

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396:004.75

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/02>

**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»

**Воронець В.М.**

<https://orcid.org/0000-0002-7793-3824>

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

### АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСУ ЖИТТЯ ВУЗЛІВ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РОЛІ

*У статті розглядається задача прогнозування часу життя вузлів бездротових сенсорних мереж в умовах обмежених енергетичних ресурсів та змінного навантаження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підтримання зв'язності мережі, запобігання передчасному виходу з ладу критичних вузлів і забезпечення стабільної роботи розподілених систем спостереження та керування. Запропоновано математичну модель прогнозування, що поєднує аналітичні оцінки енергоспоживання з імовірнісним описом зміни режимів роботи вузлів. Модель враховує функціональну роль вузла в мережі, рівень його навантаження, топологічне положення відносно центра мережі, а також інтенсивність передавання і приймання даних.*

*У межах дослідження проведено експериментальне моделювання роботи бездротової сенсорної мережі з дванадцяти вузлів у середовищі OMNeT++. Для кожного вузла задано індивідуальні параметри, що відображають його роль, трафікове навантаження та просторове розташування. На основі розробленої моделі обчислено прогнозований час життя вузлів і виконано порівняльний аналіз отриманих результатів. Результати моделювання представлено у вигляді таблиць, графіків і гістограм, що дозволило виявити характерні залежності між навантаженням, топологічною роллю та тривалістю функціонування вузлів. Додатково побудовано топологічну схему мережі з візуалізацією функціональних ролей.*

*Запропонований підхід створює основу для розробки адаптивних алгоритмів керування сенсорними мережами, зокрема для динамічного перерозподілу ролей і балансування навантаження. Практичне застосування моделі дозволяє своєчасно виявляти потенційно критичні вузли, підвищувати надійність мережевої інфраструктури та подовжувати загальний життєвий цикл бездротових сенсорних мереж.*

**Ключові слова:** бездротові сенсорні мережі, енергоспоживання, час життя вузлів, прогнозування, математична модель, топологія мережі, балансування навантаження, функціональна роль вузла.

**Постановка проблеми.** Сенсорні мережі є основою для побудови розподілених систем спостереження, контролю та реагування, що функціонують у реальному часі в умовах автономного енергоживлення. Такі мережі широко

застосовуються у сферах моніторингу довкілля, інфраструктури, оборони та медицини, де кожен вузол одночасно виконує функції джерела даних і виконавчого елемента. Обмеженість енергетичних ресурсів сенсорних вузлів зумовлює необ-



хідність не лише мінімізації енергоспоживання, а й точного прогнозування залишкового часу їх функціонування за умов змінного та нерівномірного навантаження.

Прогнозування часу життя вузлів дає змогу завчасно виявляти критичні елементи мережі, схильні до відмов через виснаження енергії, та своєчасно застосовувати заходи для підтримання її працездатності. Це особливо важливо для кластерних голів і ретрансляторів, які зазнають підвищеного навантаження через своє положення в топології. Водночас наявні підходи до оцінювання енергоспоживання часто не враховують стохастичність режимів роботи та вплив топології, що ускладнює точне визначення критичних станів вузлів.

У зв'язку з цим постає науково-прикладна проблема формалізації та розроблення математичної моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі, яка базується на описі їх енергетичного стану, режимів роботи та функціонального навантаження. Розв'язання цієї проблеми створює підґрунтя для побудови адаптивних алгоритмів керування, спрямованих на підвищення надійності, живучості та ефективності функціонування сенсорних мереж у цілому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У дослідженнях бездротових сенсорних мереж (WSN) задача прогнозування часу життя вузлів розглядається як одна з ключових, оскільки вона безпосередньо впливає на стабільність мережі, ефективність керування ресурсами та вибір енергоощадних протоколів. Можливість оцінювання залишкового енергетичного ресурсу дозволяє реалізовувати адаптивні механізми маршрутизації, кластеризації та планування передач даних.

Математичні моделі прогнозування часу життя вузлів часто базуються на стохастичних процесах, зокрема марковських моделях, які враховують зміну режимів роботи та випадковий характер енергоспоживання вузлів [1]. Такі підходи забезпечують достатньо високу точність прогнозу за умов змінного навантаження, однак їх практичне застосування ускладнюється необхідністю точної оцінки ймовірностей переходів між станами.

Паралельно розвиваються методи прогнозування енергетичних характеристик WSN із використанням алгоритмів глибокого навчання, що демонструють високу адаптивність у динамічних умовах функціонування мережі [2]. Разом з тим нейромережеві моделі мають обмежену інтерпретованість та рідко порівнюються з класичними аналітичними підходами, що ускладнює їх формальний аналіз.

Значна кількість досліджень присвячена енергоефективній кластеризації, зокрема модифікаціям протоколу LEACH та методам вибору голів кластерів з урахуванням залишкової енергії й топологічного положення вузлів [3–5]. Запропоновані рішення дозволяють зменшити енергетичні витрати та вирівняти навантаження в мережі, проте потребують додаткових параметрів налаштування і механізмів глобальної координації.

Проблема збільшення часу життя WSN також розглядається з позицій оптимального проектування топології, зокрема за умов  $q$ -покриття та  $q$ -зв'язності, що дає змогу підвищити енергоефективність мережі на етапі її розгортання [6]. Водночас такі підходи мають обмежене застосування в динамічних або випадково сформованих топологіях. Для задач кластеризації та маршрутизації також застосовуються метаевристичні алгоритми, які демонструють покращення показників енергоефективності, але характеризуються високою обчислювальною складністю [7].

Узагальнені огляди сучасних енергоефективних технік WSN охоплюють механізми керування енергією, схеми сну та оптимізацію передач даних, проте значна частина розглянутих рішень має переважно теоретичний характер і не супроводжується ґрунтовною експериментальною валідацією [8]. Перспективним напрямом є використання гібридних підходів, які поєднують аналітичні енергетичні моделі з методами машинного навчання та статистичного аналізу трафіку, що дозволяє підвищити точність прогнозування в умовах неповної інформації [9, 10].

Таким чином, сучасні дослідження демонструють тенденцію переходу до гібридних моделей прогнозування часу життя вузлів WSN, які враховують енергетичні, топологічні та навантажувальні фактори. Водночас задача створення формалізованої, універсальної та обчислювально ефективною моделі прогнозування часу життя вузлів у змінних умовах функціонування мережі залишається актуальною.

**Постановка завдання.** Енергоспоживання вузлів сенсорної мережі є ключовим фактором, що визначає її життєздатність у часі. Враховуючи гетерогенність ролей вузлів, змінне навантаження, топологічне положення та режимну активність, постає задача побудови математичної моделі, яка дозволяє здійснювати прогнозування залишкового часу роботи кожного вузла. Модель має враховувати як детерміновані характеристики (обсяг трафіку, відстань до центра), так і ймовірнісні аспекти – зокрема, зміну режимів роботи та рольову ієрархію у структурі кластерної мережі.

Прогнозування часу життя вузлів дозволяє не лише формувати картину енергетичного стану системи в реальному часі, а й приймати управлінські рішення щодо переналаштування ролей, перебудови маршрутів та перерозподілу трафіку. В рамках дослідження передбачається створити формалізований підхід до моделювання енергоспоживання, що дозволяє визначати часові інтервали до критичних подій (виснаження вузлів) з точністю, достатньою для реалізації адаптивних протоколів керування мережею.

Метою даного дослідження є розробка математичної моделі, яка дозволяє здійснювати точне прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі з урахуванням функціональної ролі вузла, його навантаження, топологічного положення та режимів роботи. Передбачається побудова універсального підходу, що інтегрує як енергетичні, так і стохастичні характеристики роботи вузлів, дозволяючи прогнозувати момент їх виходу з ладу заздалегідь.

Запропонована модель має забезпечити можливість багатофакторного оцінювання життєвого циклу вузлів в умовах змінної активності, неоднорідного трафіку та ієрархічної структури мережі. Очікується, що реалізація такого підходу дозволить підвищити ефективність планування ресурсів у сенсорних мережах, своєчасно виявляти потенційно критичні зони з високим ризиком втрати енергетичного ресурсу та забезпечити підтримку цілісності й стабільності роботи мережевої інфраструктури.

### Виклад основного матеріалу

*Формалізація моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі*

Розробка аналітичної моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі базується на врахуванні як детермінованих параметрів роботи вузлів, так і ймовірнісних характеристик їх функціонування у різних режимах. Особливістю сенсорної мережі є нерівномірність навантаження вузлів залежно від їх ролі, топологічного положення та функціонального призначення. Це вимагає поєднання класичних моделей енергоспоживання з розширеним стохастичним описом поведінки мережі.

Початково модель базується на класичному підході до оцінки витрат енергії вузла у процесі передачі та прийому даних. Початкова енергія вузла позначається як  $E_0$ , а залишкова енергія у момент часу  $t$  – як  $E(t)$ . Витрати енергії вузла при передачі пакету розміром  $k$  біт на відстань  $d$  визначаються за формулою:

$$E_{tx} = k \cdot E_{elec} + k \cdot \varepsilon_{amp} \cdot d^\alpha, \quad (1)$$

де  $E_{elec}$  – енергозатрати електроніки на обробку одного біта інформації,

$\varepsilon_{amp}$  – коефіцієнт енергетичних втрат підсилювача сигналу,  $\alpha$  – показник середовища, що характеризує затухання сигналу.

Витрати енергії на прийом пакету розміром  $k$  біт описуються співвідношенням:

$$E_{rx} = k \cdot E_{elec}, \quad (2)$$

Загальні витрати енергії вузлом за час  $t$  визначаються як:

$$E(t) = E_0 - (n_{tx} \cdot E_{tx} + n_{rx} \cdot E_{rx}), \quad (3)$$

де  $n_{tx}$  – кількість переданих пакетів, а  $n_{rx}$  – кількість прийнятих пакетів вузлом.

Важливою особливістю моделі є урахування ролі вузла у структурі мережі. Для цього вводиться коефіцієнт функціонального навантаження  $R_i$ , який враховує належність вузла до відповідної категорії: звичайний вузол, ретранслятор чи голова кластера. Це дозволяє деталізувати модель витрат енергії з урахуванням ролі:

$$E'(t) = R_i \cdot (n_{tx} \cdot E_{tx} + n_{rx} \cdot E_{rx}), \quad (4)$$

На основі цього час життя вузла визначається за формулою:

$$T_i = \frac{E_0}{R_i \cdot (n_{tx} \cdot E_{tx} + n_{rx} \cdot E_{rx})}. \quad (5)$$

Додатково у моделі враховується топологічне положення вузла у сенсорній мережі. Вузли, розташовані ближче до центра мережі, мають більше навантаження за рахунок ретрансляції даних. Для цього вводиться коефіцієнт топологічної важливості:

$$R_i(d) = R_i \cdot \left( 1 + \beta \cdot \frac{d_{max} - d_i}{d_{max}} \right), \quad (6)$$

де  $d_i$  – відстань вузла  $i$  до центра мережі,  $d_{max}$  – максимальна відстань у межах мережі,  $\beta$  – ваговий коефіцієнт впливу розташування вузла.

Таким чином, розширена формула для прогнозу часу життя вузла з урахуванням енергетики, ролі та топології набуває вигляду:

$$T_i = \frac{E_0}{R_i(d) \cdot (n_{tx} \cdot E_{tx} + n_{rx} \cdot E_{rx})}. \quad (7)$$

Для більш реалістичного опису функціонування сенсорної мережі у роботі розглядається ускладнений варіант моделі, що базується на стохастичному підході. Передбачається, що вузол може перебувати у кількох основних станах: передача даних  $S_1$ , прийом даних  $S_2$ , режим очікування  $S_3$ , режим сну  $S_4$ .

Зміна станів вузла моделюється за допомогою марковської моделі з матрицею ймовірностей переходу між станами  $P$ .

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Середній час перебування вузла у стані  $S_j$  описується як:

$$T_j = \frac{1}{\lambda_j}, \quad (9)$$

де  $\lambda_j$  – інтенсивність переходу у стан  $S_j$ .

Сумарні енергетичні витрати вузла за час  $t$  з урахуванням імовірнісної зміни станів описуються інтегральним співвідношенням:

$$E(t) = \int_0^t \sum_{j=1}^4 P_j(\tau) \cdot e_j d\tau,$$

де  $P_j(\tau)$  – ймовірність перебування вузла у стані  $S_j$  у момент часу  $\tau$ ,  $e_j$  – енергетичні витрати вузла у стані  $S_j$ .

Враховуючи додатковий коефіцієнт ролі вузла у мережі:

$$K_r = 1 + \gamma \cdot (R_i - 1), \quad (11)$$

де  $\gamma$  – ваговий коефіцієнт впливу ролі, кінцева формула для прогнозу часу життя вузла набуває інтегрального вигляду:

$$T_i = \frac{E_0}{K_r \cdot \int_0^t \sum_{j=1}^4 P_j(\tau) \cdot e_j d\tau}. \quad (12)$$

Запропонована узагальнена математична модель дозволяє прогнозувати час життя вузлів сенсорної мережі з високою точністю, враховуючи множину важливих факторів: топологічне положення, функціональну роль, енергетичні характеристики та стохастичний характер функціонування мережі.

*Експериментальне дослідження роботи сенсорної мережі з використанням розробленої моделі*

З метою перевірки працездатності та ефективності запропонованої аналітичної моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі було проведено експериментальне моделювання у середовищі OMNeT++. Було обрано мережу, яка складається з дванадцяти сенсорних вузлів, кожен з яких виконує різні функціональні ролі у мережі та характеризується власним енергетичним профілем, навантаженням та топологічним положенням.

Мережа моделювалася у вигляді радіальної структури з центром у вигляді базової станції. Вузли розташовувалися на різних відстанях від

центру, що дозволяє враховувати топологічний вплив на їх енергетичні витрати. Для вузлів були задані три ролі: звичайний вузол, ретранслятор та голова кластера. Розподіл ролей, відстань до центра мережі, кількість переданих та прийнятих пакетів для кожного вузла задавалися відповідно до умов симуляції.

В якості початкових параметрів симуляції використовувалася початкова енергія вузла  $E_0 = 2 \text{ Дж}$ , параметри передачі та прийому даних відповідали типовим значенням для сенсорних мереж:  $E_{elec} = 50 \text{ нДж} / \text{біт}$ ,  $\epsilon_{amp} = 100 \text{ нДж} / \text{біт} / \text{м}^2$ , коефіцієнт середовища  $\alpha = 2$ . Розмір пакету становив 512 біт.

Вузли генерували трафік з різною інтенсивністю, яка залежала від їх ролі у мережі. Голови кластерів та ретранслятори мали більшу кількість оброблених повідомлень, що відповідно призводило до зменшення їхнього часу життя. Віддалені вузли при меншому навантаженні демонстрували довший життєвий цикл.

Результати моделювання були представлені у вигляді таблиці, яка містила інформацію щодо кожного вузла: його роль, відстань до центра мережі, кількість переданих та прийнятих пакетів, а також розрахований час життя. За результатами симуляції були побудовані графіки залежності часу життя вузла від його відстані до центра мережі та кількості переданих повідомлень.

Аналіз результатів експерименту показав чітку залежність часу життя вузлів від їх розташування та навантаження. Найменший час життя продемонстрували голови кластерів та ретранслятори, розташовані поблизу центра мережі. Найдовший час роботи був характерний для звичайних вузлів з мінімальним навантаженням, розташованих на периферії мережі.

У таблиці 1 наведено експериментальні дані щодо параметрів роботи вузлів сенсорної мережі, які використовувались у процесі моделювання. Для кожного вузла вказано його функціональну роль у мережі, відстань до центра мережі, кількість переданих та прийнятих повідомлень, а також розрахований час життя вузла на основі запропонованої математичної моделі.

Аналіз таблиці дозволяє зробити висновок, що найбільший час життя демонструють звичайні вузли, які розташовані на більшій відстані від центра мережі та мають незначне навантаження. Натомість голови кластерів та ретранслятори характеризуються підвищеним енергоспоживанням через необхідність обробки та ретрансляції значних обсягів даних, що призводить до суттєвого зменшення їхнього часу роботи.

Експериментальні дані щодо параметрів роботи вузлів сенсорної мережі та розрахованого часу їх життя

Вузол	Роль	Відстань до центру (м)	Передач	Прийомів	Час життя (год)
Node 1	Звичайний	39	108	33	284,6
Node 2	Голова кластера	47	64	118	168,0
Node 3	Ретранслятор	11	100	89	242,3
Node 4	Ретранслятор	73	157	43	183,2
Node 5	Звичайний	69	104	143	203,9
Node 6	Звичайний	30	113	38	289,2
Node 7	Звичайний	42	180	119	207,0
Node 8	Голова кластера	85	100	82	145,6
Node 9	Ретранслятор	67	184	31	181,8
Node 10	Ретранслятор	31	70	113	224,1
Node 11	Звичайний	98	122	121	185,4
Node 12	Голова кластера	58	67	140	152,9

На рисунку 1 представлено топологію сенсорної мережі, яка використовувалась у процесі експериментального моделювання. Мережа складається з дванадцяти сенсорних вузлів, які мають різні функціональні ролі: голови кластерів, ретранслятори та звичайні вузли. Центральний вузол виконує роль базової станції та безпосередньо підключений до голів кластерів, які у свою чергу забезпечують обслуговування вузлів нижчого рівня.

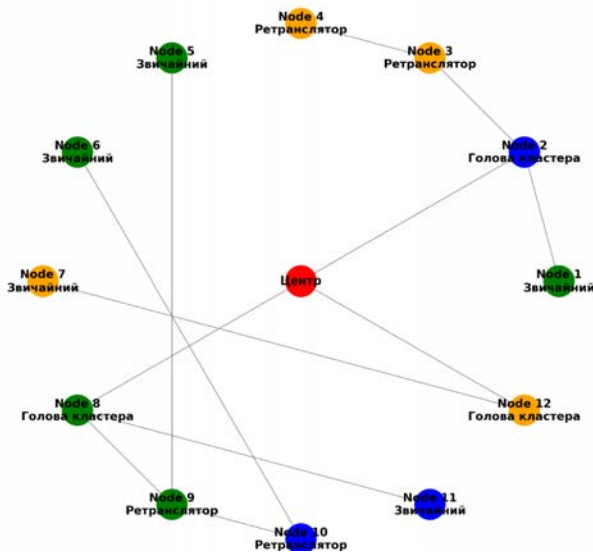


Рис. 1. Топологія сенсорної мережі з урахуванням ролей вузлів

На рисунку 1 вузли відображено з урахуванням їх ролей: голови кластерів з'єднані з центральним вузлом, ретранслятори здійснюють передачу даних між звичайними вузлами та кластерними головами або іншими вузлами мережі, а звичайні вузли підключаються до найближчих ретрансля-

торів чи голів кластерів. Така організація топології забезпечує зменшення навантаження на центральний вузол та дозволяє більш рівномірно розподіляти енергетичні витрати між вузлами мережі.

Отримані експериментальні результати підтвердили адекватність та ефективність запропонованої математичної моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі. Проведене моделювання показало можливість її використання для практичної оцінки та оптимізації енергетичних характеристик реальних сенсорних мереж.

*Графічний аналіз результатів моделювання*

На гістограмі на рис.2 представлено розподіл часу життя вузлів сенсорної мережі. Видно, що більшість вузлів мають час життя у межах від 200 до 300 годин, що відповідає середньому навантаженню та типовим ролям «звичайного вузла» чи «ретранслятора». Менша кількість вузлів демонструє тривалість життя понад 300 годин – це, як правило, вузли, що мають мінімальне енергоспоживання та розташовані на периферії мережі. Найменший час життя зафіксовано у вузлів із найвищим навантаженням, зокрема голів кластерів.

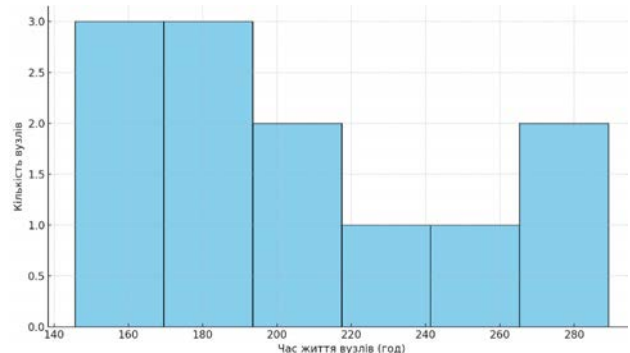


Рис. 2. Гістограма розподілу часу життя вузлів сенсорної мережі

На гістограмі на рис. 3 зображено розподіл відстаней вузлів до центра мережі. Розташування вузлів у моделі здійснювалося рівномірно, що підтверджується відносно однорідним розподілом. Наявність вузлів у всіх віддалених зонах дозволила провести об'єктивний аналіз впливу топологічного розташування на енергоспоживання. Це також є підтвердженням симетричності моделі та достатньої репрезентативності вибірки для експерименту.

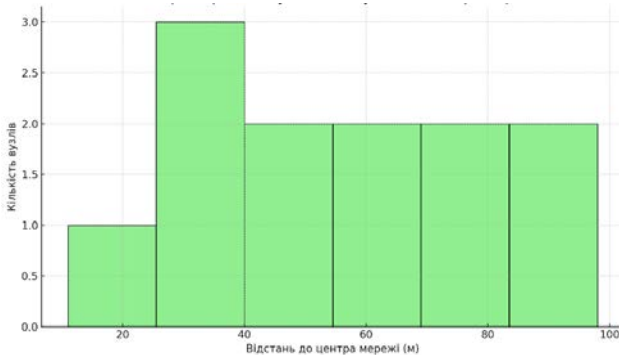


Рис. 3. Гістограма розподілу відстані вузлів до центра мережі

Гістограма на рис. 4. відображає розподіл навантаження на вузли, що визначається сумою переданих та прийнятих пакетів даних.

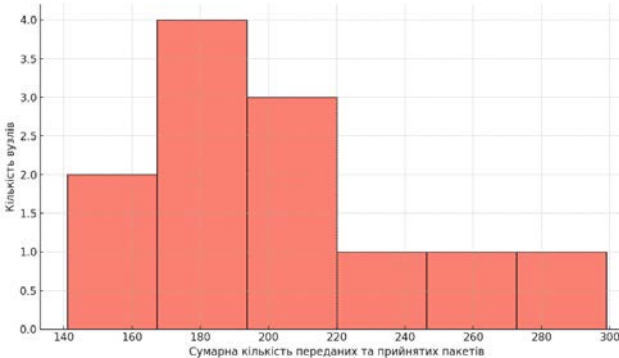


Рис. 4. Гістограма розподілу сумарного навантаження на вузли (кількість переданих та прийнятих пакетів)

Спостерігається значна варіативність навантаження: частина вузлів передає та приймає незначний обсяг трафіку, тоді як інші – зазнають інтенсивного навантаження. Такий розподіл відповідає функціональним ролям вузлів: вузли з високим навантаженням найчастіше виступають у ролі голів кластерів або ретрансляторів, що призводить до більшого енергоспоживання та скорочення часу життя.

**Висновки.** Поставлена у дослідженні мета, що полягала у створенні аналітичної моделі для прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі з урахуванням функціонального навантаження, топологічного положення та змінного режиму роботи, була досягнута. Розроблено математичний апарат, який поєднує класичні енергетичні співвідношення з імовірнісною моделлю станів вузла. У формалізованому вигляді модель дозволяє обчислювати прогнозований час життя на основі кількості переданих і прийнятих повідомлень, відстані до центра мережі, ролі вузла (звичайний, ретранслятор, голова кластера), а також характеристик режимів активності.

Для перевірки моделі проведено симуляційний експеримент, у якому змодельовано сенсорну мережу з 12 вузлів різних типів. Вузли було розподілено по ролях, визначено їх відстань до центра мережі, а також задано кількість переданих і прийнятих повідомлень упродовж заданого проміжку часу. За допомогою моделі для кожного вузла було обчислено прогнозований час життя, що дозволило сформувати повну таблицю параметрів роботи вузлів. Результати показали логічну і фізично обґрунтовану поведінку: голови кластерів та ретранслятори продемонстрували найменший час життя внаслідок підвищеного енергоспоживання, тоді як звичайні вузли з меншим навантаженням мали вищу тривалість роботи.

Експериментальні результати було візуалізовано у вигляді діаграм та гістограм. Побудовано графіки залежності часу життя від відстані до центра мережі та навантаження, які чітко виявили негативну кореляцію між навантаженням і тривалістю роботи. Додатково, створено топологічну схему мережі з позначенням функціональних ролей вузлів, що дозволило відобразити характер маршрутизації трафіку та логіку енергоспоживання в мережі. Гістограми показали характерні розподіли часу життя, навантаження та просторових параметрів мережі, що ще раз підтвердило коректність реалізованої моделі.

Таким чином, побудована модель успішно реалізує функцію прогнозування часу життя вузлів на основі багатофакторного аналізу. Її використання дозволяє не лише відстежувати енергетичний стан системи, а й здійснювати планування перебудови мережі, переобрання кластерних голів та адаптацію протоколів маршрутизації. Модель є придатною для практичного застосування у реальних сенсорних системах, де критично важливо забезпечити стабільну роботу мережі при мінімальних витратах енергії.

Список літератури:

1. Hemalatha. P., Kamalanathan C. A Survey On Enhancing Network Lifetime And Energy Efficiency In Wireless Sensor Networks Using Machine Learning Algorithms. 2025 International Conference on Metaverse and Current Trends in Computing (ICMCTC). Subang Jaya, Malaysia. 2025. P. 1-8. DOI: 10.1109/ICMCTC62214.2025.11196352.
2. Thakur Sumendra, Nurul I. Sarkar, Sira Yongchareon. AI-Driven Energy-Efficient Routing in IoT-Based Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 24. P. 7408. DOI: 10.3390/s25247408.
3. Zhendong Wang, Yaozhong Yang, Xiao Luo, Daojing He, Chan Sammy. Energy efficient clustering and routing for wireless sensor networks by applying a spider wasp optimizer. *Ad Hoc Networks*. 2025. Vol. 174. P. 103841. DOI: 10.1016/j.adhoc.2025.103841.
4. Nkemeni V., Mieyeville F., Kuaban G.S., Czekalski P., Tokarz K., Nsanyuy W.B., Deussom Djomadji E.M., Katche M.L., Tsafack P., Zieliński B. Evaluation of Green Strategies for Prolonging the Lifespan of Linear Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no.21. P. 7024. DOI: 10.3390/s24217024.
5. 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:10.20998/2413-4295.2025.02.056.
6. Muhammad Suhail Shaikh, Chang Wang, Senlin Xie, Gengzhong Zheng, Xiaoqing Dong, Shuwei Qiu, Mohd Ashraf Ahmad, Saurav Raj. Coverage and connectivity maximization for wireless sensor networks using improved chaotic grey wolf optimization. *Scientific reports*. 2025. Vol. 15. Art. 15706. DOI: 10.1038/s41598-025-00184-2.
7. П. Є. Пустовойтов, О. М. Воронець. 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: 10.20998/2411-0558.2025.01.05
8. Gaidhani Abhay R., Amol D. Potgantwar. A Review of Machine Learning-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Network Lifetime. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 59, no. 1. P. 231. DOI: 10.3390/engproc2023059231.
9. Kofi Sarpong Adu-Manu, Nadir Adam, Cristiano Tapparello, Hoda Ayatollahi, Wendi Heinzelman. Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks (EH-WSNs): A Review. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*. 2018. Vol. 14, no. 2 Art. 10. P. 1-50. DOI: 10.1145/3183338.
10. Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D. The speed calculating increasing method of the markov model network node. *Advanced Information Systems*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 13–17. DOI: 10.20998/2522-9052.2021.3.02.

**Voronets O.M., Pustovoitov P.Ye., Voronets V.M. ANALYTICAL MODEL FOR PREDICTING THE LIFETIME OF SENSOR NETWORK NODES TAKING INTO ACCOUNT THEIR FUNCTIONAL ROLE**

*The article considers the problem of predicting the lifetime of wireless sensor network nodes under conditions of limited energy resources and variable load. The relevance of the study is due to the need to maintain network connectivity, prevent premature failure of critical nodes, and ensure stable operation of distributed monitoring and control systems. A mathematical forecasting model is proposed that combines analytical estimates of energy consumption with a probabilistic description of changes in node operating modes. The model takes into account the functional role of the node in the network, its load level, topological position relative to the network center, and the intensity of data transmission and reception.*

*As part of the study, an experimental simulation of the operation of a wireless sensor network with twelve nodes in the OMNeT++ environment was conducted. Individual parameters were set for each node, reflecting its role, traffic load, and spatial location. Based on the developed model, the predicted lifetime of the nodes was calculated and a comparative analysis of the results was performed. The modeling results are presented in the form of tables, graphs and histograms, which allowed us to identify characteristic dependencies between the load, topological role and duration of node operation. Additionally, a topological network diagram with visualization of functional roles was constructed.*

*The proposed approach creates a basis for the development of adaptive algorithms for controlling sensor networks, in particular for dynamic role redistribution and load balancing. The practical application of the model allows for timely detection of potentially critical nodes, increasing the reliability of the network infrastructure and extending the overall life cycle of wireless sensor networks.*

**Keywords:** *wireless sensor networks, energy consumption, node lifetime, forecasting, mathematical model, network topology, load balancing, functional role of the node.*

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026