Традиційні підходи, що базуються на спрощених припущеннях про постійне енергоспоживання або рівномірний розподіл навантаження, не забезпечують достатньої точності для прогнозування деградації мережі та прийняття ефективних рішень щодо її оптимізації.

Запропонована у даній роботі модель орієнтована на подолання зазначених обмежень і дозволяє аналітично описати процес вичерпання енергетичних ресурсів вузлів з урахуванням таких важливих факторів, як інтенсивність передавання та приймання даних, відстань до приймача, втрати у середовищі та критичні порогові значення енергії. Розробка та валідація цієї моделі створює теоретичну базу для подальших досліджень з оптимізації маршрутизації, балансування навантаження та планування розгортання БСМ з урахуванням обмежених енергетичних можливостей.

Таким чином, актуальність дослідження визначається як науковою потребою у вдосконаленні моделей оцінки життєвого циклу сенсорних мереж, так і практичною важливістю для розробки енергоефективних систем з прогнозованою тривалістю функціонування в реальних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінка часу життя вузлів є ключовим аспектом при проектуванні бездротових сенсорних мереж, особливо в енергетично обмежених умовах. Від ефективності моделей, що описують процес споживання енергії, залежить здатність мережі тривалий час забезпечувати необхідну якість обслуговування та зберігати функціональне покриття. У зв'язку з цим значна кількість наукових праць присвячена пошуку адекватних математичних і алгоритмічних рішень, які дозволяють точно оцінити або прогнозувати залишкову енергію та час роботи окремих вузлів чи всієї системи. Проведений огляд дозволяє виявити існуючі підходи, їх переваги та обмеження, а також визначити напрямки подальшого удосконалення моделей з урахуванням просторової структури та змінного навантаження в мережі.

Серед основних підходів – аналітичні моделі енергоспоживання вузла, які враховують витрати на передавання й приймання сигналу з відстанню та зниженою продуктивністю інтерфейсів [1-2]. Інший важливий напрям – оптимізаційні алгоритми (наприклад, лінійне програмування, евристичні методи), спрямовані на максимізацію мінімального або середнього часу життя мережі з урахуванням топології й балансування навантаження [3-5]. Застосування моделей з учасниками рухомих вузлів або мобільних приймачів дозволяє підвищити ефективність систем, хоча і значно ускладнює їхню реалізацію [6].

Окремі роботи концентруються на використанні кластеризації, побудові енергоефективних маршрутів і комбінованих підходах, що поєднують маршрутизацію та планування чергування вузлів у режимах сну й активності [7-9]. Ці стратегії дозволяють знизити загальне навантаження на мережу, зменшуючи енергоспоживання без шкоди для покриття.

Сучасні акцентовані дослідження використовують методи машинного навчання для швидкої оцінки часу життя мережі, зокрема глибокі нейронні мережі, що демонструють високу точність у реальному часі [10]. Такі моделі можуть бути використані як надбудова над класичними аналітичними підходами, підвищуючи гнучкість і адаптивність до зміни параметрів навколишнього середовища.

Особлива увага приділяється також гібридним системам з енергетичними джерелами на вузлах – наприклад, збирання енергії від радіочастотного випромінювання або сонячного світла. Відповідні дослідження демонструють можливість суттєвого подовження тривалості життя мережі [11-13]. Проте реалізація таких систем потребує більш складного планування й урахування випадкових зовнішніх чинників (наприклад, кліматичних умов).

Таким чином, ключовими перевагами сучасних моделей є врахування фізичних характеристик середовища, здатність адаптації до змін навантаження та підтримка складних топологічних сценаріїв. Недоліками залишаються складність практичної реалізації, висока обчислювальна складність та відсутність універсальності при зміні зовнішніх умов або класу застосувань.

Проведений аналіз показує, що немає універсального підходу до задачі оцінки часу життя БСМ. Аналітичні моделі забезпечують простоту й швидкість, тоді як оптимізаційні та ML-методи забезпечують гнучкість і точність. Раціональ-

ним напрямом подальших досліджень є побудова гібридних рішень, які поєднують переваги аналітичних формул із прогнозною потужністю нейронних або статистичних моделей.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є побудова аналітичної моделі оцінки часу життя вузлів бездротової сенсорної мережі з урахуванням змінного навантаження, топологічного розташування та втрат енергії, що залежать від відстані передавання. На відміну від традиційних підходів, запропонована модель покликана забезпечити більш точне прогнозування моменту деградації вузлів, виходячи з реальних характеристик трафіку й енергоспоживання.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі основні задачі:

- необхідно сформулювати математичний опис миттєвого та інтегрованого енергоспоживання сенсорного вузла на основі параметрів трафіку та просторових характеристик;
- слід визначити функцію залишкової енергії у часі та встановити критерії деградації вузлів залежно від порогових значень енергетичного ресурсу;
- потрібно побудувати аналітичний вираз для оцінки часу життя вузла в умовах як стаціонарного, так і змінного навантаження;
- здійснити чисельне моделювання для валідації запропонованої моделі та проаналізувати її поведінку при різних вхідних параметрах.

Реалізація цих задач дозволить не лише підвищити точність оцінки життєвого циклу сенсорної мережі, а й створити основу для подальшої оптимізації енергоспоживання шляхом адаптивної маршрутизації, динамічного балансування трафіку та вибору топологій з урахуванням обмежень енергетичного ресурсу.

Виклад основного матеріалу. *Математична модель оцінки життя вузлів сенсорної мережі.* З метою оцінювання часу життя бездротової сенсорної мережі необхідно враховувати динаміку енергоспоживання окремих вузлів, що є функцією навантаження, топологічного розміщення, інтенсивності трафіку та характеристик середовища. Запропонована нижче модель дає змогу аналітично описати процес витрати енергії вузлами мережі та визначити критичні моменти їх деградації.

Розглянуто множину сенсорних вузлів $N = \{1, 2, \dots, N\}$, кожен з яких характеризується початковим запасом енергії $E_i^{(0)}$ [Дж]. Даний параметр визначає максимально можливий енергетичний ресурс вузла і до моменту його повного

виснаження. На відміну від спрощених моделей, де припускається постійне енергоспоживання або однорідне навантаження, у запропонованій моделі враховується змінність трафіку у часі, а також просторові особливості передавання даних, зокрема залежність енергетичних втрат від відстані до приймача.

Припустимо, що миттєве енергоспоживання вузла в момент часу t визначається сумарною потужністю, витраченою на передавання та приймання пакетів:

$$P_i(t) = P_i^{tx}(t) + P_i^{rx}(t), \quad (1)$$

де $P_i^{tx}(t)$ – потужність, яка витрачається на активне передавання даних;

$P_i^{rx}(t)$ – потужність, що витрачається на приймання інформації, включаючи власні й транзитні пакети.

Передавання в сенсорних мережах характеризується експоненційною залежністю втрат енергії від відстані до приймача, що відображено в моделі передавальної потужності:

$$P_i^{tx}(t) = \alpha \cdot \lambda_i(t) \cdot d_i(t)^\gamma, \quad (2)$$

де $\lambda_i(t)$ – інтенсивність потоку даних, які передає вузол i , [біт/с];

$d_i(t)$ – ефективна (усереднена) відстань до приймача, [м];

γ – показник втрат у середовищі (характеризує затухання сигналу, звичайно $2 \leq \gamma \leq 4$);

α – коефіцієнт пропорційності, що враховує апаратну ефективність передавача.

У свою чергу, потужність приймання залежить від кількості оброблюваних вхідних пакетів і записується як:

$$P_i^{rx}(t) = \beta \cdot \mu_i(t), \quad (3)$$

де $\mu_i(t)$ – інтенсивність транзитного чи локального приймання вузлом i , [біт/с];

β – питомий коефіцієнт енергоспоживання для приймального тракту.

Таким чином, загальна миттєва потужність, яка споживається вузлом у момент часу t , має вигляд:

$$P_i(t) = \alpha \cdot \lambda_i(t) \cdot d_i(t)^\gamma + \beta \cdot \mu_i(t). \quad (4)$$

Інтегруючи дану потужність за часом, отримаємо загальну витрачену енергію вузла i в інтервалі часу $[0, T]$:

$$E_i(t) = \int_0^T P_i(t) dt = \int_0^T (\alpha \cdot \lambda_i(t) \cdot d_i(t)^\gamma + \beta \cdot \mu_i(t)) dt. \quad (5)$$

Відповідно, функція залишкової енергії вузла в момент часу t задається як:

$$E_i^{res}(t) = E_i^{(0)} - \int_0^t (\alpha \cdot \lambda_i(\tau) \cdot d_i(\tau)^\gamma + \beta \cdot \mu_i(\tau)) d\tau. \quad (6)$$

Фізично це означає, що вузол поступово втрачає енергію внаслідок передавання та обробки інформації. Момент, коли залишкова енергія опускається нижче за визначене порогове значення $\varepsilon \cdot E_i^{(0)}$, вважається точкою деградації вузла, тобто його функціональної недієздатності:

$$E_i^{res}(t) \leq \varepsilon \cdot E_i^{(0)}, \quad 0 < \varepsilon < 1. \quad (7)$$

На основі цього визначимо час життя вузла – це найменший момент часу, коли досягнуто або перевищено поріг знеструмлення:

$$T_i^{life} = \inf \{ t \geq 0 \mid E_i^{res}(t) \leq \varepsilon \cdot E_i^{(0)} \}. \quad (8)$$

У випадку постійних параметрів трафіку та розташування (λ_i, μ_i, d_i , не залежать від часу), отримаємо аналітичну формулу оцінки часу життя:

$$T_i^{life} = \frac{E_i^{(0)} - \varepsilon \cdot E_i^{(0)}}{\alpha \cdot \lambda_i \cdot d_i^\gamma + \beta \cdot \mu_i} = \frac{(1 - \varepsilon) E_i^{(0)}}{\alpha \cdot \lambda_i \cdot d_i^\gamma + \beta \cdot \mu_i}. \quad (9)$$

Цей вираз дає пряму оцінку тривалості функціонування вузла залежно від початкової енергії, параметрів передавання та трафіку.

Однак у реальних системах значення λ_i, μ_i, d_i змінюються з часом. Тому доцільно використовувати усереднені значення для наближеної оцінки:

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda_i(t) dt, \quad (10)$$

$$\bar{\mu}_i = \frac{1}{T} \int_0^T \mu_i(t) dt, \quad (11)$$

$$\bar{d}_i = \frac{1}{T} \int_0^T d_i(t) dt. \quad (12)$$

Після цього модель часу життя вузла може бути апроксимована у вигляді:

$$T_i^{life} \approx \frac{(1 - \varepsilon) E_i^{(0)}}{\alpha \cdot \bar{\lambda}_i \cdot \bar{d}_i^\gamma + \beta \cdot \bar{\mu}_i}. \quad (13)$$

Такий підхід дозволяє адаптувати модель до нестабільних режимів роботи мережі, у яких трафік, топологія або стан каналів зв'язку змінюються у часі.

Критерій оцінки часу життя сенсорної мережі. Для комплексної оцінки часу життя сенсорної мережі в цілому, необхідно враховувати не лише індивідуальні характеристики окремих вузлів, але й поведінку всієї системи в контексті функціонального покриття. У практиці проектування та аналізу бездротових сенсорних мереж

використовують кілька формальних критеріїв, які дають змогу визначити момент, коли мережу можна вважати такою, що вичерпала свій життєвий цикл.

Перший критерій – це мінімальний час життя серед усіх вузлів, який відображає момент відмови найслабшого вузла:

$$T_{min}^{net} = \min_{i \in N} T_i^{life}. \quad (14)$$

Цей підхід відображає найбільш песимістичну оцінку, в якій навіть одинична деградація одного вузла вважається завершенням функціонування всієї системи. Такий критерій має сенс у критичних застосуваннях (наприклад, медичних або військових), де втрата одного вузла може призвести до порушення цілісності даних або втрати зони покриття.

Другий, більш гнучкий критерій – це втрата покриття мережі, що базується на зменшенні кількості працездатних вузлів до певного критичного рівня. Зазвичай цей рівень визначається параметром $\theta \in (0, 1)$, який характеризує допустиму частку «живих» вузлів відносно початкової кількості:

$$T_{min}^{net} = \inf \left\{ t \geq 0 \mid \frac{|N_{alive}(t)|}{N} \leq \theta \right\}, \quad (15)$$

де $N_{alive}(t) = \{ i \in N \mid E_i^{res}(t) > \varepsilon \cdot E_i^{(0)} \}$.

Цей критерій має чіткий фізичний зміст: він відображає той момент часу, коли кількість вузлів, що залишилися працездатними (тобто мають енергію вище порогового значення $\varepsilon \cdot E_i^{(0)}$, опускається нижче певного порогового рівня, при якому мережа вже не здатна забезпечити необхідну щільність спостереження або збереження топології.

Таким чином, (14) дає змогу оцінити гарантовано мінімальний строк функціонування, тоді як (15) – більш адаптивну характеристику реального зниження ефективності мережі, що відповідає сценаріям поступової деградації.

Експериментальна перевірка критеріїв. З метою перевірки адекватності запропонованої моделі оцінки часу життя вузлів було проведено моделювання сенсорної мережі за різних конфігурацій топології, інтенсивності трафіку та параметрів енергоспоживання.

Для моделювання обрана мережа з 25 вузлів, розташованих на площині 100×100 м у вигляді квадратної решітки. Початковий енергетичний ресурс усіх вузлів становить $E_i^{(0)} = 2$ Дж. Інтенсивність генерації трафіку змінюється в діапазоні $\lambda_i \in [100, 500]$ біт/с. Значення d_i визначаються

евклідовими відстанями до найближчого вузла-приймача.

У процесі моделювання були встановлені такі значення основних параметрів моделі: коефіцієнт пропорційності для передавання даних $\alpha = 10^{-9}$ Дж/(біт·γ) Дж, що відображає ефективність передавального тракту; питомі енергетичні витрати на приймання $\beta = 5 \cdot 10^{-8}$ Дж/біт; експонента затухання сигналу в середовищі γ взята рівною 2.5, що відповідає типовим умовам бездротового розповсюдження у відкритому просторі; а пороговий рівень деградації вузла ε визначено як 0.1, тобто вузол вважається непрацездатним після втрати 90% початкового енергетичного ресурсу. Ці значення відповідають типовим характеристикам сенсорного обладнання та забезпечують реалістичну оцінку часу життя вузлів.

Для демонстрації практичного застосування запропонованої моделі та перевірки її аналітичних передбачень було проведено серію чисельних експериментів за фіксованих умов трафіку та просторового розташування вузлів. У таблиці наведено результати розрахунку часу життя для окремих сенсорних вузлів за різних значень інтенсивності передавання даних, середньої відстані до приймача та навантаження на приймальний тракт. Значення часу життя T_i отримано відповідно до формули (13), яка враховує як передавальні, так і приймальні енергетичні витрати. Таблиця ілюструє вплив параметрів мережі на тривалість функціонування вузлів і дозволяє виявити найбільш уразливі компоненти системи.

Час життя окремих вузлів при фіксованому трафіку

Вузол	l	d , м	μ , біт/с	T_i , с
1	100	10	200	34918
5	200	20	300	12437
13	150	25	250	16029
17	400	15	400	6219
25	500	30	500	3980

На рисунку 1 проілюстровано зміну часу життя сенсорного вузла залежно від інтенсивності трафіку λ при фіксованих значеннях відстані до приймача та інтенсивності приймання. Як видно з кривої, із зростанням λ спостерігається стрімке зменшення часу життя вузла. Це цілком відповідає фізичній природі процесу: збільшення кількості передаваних бітів за одиницю часу підвищує миттєве енергоспоживання, що призводить до швидшого виснаження енергетичного ресурсу. Така залежність підтверджує достовірність формули (13) і демонструє, що навіть невелике зростання трафіку може суттєво вплинути на тривалість роботи мережі.

Графік на рисунку 2 відображає зміну залишкової енергії $E(t)$ для трьох різних вузлів із різними параметрами навантаження. Криві показують поступове зниження енергетичного ресурсу відповідно до інтенсивності їхньої роботи. Пунктирна лінія позначає пороговий рівень $\mu \cdot E(0)$, нижче якого вузол вважається деградованим. Аналіз показує, що вузли з вищим трафіком або біль-

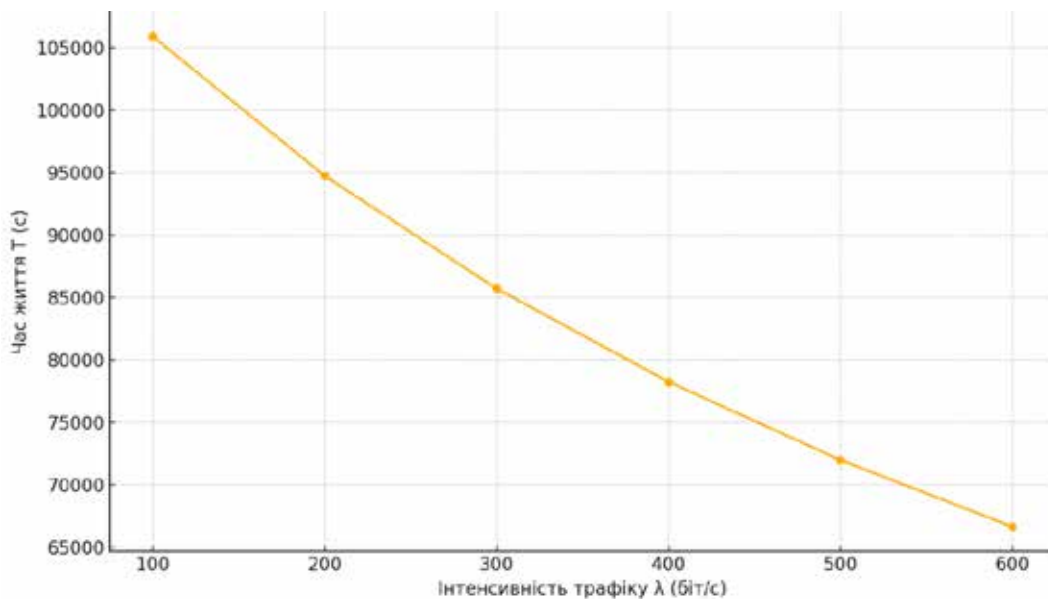


Рис. 1. Залежність часу життя вузлів від інтенсивності трафіку при фіксованій відстані (λ змінюється від 100 до 600 біт/с, $d = 20$ м)

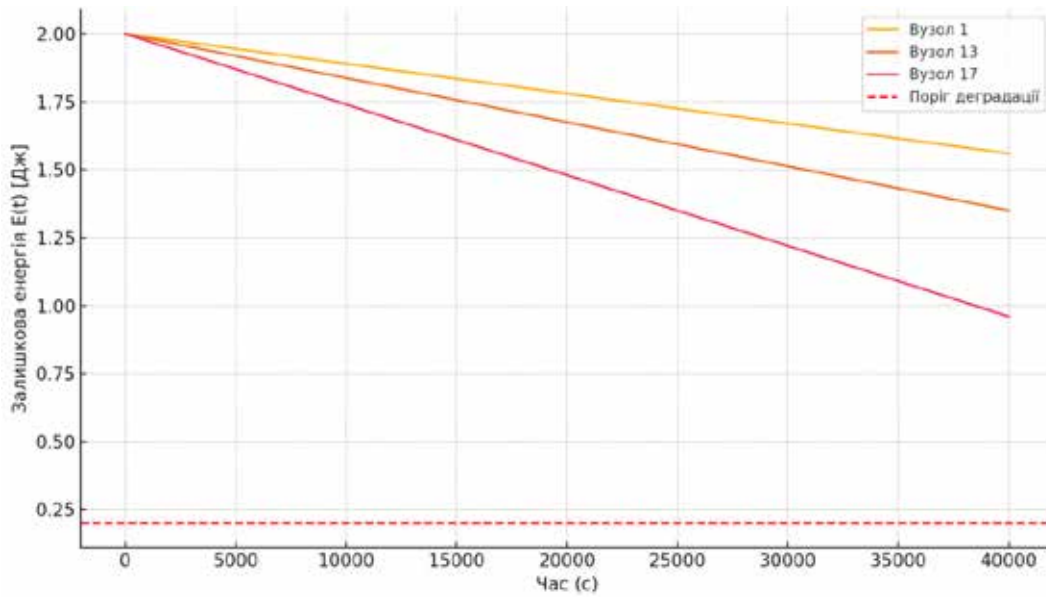


Рис. 2. Залишкова енергія вузлів у часі ($E(t)$) для вузлів 1, 13, 17)

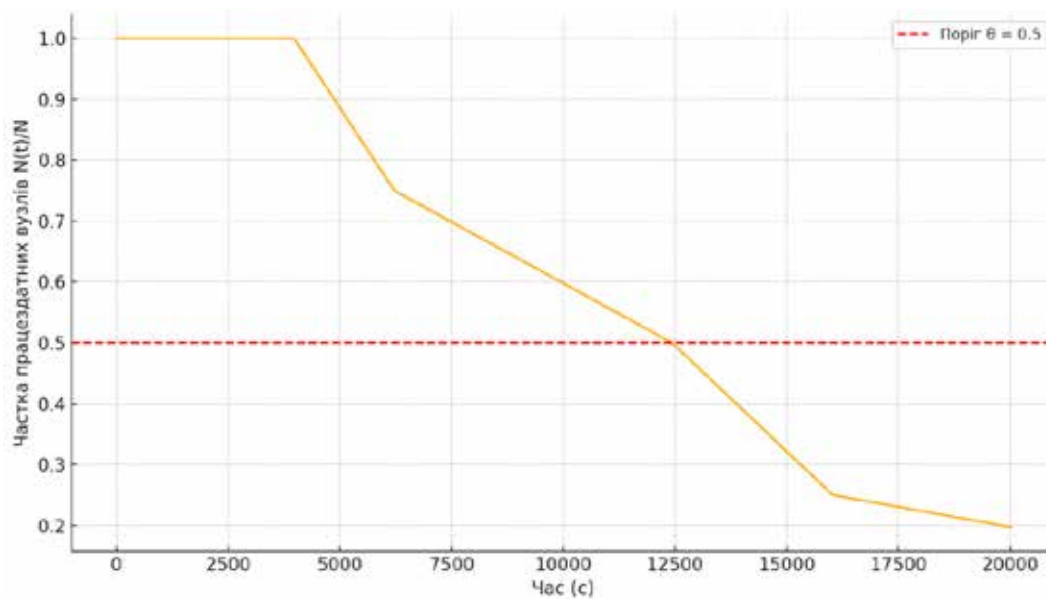


Рис. 3. Кількість працездатних вузлів $N(t)/N$ з плином часу (критичний поріг $\theta=0.5$)

шою відстанню до приймача досягають порогу набагато раніше. Цей графік наочно демонструє динаміку виснаження енергії у вузлах і дозволяє оцінити час, коли окремі компоненти мережі втраять працездатність.

Третій графік відображає зміну частки працездатних вузлів $N(t)/N$ у процесі функціонування мережі. Крива показує поступове зменшення кількості вузлів, що зберігають залишкову енергію вище порогового рівня. Особливу увагу слід звернути на горизонтальну лінію, що позначає критичний рівень $\theta=0.5$. У момент перетину цього рівня

система втрачає здатність підтримувати необхідне покриття або щільність збирання даних.

Такий аналіз дозволяє виявити момент функціонального зниження якості обслуговування мережі, що є ключовим для проектування надійних телеметричних систем.

Висновки. Результати моделювання демонструють пряму залежність між інтенсивністю трафіку, відстанню до приймача та часом життя сенсорних вузлів. Зокрема, при зростанні інтенсивності передавання даних та збільшенні середньої відстані до приймача, спостерігається суттєве

зменшення тривалості роботи вузлів. Це пояснюється фізичною природою процесу: передавання інформації на більші відстані потребує більших енергетичних витрат через експоненціальне зростання втрат сигналу в середовищі, а підвищення швидкості передачі збільшує загальну кількість витраченої енергії. Така поведінка повністю узгоджується з аналітичним виразом (13), що описує час життя вузла як функцію передавальних параметрів і дає змогу прогнозувати його деградацію залежно від мережевого навантаження.

Особливу увагу заслуговує найменший час життя серед усіх вузлів у мережі. Саме цей параметр визначає момент відмови першого (найслабшого) вузла, що критично важливо для застосувань з підвищеними вимогами до надійності, таких як моніторинг техногенно небезпечних об'єктів або військові системи. Відповідність цього показника

критерію (14) дає змогу швидко оцінити гарантований мінімальний термін працездатності мережі.

Ще одним важливим спостереженням є динаміка зменшення кількості працездатних вузлів у часі. Після досягнення критичного рівня, коли частка вузлів, що залишаються функціональними, падає нижче 50%, мережа втрачає здатність до забезпечення повного покриття або підтримки необхідної щільності збирання даних. Це явище описується критерієм (15) і відображає реалістичний сценарій поступової деградації системи, яка ще може працювати, але вже не забезпечує задану якість обслуговування.

Таким чином, отримані результати підтверджують теоретичні положення моделі та дозволяють на практиці оцінювати ефективність мережевої інфраструктури, прогнозувати її деградацію й оптимізувати параметри конфігурації з метою продовження загального часу функціонування мережі.

Список літератури:

1. Heinzelman W. B., Chandrakasan A. P., Balakrishnan N. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. 2000. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926982>
2. Пустовойтов П., Воронець О. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахування QoS та енергозбереження. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Інформатика і моделювання*. 2025. Т. 1, № 1 (13). С. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>
3. Chang J. H., Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2004. Vol. 12, no. 4. P. 609–619. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNET.2004.833122>
4. Dietrich I., Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*. 2009. Vol. 5, no. 1. P. 1–39. DOI: <https://doi.org/10.1145/1464420.1464425>
5. 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, no. 4 (127). P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>
6. Воронець О. М., Пустовойтов П. Є. Метод формування зон покриття сенсорної мережі з нерівномірною щільністю вузлів. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2025. № 2 (24). С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.02.05>
7. Sivakumar N. R., Pappa N. An optimized energy-efficient clustering and routing protocol for wireless sensor networks using a hybrid moth-flame optimization algorithm. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 21. Art. 8123. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218123>
8. Компанієць В.О., Пустовойтов П.Є. Метод математичного моделювання самоподібного трафіку у інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ*. 2025. Т. 4 (78). С. 187–189. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.187>
9. Сокол Г.В., Ковда Є.О. Метод виявлення несанкціонованих вузлів на MAC-рівні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 4. С. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/12>
10. Савченко М.В., Шиман М.В., метод аналізу завантаження вузлів кластеру mesh-мережі на основі математичної моделі мереж Джексона. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2025. Т. 1, № 79. С. 201–204. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.201-204>
11. Sudevalayam S. Advances in energy harvesting for sustainable wireless sensor networks: Challenges and opportunities. *Hardware*. 2025. Vol. 3, no. 1. P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/hardware3010001>
12. Gupta A. Enhanced hybrid energy harvesting strategies for sustainable wireless sensor network performance. *International Journal of Computer Applications*. 2025. Vol. 187, no. 3. P. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2025924826>
13. Sung G.-M., Chen S.-H., Choppa V., Yu C.-P. Hybrid radio-frequency-energy and solar-energy-harvesting-integrated circuit for IoT and low-power applications. *Electronics*. 2024. Vol. 14, no. 11. Art. 2192. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14112192>

Voronets O.M., Pustovoitov P.Ye. MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING RESIDUAL ENERGY OF NODES TAKING INTO ACCOUNT TOPOLOGY AND LOAD IN A WIRELESS SENSOR NETWORK

The article considers the problem of estimating the lifetime of wireless sensor network (WSN) nodes, for which the limited energy resource is a determining factor in the duration and reliability of operation. It is shown that traditional models based on assumptions about constant traffic or uniform load are unable to accurately describe the process of network degradation in conditions of spatio-temporal heterogeneity of traffic and variable characteristics of communication channels. The paper formulates an analytical model of energy consumption that takes into account the instantaneous power consumption for data transmission and reception, the dependence of energy losses on the distance to the receiver and the intensity of information flows.

The proposed model allows determining the residual energy of a node as a function of time, establishing threshold conditions for its degradation, and obtaining an analytical expression for estimating the duration of operation in stationary and dynamically changing conditions. Particular attention is paid to the criteria for the functional termination of network operation, in particular, the moment of failure of the weakest node and the time when the proportion of serviceable elements decreases below the critical threshold.

To validate the model, numerical simulations were conducted on the example of a network of 25 nodes with different traffic intensities, transmission distances and energy consumption parameters. The results demonstrate a significant impact of topological and traffic characteristics on the duration of node operation and clearly confirm the adequacy of the proposed analytical dependence. It was found that an increase in transmission intensity or an increase in the average distance to the receiver leads to a sharp reduction in the lifetime of network elements, which is consistent with the theoretical predictions of the model.

The proposed approach can be used as a basis for further research related to routing optimization, load balancing and planning for BSM deployment, providing the ability to accurately predict degradation and increase energy efficiency of network systems.

Keywords: *sensor network, mathematical model, node energy, quality of service, energy efficiency, simulation modeling, wireless sensor networks, data transmission, network topology, energy resource optimization.*

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026