

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-8>

УДК 629.8:621.3

СКОРОБОГАТЬКО Станіслав

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-3290-6929>

s.skorobogatko@csn.khai.edu

ФЕСЕНКО Герман

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-4084-2101>

h.fesenko@csn.khai.edu

ХАРЧЕНКО Вячеслав

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>

v.kharchenko@csn.khai.edu

ПОСЛІДОВНІСТЬ І ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ СИМУЛЯЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ЗА РІЗНИХ СЦЕНАРІЇВ ВІДМОВ

Бездротові сенсорні мережі (Wireless Sensor Networks, WSN) широко застосовуються у сучасних системах моніторингу, проте вони залишаються вразливими до відмов окремих сенсорів і периферійних компонентів. Це може призводити до зниження ймовірності безвідмовної роботи та надійності всієї системи. У статті представлено послідовність і програмний засіб симуляції WSN, що дозволяє досліджувати стохастичні відмови за різних сценаріїв та оцінювати їхній вплив на функціонування мережі. Він підтримує моделювання відмов за експоненційним, нормальним та Вейбулла-розподілами, забезпечує перевірку кількох критеріїв відмови, включно з пороговими, просторовими та периферійними, а також виконує множинні прогони для отримання статистично достовірних результатів. Наведені приклади показують, що запропонований програмний засіб може стати ефективним інструментом для дослідників і розробників, які працюють над проблемою надійності сенсорних мереж. Подальші дослідження передбачають оптимізацію продуктивності симуляцій, розширення набору сценаріїв відмов і застосування інструмента до більш складних топологій WSN.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, симуляція, програмний засіб, надійність, відмова.

SKOROBHATKO Stanislav, FESENKO Herman, KHARCHENKO Vyacheslav

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

SEQUENCE AND SOFTWARE FOR SIMULATION-BASED EVALUATING THE PROBABILITY OF FAILURE-FREE OPERATION FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS CONSIDERING VARIOUS SCENARIOS OF FAILURES

Wireless sensor networks (WSNs) have become an essential component of contemporary monitoring, control, and data-gathering infrastructures. They are widely deployed in environmental observation, industrial automation, agricultural monitoring, and smart-city applications. Despite their extensive use, WSNs remain highly susceptible to stochastic failures caused by hardware degradation, energy depletion, environmental impacts, and malfunctions of peripheral components. Such failures may lead to decreased network availability, reduced quality of collected data, and, ultimately, diminished reliability of the entire system. Addressing these issues requires tools that allow researchers and engineers to analyze failure mechanisms under diverse conditions and to evaluate how different types of faults influence overall network behavior.

The article introduces a structured methodology and a dedicated simulation software tool designed to model, visualize, and assess the reliability of WSNs under a wide range of failure scenarios. The tool incorporates stochastic modeling based on exponential, normal, and Weibull distributions, enabling users to investigate both sudden and progressive sensor degradation. It also supports several failure-detection and assessment criteria, including threshold-based events, spatially correlated failures, and failures of external or peripheral modules. A key feature of the software is the ability to perform repeated simulation runs to obtain statistically significant results, allowing users to estimate reliability indicators such as mean time to failure, failure probability over time, and the impact of localized malfunctions on global network performance.

The examples presented in the article demonstrate that the developed tool can serve as an effective research instrument for analyzing robustness, designing fault-tolerant architectures, and validating reliability-enhancing algorithms for WSNs. Future work will focus on improving computational efficiency, expanding the library of failure models, integrating energy-aware behavior, and applying the simulator to more complex and large-scale network topologies.

Keywords: wireless sensor network, simulation, software tool, reliability, failure.

Стаття надійшла до редакції / Received 22.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.11.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сенсорні мережі є одним із базових компонентів сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Вони забезпечують збір і передачу даних у режимі реального часу для моніторингу довкілля, контролю

виробничих процесів, управління транспортною інфраструктурою та виконання завдань у військовій сфері. Розвиток технологій Інтернету речей значно розширив масштаби застосування бездротових сенсорних мереж (Wireless Sensor Networks, WSN), зробивши їх критично важливими для багатьох сфер діяльності [1,2]. Попри широке використання, сенсорні мережі залишаються вразливими до випадкових відмов окремих сенсорів і відмов периферійних компонентів. Сенсори мають обмежений термін служби, вони схильні до фізичного зношення, впливу навколишнього середовища та несправностей програмного забезпечення. Відмова навіть невеликої кількості вузлів може суттєво знизити рівень ймовірності безвідмовної роботи мережі, а в окремих випадках призвести до повної втрати її працездатності. Це створює серйозні ризики для критичних застосувань, де від сенсорної мережі залежить прийняття оперативних і стратегічних рішень. Важливим завданням є розробка підходів і інструментів для оцінки надійності WSN у різних сценаріях функціонування. Реальні експерименти на фізичному обладнанні потребують значних ресурсів, є затратними за часом і коштами, а іноді й небезпечними. У таких умовах комп'ютерна симуляція є ефективною альтернативою, оскільки дозволяє відтворювати стохастичні процеси відмов, варіювати параметри мережі та отримувати статистично достовірні оцінки її надійності. Програмні засоби симуляції WSN стають невід'ємним інструментом для дослідників і розробників, адже вони поєднують гнучкість налаштувань із можливістю швидкого аналізу результатів. Особливу цінність становлять системи, які не лише відтворюють випадкові відмови, але й забезпечують статистичний аналіз та візуалізацію даних. Запропонований у цій статті програмний засіб розроблено саме з урахуванням потреби у комплексному підході до моделювання надійності WSN.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасній літературі дослідження надійності бездротових сенсорних мереж (WSN) охоплюють кілька основних напрямів: моделі відмов вузлів, топологічну стійкість мережі, алгоритми маршрутизації з врахуванням надійності, а також програмні симулятори з розширеними функціями. По-перше, у статті [1] наведено методи оцінки надійності WSN в умовах реального розгортання, де враховуються як апаратні відмови, так і помилки в комунікаціях. Автори використовують аналіз дерева відмов (fault tree analysis, FTA) для опису сценаріїв і показують залежність відмовостійкості від топології [1]. У більш загальному огляді [2] представлено класифікацію моделей як з відновленням, так і без відновлення. Однак візуалізаційна складова у таких підходах, як правило, обмежена. У роботі [3] увагу приділено програмним методам забезпечення надійності: діагностиці відмов, алгоритмам відновлення та балансуванню енергоспоживання. Дослідження [4] аналізує великі за довжиною мережі та показує компроміс між надлишковістю й якістю зв'язку. У статті [5] подано кластерний підхід до оцінки надійності, що враховує маскування даних і використовує ЕМ-алгоритм (expectation-maximization (EM) algorithm). Важливим доповненням є праця [6]. У ній розглянуто власний інструмент симуляції WSN, який поєднує генерацію топології, моделювання відмов і статистичну оцінку показників. Ця робота близька до нашого дослідження і демонструє важливість інтеграції стохастичних моделей і зручного інтерфейсу. Серед проаналізованих джерел варто згадати статтю, де розглянуто методи оцінки функціональної стійкості сенсорних мереж [7], а також роботу [8], що піднімає питання надійності та безпеки у сучасних бездротових мережах. Стаття стосується концептуальних підходів до застосування сенсорних мереж у специфічних умовах [9], а аналітичний матеріал в [10] описує сучасні методи забезпечення надійності у телекомунікаційних системах. Окремо слід відзначити сучасні дослідження, що розширюють питання покриття та оптимізації WSN. Наприклад, у статті [11] представлено метод оптимізації структури мережі, що напряму впливає на показники доступності та відмовостійкості. Попри зазначений прогрес, більшість доступних інструментів або фокусується на окремих аспектах (енергія, маршрутизація, топологія), або не мають комплексної реалізації з візуалізацією, набором законів розподілу та підтримкою повторюваних експериментів. Запропонований нами програмний засіб спрямований на усунення цих прогалин. Для узагальнення розглянутих підходів було складено порівняльну таблицю 1.

Таблиця 1.

Порівняння досліджень		
Об'єкт дослідження	Основний підхід / модель	Обмеження
WSN у «розумному» сільському господарстві [1]	Аналіз надійності з використанням FTA	Немає часових моделей відмов, обмежена візуалізація
Підвищення надійності WSN [3]	Адаптація енергетичних режимів, self-healing алгоритми	Немає підтримки кількох розподілів відмов
Довгі лінійні WSN [4]	Оцінка компромісу (trade-off) між надлишковістю і якістю зв'язку	Нішевий сценарій, не універсальний
Кластерні WSN [5]	Модель надійності з ЕМ-алгоритмом	Орієнтація на внутрішню структуру, без інтерактивності
Симуляція WSN [6]	Інструмент моделювання: топологія + відмови + статистика	Локальна реалізація, потребує розширення для інших сценаріїв
Оптимізація покриття WSN [11]	Математичні методи оптимізації з урахуванням енергії	Сфокусовано на покритті, не охоплює всі аспекти надійності

Аналіз показав, що попри велику кількість досліджень, присвячених методикам оцінювання надійності WSN, існує потреба у створенні універсальних програмних засобів, які б дозволяли швидко моделювати різні сценарії відмов та отримувати статистично обґрунтовані оцінки надійності мережі. Більшість існуючих інструментів або є вузькоспеціалізованими, або вимагають значних навичок у програмуванні, що обмежує їх застосування.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є представлення послідовності та програмного засобу для симуляції бездротової сенсорної мережі та оцінювання її надійності за наявності стохастичних відмов сенсорів і периферійного компонента. Засіб має забезпечити відтворення побудову топології мережі, генерацію часу до відмови за кількома законами розподілу, дискретну імітацію плину часу з перевіркою різних умов завершення, багаторазові прогони для статистичної достовірності та формування візуально-інтерактивних підсумків. З огляду на це, завданням є опис концепції і реалізації інструмента, який уніфікує ініціалізацію геометричного графа сенсорів, модулі стохастичної генерації відмов, основний цикл симуляції, процедури підрахунку ймовірності безвідмовної роботи і агрегування результатів, а також графічний інтерфейс із можливістю експорту даних у табличному та веб-форматах.

Послідовність і архітектура програмного засобу для симуляційного оцінювання

Програмний засіб дозволяє фіксувати стохастичну природу відмов у множинних прогонах, забезпечує підтримку експоненційного, нормального та Вейбулла-розподілів, перевірку трьох типів відмов (порогова кількість сенсорів, відмова за просторовим критерієм двох сусідніх сенсорів, відмова периферійного компонента), використовує графічний інтерфейс користувача (Graphical User Interface, GUI) на мові програмування Python для бібліотеки Qt (PyQt) та зберігає результати у Excel і HTML для подальшого аналізу. Крім того, розроблений програмний засіб реалізує повний цикл моделювання: від задання параметрів до формування статистичних звітів та інтерактивних візуалізацій. Його архітектура побудована за принципом розділення рівнів: графічний інтерфейс користувача створено на основі PyQt6, обчислювальне ядро інкапсулює алгоритми генерації топологій та симуляції відмов, а підсистема збереження та візуалізації забезпечує формування вихідних даних у форматах Excel та HTML. Такий поділ полегшує розвиток та модифікацію інструмента без втручання в інші частини системи. На етапі підготовки експерименту оператор у вікні GUI визначає кількість сенсорів, геометричні межі області (підтримуються багатокутник, еліпс та прямокутник), радіус сусідства, максимальний час моделювання, крок дискретизації та закон розподілу часу до відмови. Для сенсорів та периферійного компонента задаються інтенсивності відмов, що дозволяє моделювати різні сценарії деградації системи. Інтерфейс також передбачає перевірку коректності введених даних і повідомлення про помилки. На цьому етапі зручно подати діаграму варіантів використання (рис. 1), яка узагальнює взаємодію користувача із засобом. Загальну зовнішню взаємодію оператора із системою та її функціональні межі показано на діаграмі варіантів використання (рис. 1). Вона описує ключові сценарії (варіанти використання), які ініціює актор-оператор. До них належать:

1. Налаштування параметрів експерименту (Configure Parameters): введення ключових показників, таких як кількість сенсорів (N), радіус сусідства, інтенсивність відмов (λ), максимальний час моделювання (T) та критерії зупинки (порогова кількість відмов N , просторовий поріг Ad).

2. Вибір законів розподілу (Select Distributions) та методу просторового виявлення (Choose Spatial Method): дозволяє гнучко комбінувати моделі відмов та алгоритми їх детектування. Регенерація топології (Regenerate Topology): побудова випадкового геометричного графа мережі. Запуск симуляції (Run Simulation): ініціація серії експериментів. Перегляд результатів: доступ до журналу (View Logs) та згенерованих файлів через спеціальні кнопки (Open Results, Open Plots Folder). Важливою частиною сценаріїв генерації топології та запуску симуляції є обов'язковий крок валідації введених даних (Validate Inputs), що реалізовано через зв'язок <<include>>. Це гарантує коректність параметрів перед початком обчислень.

Далі відбувається генерація стаціонарної топології сенсорної мережі як геометричного графа. Сенсори розміщуються у межах обраної області (простору), зв'язки встановлюються між вузлами, відстань між якими не перевищує заданого порога. Для кожного сенсора незалежно формується випадковий момент відмови за вибраним законом розподілу. Окремо визначається момент відмови периферійного компонента. Такий підхід дозволяє моделювати як незалежні, так і просторово скорельовані відмови. В основі симуляції лежить моделювання випадкових моментів відмови для кожного сенсора. Ймовірність безвідмовної роботи (probability of fault free operation) елемента до моменту часу t , моделюється з використанням таких розподілів.

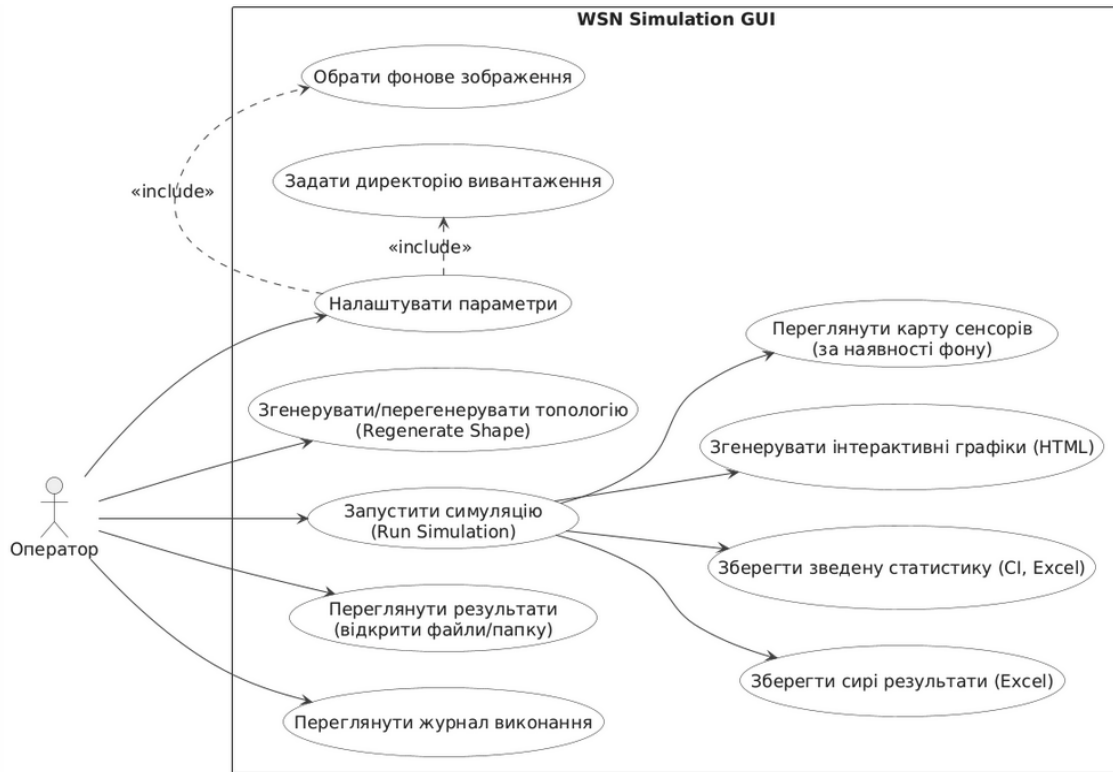


Рис. 1. Діаграма варіантів використання

1. Експоненційний (exponential) розподіл, що описує раптові відмови з постійною інтенсивністю λ відповідною функцією щільності ймовірностей f :

$$f(t; \lambda) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \quad (1)$$

де: t — час;
 λ — інтенсивність відмов.

2. Розподіл Вейбулла (Weibull), що дозволяє моделювати деградаційні процеси через параметр форми k та параметр масштабу η :

$$f(t; k, \eta) = \frac{k}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{k-1} e^{-(t/\eta)^k}, \quad t \geq 0, \quad (2)$$

де: t — час до відмови сенсора;
 k — параметр форми. Це ключовий параметр, що визначає характер відмов;
 η — параметр масштабу ($\eta = 1/\lambda$).

3. Нормальний (normal) розподіл, що використовується для моделювання відмов, згрупованих навколо середнього часу напруцювання зі стандартним відхиленням σ :

$$f(t; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

де: t — час до відмови сенсора;
 μ — середній час до відмови ($\mu = 1/\lambda$);
 σ — стандартне відхилення ($\sigma = 1/\lambda$).

Також передбачено розрахунок довірчого інтервалу за наступною формулою:

$$CI = \bar{A} \pm z \frac{s_A}{\sqrt{M}}, \quad (4)$$

де: $\bar{A}$ — середнє вибіркове значення ймовірності безвідмовної роботи;

z — критичне значення (z -оцінка) зі стандартного нормального розподілу;
 s_A — стандартне відхилення вибірки;
 M — розмір вибірки, тобто загальна кількість прогонів симуляції, проведених в експерименті.

Основний цикл симуляції здійснюється у дискретному часі. На кожному кроці перевіряються умови завершення: порогова відмова (коли кількість несправних сенсорів перевищує допустиме значення), відмова за просторовим критерієм (виявлена алгоритмом перевірки сусідніх вузлів або обходом у ширину (breadth-first search, BFS), чи відмова периферії. Якщо жодна з умов не виконується до досягнення максимального часу, симуляція завершується при його досягненні. У результаті для кожного прогону зберігається час відмови, її причина та розраховується показник ймовірності безвідмовної роботи. Цей процес зручно проілюструвати діаграмою компонентів (рис. 2), яка показує структурні частини системи, та діаграмою послідовності (рис. 3), де відображено дії користувача, GUI та ядра симуляції.

Архітектурну організацію компонентів програмного засобу відображено у вигляді діаграми компонентів (рис. 2). Вона складається з трьох логічних рівнів:

1. Рівень GUI: представлений компонентом WSNSimulationGUI, який реалізує графічний інтерфейс.
 2. Обчислювальне ядро (simulation.py): інкапсулює всю логіку моделювання.
 3. Підсистема збереження та візуалізації: містить функції для експорту даних та побудови графіків.
- Робота системи залежить від низки зовнішніх бібліотек, таких як NumPy, Pandas, NetworkX та Plotly.

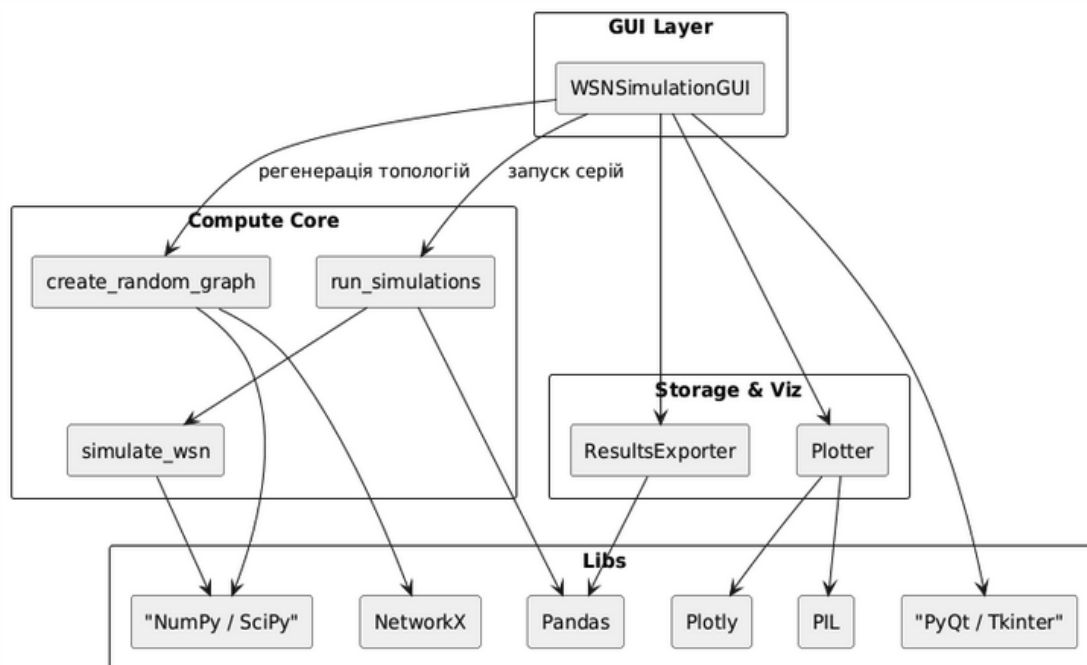


Рис. 2. Модульна діаграма взаємодії компонентів

Для забезпечення моделювання і статистичного оцінювання надійності реалізовано серійні прогони. Вони формують вибірки значень ймовірності безвідмовної роботи для різних комбінацій параметрів. На їх основі автоматично обчислюються середні, стандартні відхилення та довірчі інтервали (ДІ) за t -статистикою.

Результати експортуються до Excel-файлів із розділенням за кількістю сенсорів: окремі аркуші містять «сирі» дані прогонів, а також підсумкові таблиці з узагальненою статистикою. Візуалізаційна підсистема генерує інтерактивні графіки у форматі HTML. Серед них — гістограми ймовірності безвідмовної роботи, графіки довірчих інтервалів у логарифмічній шкалі часу, порівняльні діаграми для різних законів розподілу та карти розташування сенсорів на фоні зображень із відображенням меж області.

Це полегшує аналіз та інтерпретацію результатів, а також дозволяє використовувати їх у навчальних або дослідницьких цілях. Часову послідовність взаємодії між учасниками під час виконання основного сценарію ілюструє діаграма послідовності (рис. 3). Процес ініціюється Оператором (U), який взаємодіє з WSNSimulationGUI (GUI). Після запуску GUI викликає функції обчислювального ядра (RUN, SIM, TTF, CS), які виконують обчислення. Результати повертаються до GUI для виклику функцій збереження (SR, SSS) та візуалізації (PLOT).

Для забезпечення відтворюваності експериментів у кожній серії симуляцій фіксуються зерна генератора випадкових чисел та конфігурації запуску. Це дозволяє усунути неконтрольовану варіативність і

гарантує коректність порівнянь між різними сценаріями. У сукупності перелічені рішення реалізують вимоги до програмного продукту щодо повного циклу моделювання з акцентом на стохастичний характер відмов у WSN і зручність користувацького аналізу.

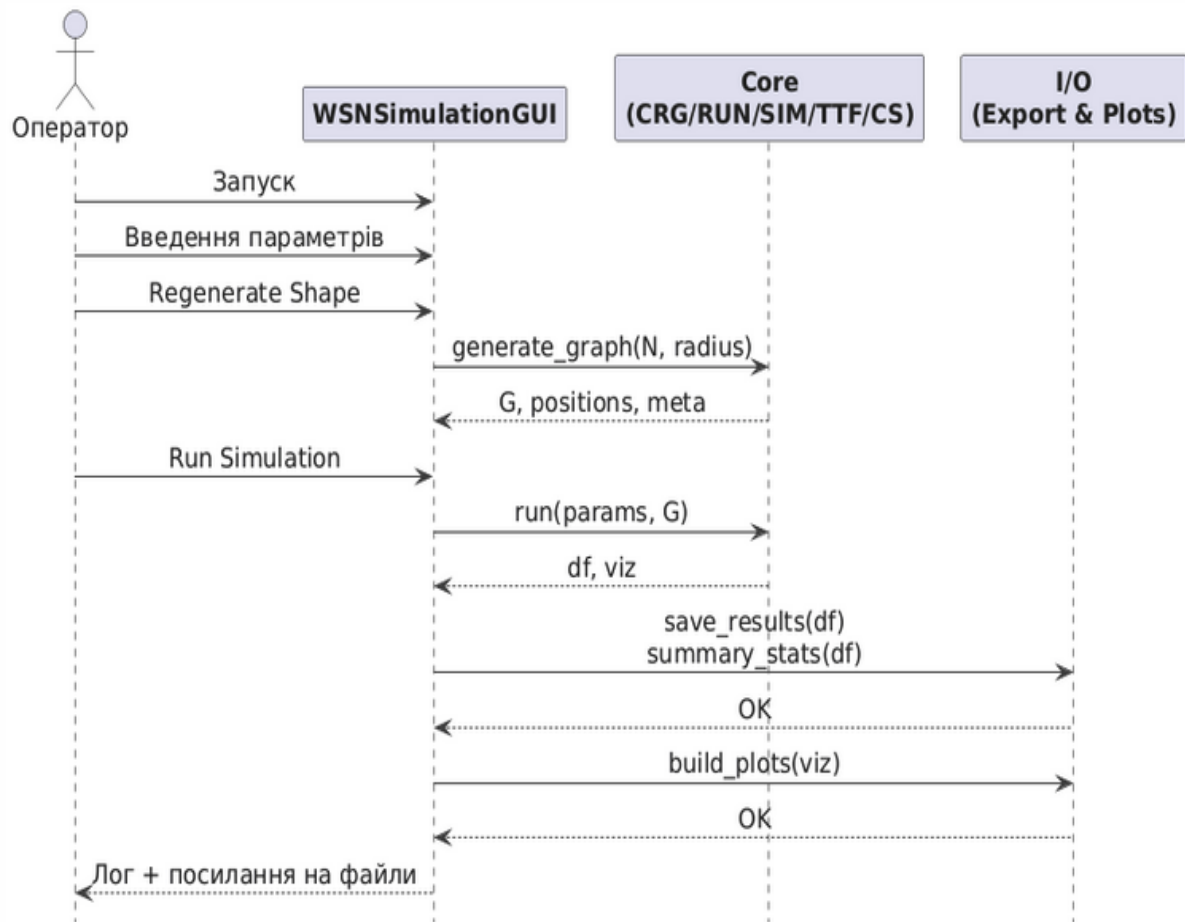


Рис. 3. Діаграма послідовності взаємодії оператора з програмним засобом

Приклад використання

Розроблений програмний засіб було продемонстровано в серії експериментів із моделювання надійності бездротових сенсорних мереж. Інтерфейс користувача реалізовано засобами PyQt6, він складається з кількох функціональних блоків, що забезпечують зручність взаємодії (рис. 4):

1. Панель введення параметрів, де задаються кількість сенсорів, радіус сусідства, інтенсивність відмов, максимальний час моделювання, порогові та просторові критерії відмов, кількість прогонів і рівень довіри.
2. Блок вибору закону розподілу з можливістю одночасного використання експоненційного, нормального та Вейбулла.
3. Елементи керування для побудови топології («Regenerate Shape») та запуску серій симуляцій («Run Simulation»).
4. Вікно виводу повідомлень, що відображає перебіг обчислень у режимі реального часу.
5. Блок доступу до результатів із можливістю відкривати Excel-таблиці з «сирими» даними та статистикою, а також інтерактивні HTML-графіки.

Така організація дозволяє поєднувати інтуїтивність налаштувань із можливістю подальшої обробки та візуалізації результатів.

Рис. 4. Головне вікно програми з налаштованими параметрами

International Scientific-technical journal
«Measuring and computing devices in technological processes» 2025, Issue 4

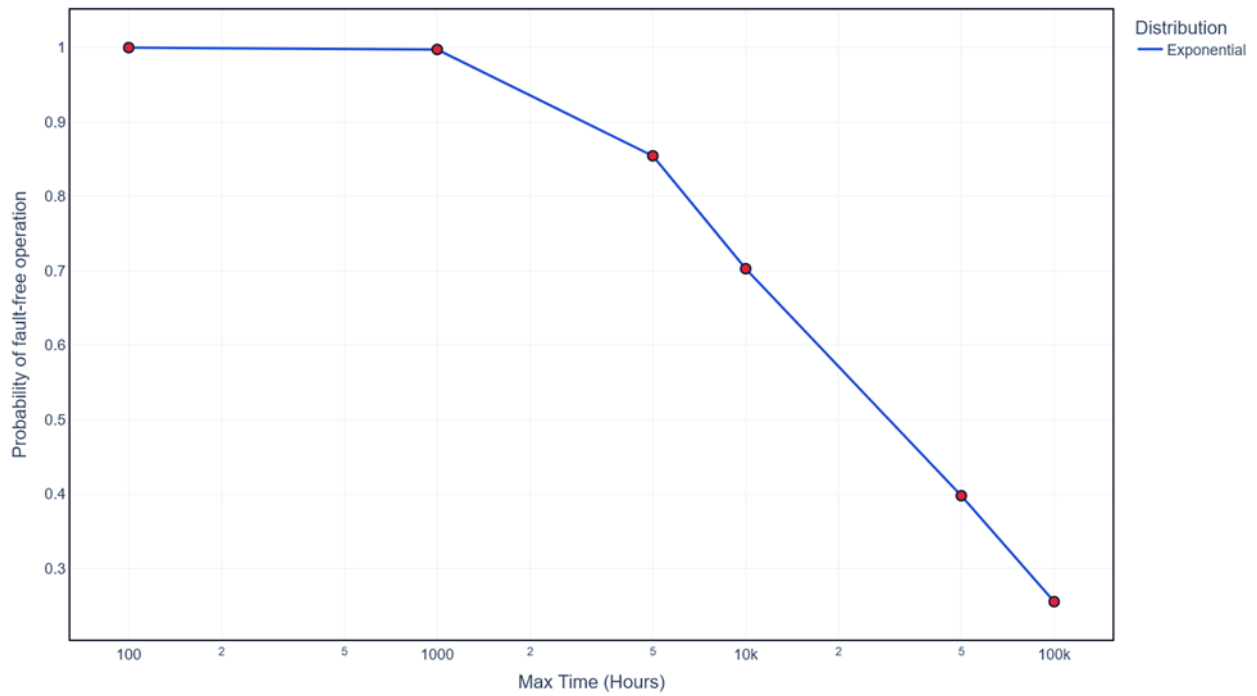


Рис. 5. Графік ймовірності безвідмовної роботи для експоненційного розподілу, метод current

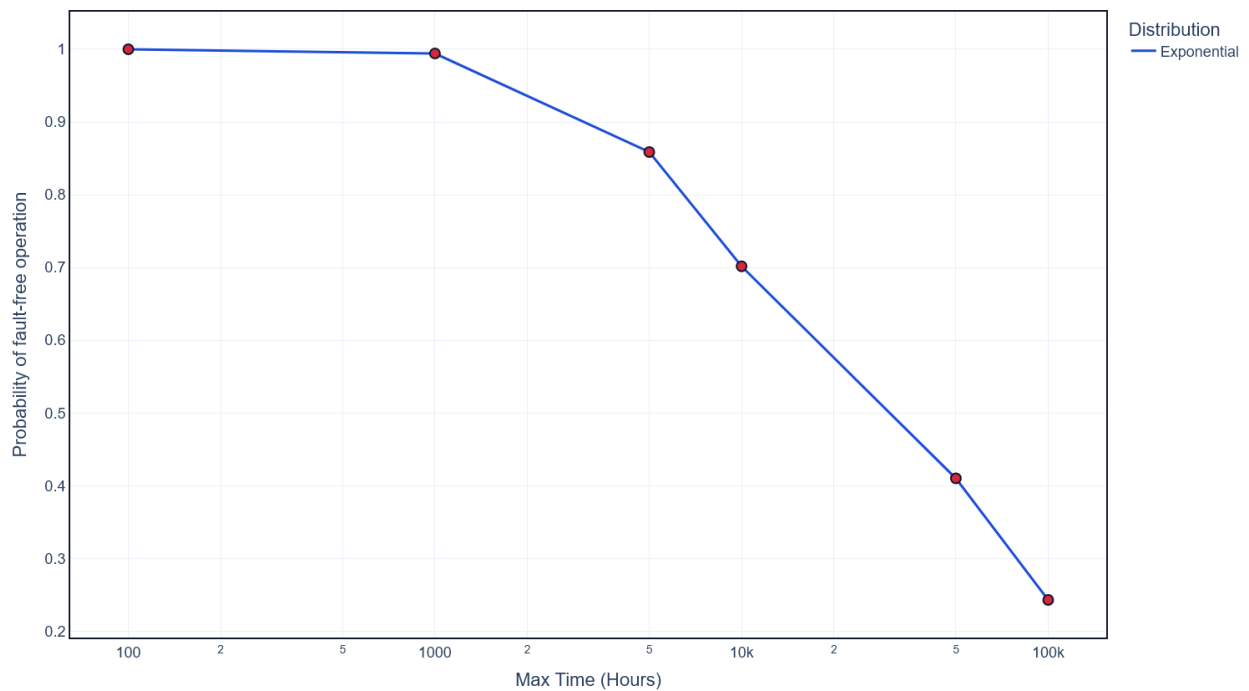


Рис. 6. Графік ймовірності безвідмовної роботи для експоненційного розподілу, метод spatial

У другому експерименті було проведено порівняння трьох законів розподілу часу до відмови на визначеній ділянці місцевості (рис. 7). Для однакових параметрів $N = 100$, $\lambda = 0.00001 \text{ год}^{-1}$, $T = 10000$ і $Runs = 100$ серії прогонів показали (рис. 8), що експоненційний розподіл відтворює незалежні випадкові відмови та дає найбільш передбачувані результати, тоді як Вейбулла дозволяє моделювати як ранні, так і пізні відмови, що підтвердилося у ширших довірчих інтервалах.

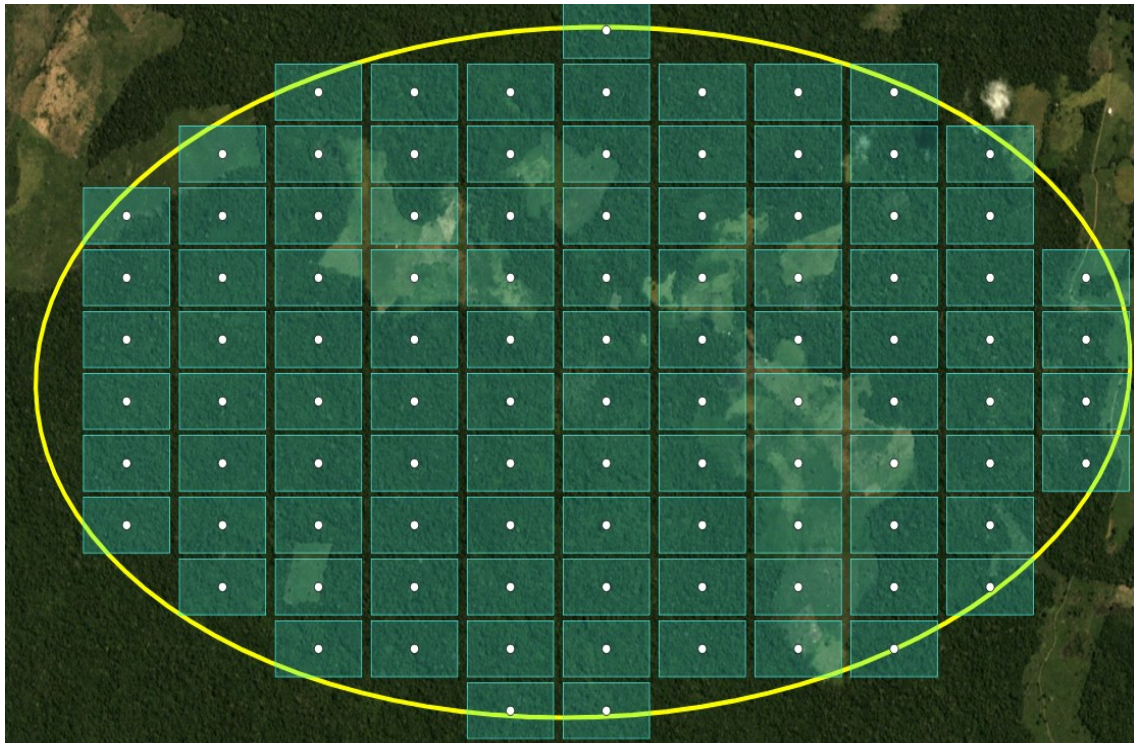


Рис. 7. Карта сенсорів

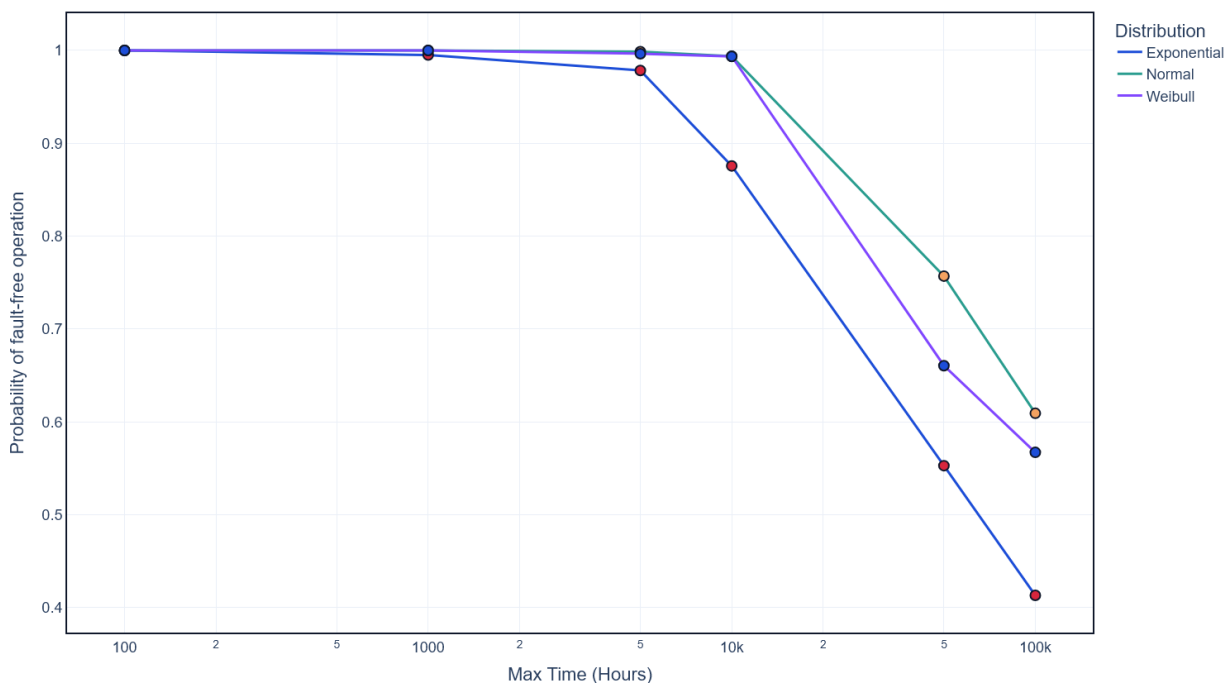


Рис. 8. Порівняння середньої ймовірності безвідмовної роботи для різних розподілів. Метод current при N=50

Результати експериментальних досліджень показали сталу тенденцію до зростання середньої ймовірності безвідмовної роботи мережі зі збільшенням кількості сенсорів. Це узгоджується з очікуваннями, оскільки вища щільність вузлів сприяє покращенню зв'язності графа та зменшує ризик утворення ізованих компонентів.

Додатково був проведений порівняльний аналіз карт сенсорів з різними формами площ покриття: випадковою (рис. 9), прямокутною (рис. 10) та еліптичною (рис. 11). Аналіз продемонстрував, що багатокутні конфігурації характеризуються більшою стабільністю отриманих результатів, тоді як еліптичні та прямокутні форми виявили підвищену варіативність значень ймовірності безвідмовної роботи.



Рис. 9. Карта сенсорів площею покриття випадкової форми при $N = 50$

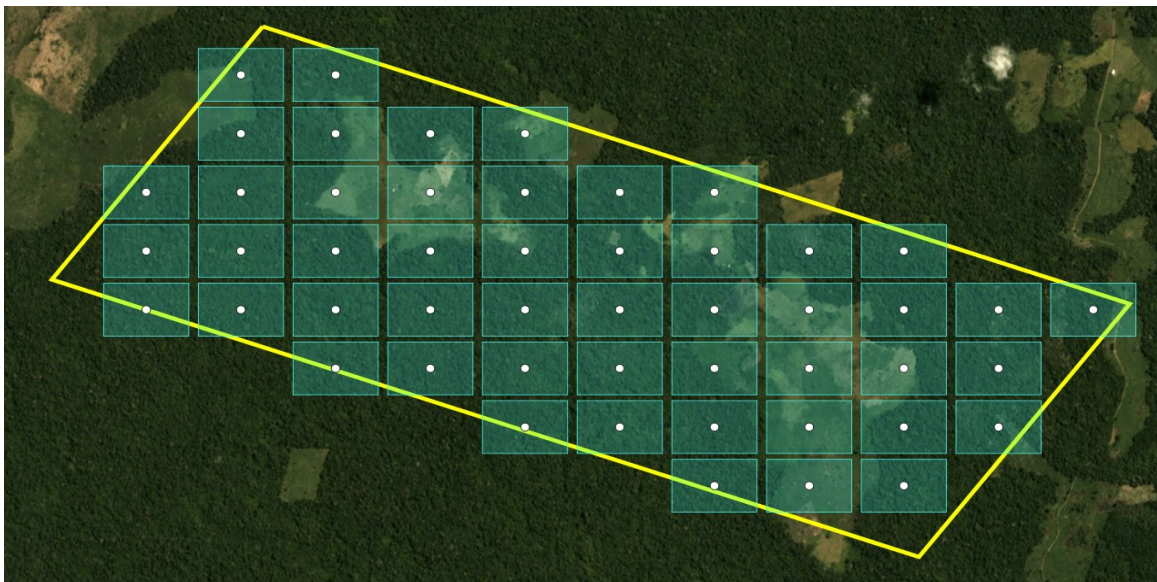


Рис. 10. Карта сенсорів площею покриття прямокутної форми при $N = 50$

Таким чином, форма області розміщення сенсорів може суттєво впливати на розподіл показників надійності навіть за однакових параметрів моделювання.

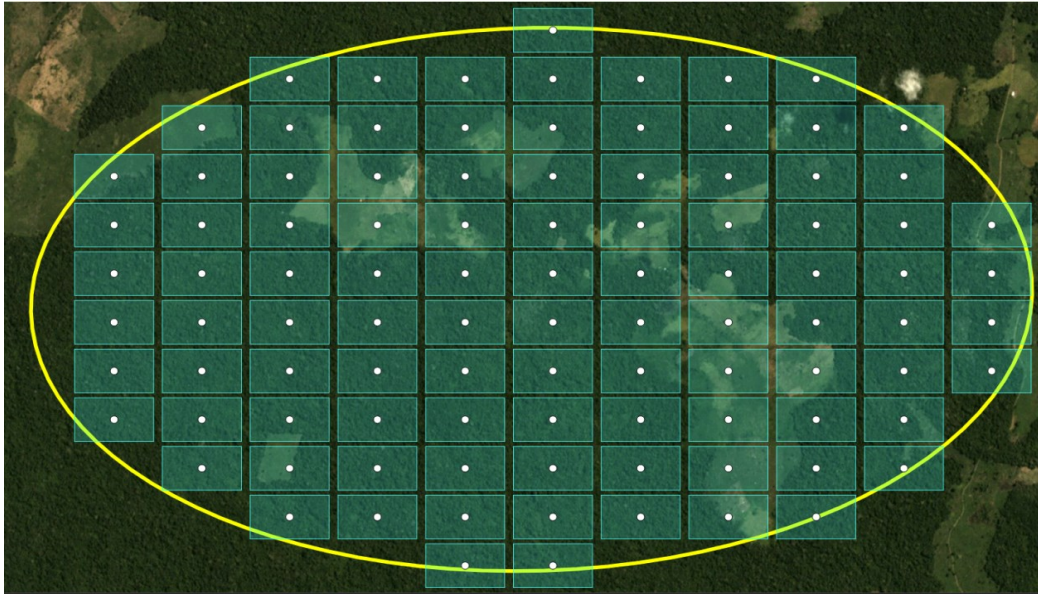


Рис. 11. Карта сенсорів з площею покриття еліптичної форми з $N = 50$

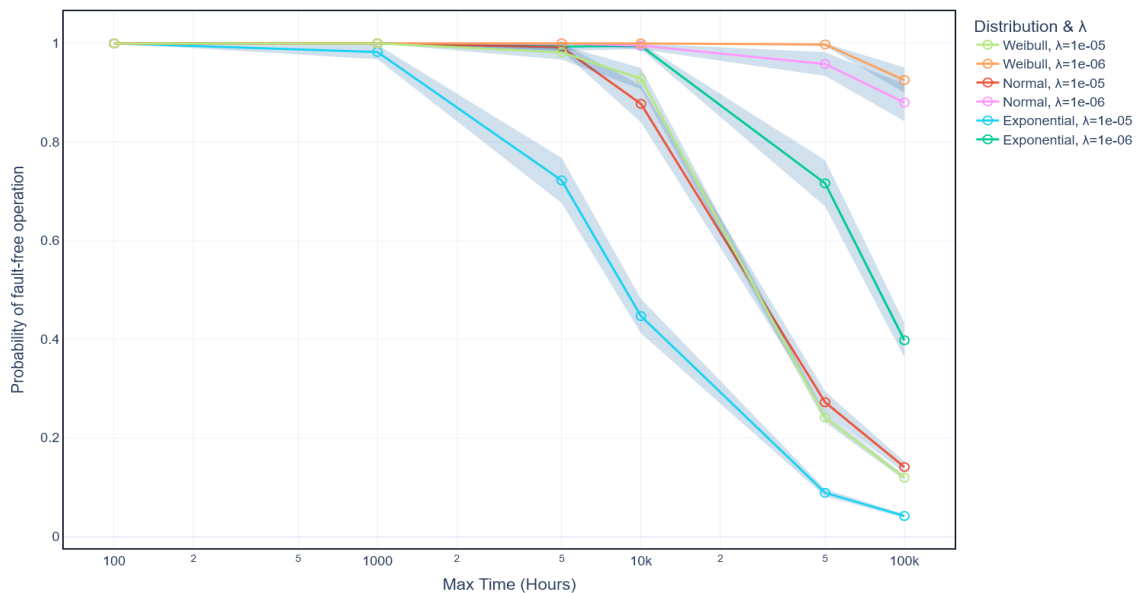


Рис. 12. Порівняння довірчих інтервалів для трьох законів розподілу. Метод current з $N=100$

Для узагальнення і порівняння результатів зміни ймовірностей безвідмовної роботи з урахуванням довірчих інтервалів, представлених на рис. 12, побудовано таблицю 2. Це таблиця середніх значень ймовірності безвідмовної роботи та довірчих інтервалів (90 %). Для $N = 100$ та $\lambda = 0.00001$ год⁻¹ значення змінювалися від 0.74 (Вейбулла, current) до 0.87 (експоненційний, spatial), що підтвердило важливість урахування як закону розподілу, так і критерію відмови. Встановлено, що підсумкові показники залежать як від закону розподілу часу до відмови, так і від обраного критерію просторової відмови, що підтверджує необхідність використання різних комбінацій параметрів у дослідницькій практиці.

Таблиця 2.

Узагальнене порівняння доступності для різних методів і розподілів

Розподіл	Метод	Середня ймовірність безвідмовної роботи	90% ДІ (нижня)	90% ДІ (верхня)
Експоненційний	current	0.90	0.88	0.92
Експоненційний	spatial	0.93	0.91	0.95
Нормальний	current	0.89	0.88	0.91
Нормальний	spatial	0.92	0.90	0.94
Вейбулла	current	0.88	0.88	0.90
Вейбулла	spatial	0.91	0.89	0.93

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі представлено послідовність і спеціалізований програмний засіб для симуляційного моделювання бездротових сенсорних мереж із урахуванням стохастичних відмов сенсорних вузлів та периферійних компонентів за різними сценаріями. Реалізована система забезпечує повний цикл дослідження — від побудови топології мережі у вигляді геометричного графа до генерації вибірок часу до відмови, виконання серійних запусків і формування узагальнених статистичних результатів. Архітектура програмного забезпечення структурована за принципом модульності та включає три взаємопов'язані рівні: інтерфейс користувача, обчислювальне ядро та підсистему збереження і візуалізації даних. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розроблення дослідницьких інструментів для аналізу складних технічних систем.

Результати досліджень підтвердили доцільність застосування симуляційних методів для оцінювання надійності WSN. Було встановлено, що навіть за однакових початкових параметрів окремі симуляційні запуски можуть завершуватися різними подіями — від досягнення граничного часу безвідмовної роботи до реалізації порогових або просторових відмов. Виконання множинних запусків у поєднанні зі статистичною обробкою даних дозволяє оцінити не лише середні характеристики ймовірності безвідмовної роботи, але й ймовірність рідкісних сценаріїв деградації системи. Порівняння різних законів розподілу часу до відмови засвідчило суттєвий вплив форми розподілу на результати, що визначає баланс між ранніми та пізніми відмовами.

Запропонований інструмент має практичну цінність для дослідників, інженерів та студентів, оскільки поєднує простоту налаштування з широкими можливостями варіювання параметрів, а також забезпечує формування достовірних статистичних висновків. Використання вихідних форматів Excel та інтерактивних HTML-звітів робить програмний засіб придатним як для наукових досліджень, так і для навчальних демонстрацій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення методу та розширення можливостей запропонованого програмного засобу щодо оцінювання надійності інтегрованих систем моніторингу на базі сенсорних мереж і безпілотних комплексів [12].

Література

1. Catelani M., Ciani L., Bartolini A., Del Rio C., Guidi G., Patrizi G. Reliability Analysis of Wireless Sensor Network for Smart Farming Applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21, article no. 22. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/s21227683>
2. Xing L. Reliability Modeling of Wireless Sensor Networks: A Review. *Recent Patents on Engineering*. 2021. Vol. 15. P. 3–11. <https://doi.org/10.2174/1872212113666191209091947>
3. Kaur B., Prashar D., Masic L., Almogren A., Rehman A., Altameem A., Hussien S. Enhancing the reliability and accuracy of wireless sensor networks using a deep learning and blockchain approach with DV-HOP algorithm for DDoS mitigation and node localization. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2025. Article no. 46. <https://doi.org/10.1186/s13638-025-02465-w>
4. Shakhov V., Migov D., Chen H., Mishchenko P., Koo I. Toward Reliability of Long Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 124506–124516. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3454367>
5. Yang J., Chen J., Huo Y., Liu Y. A Novel Cluster-Based Wireless Sensor Network Reliability Model. *Journal of Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/8869544>
6. Leichenko K., Skorobohatko S., Fesenko H., Kharchenko V., Yakovlev S. Assessment of the Reliability of Wireless Sensor Networks for Forest Fire Monitoring Systems Considering Fatal Combinations of Multiple Sensor Failures. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2025. Vol. 61, no. 1. P. 137–147. <https://doi.org/10.1007/s10559-025-00753-3>
7. Sobchuk A. V., Barabash O. V., Musienko A. P. Assessment methods of functional stability of wireless sensor networks. *Telecommunication and Information Technologies*. 2019. No. 3(64). P. 46–54. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2019.034654>
8. Опенько П., Довженко Н., Оріховський П., Ікаєв Д. Забезпечення надійності та безпеки у сучасних безпроводових сенсорних мережах на основі впровадження метрики RSSI. *Повітряна міць України*. 2024. Т. 1, № 6. P. 131–136. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-131-136>
9. Машталір В., Жук О., Міненко Л., Артюх С. Концептуальні підходи застосування бездротових сенсорних мереж арміями передових країн світу. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. Т. 47, № 2. P. 96–112. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-96-112>
10. Болдуєв М. В., Болдуєва О. В., Лищенко О. Г. Сучасні підходи до забезпечення надійності та безпеки інформації в корпоративних телекомунікаційних системах. *Агросвіт*. 2024. № 13. P. 42–47. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2024.13.40>
11. Yang SY., Chen CF., Zhou KQ., Ou Y. Coverage Optimization of Wireless Sensor Network Utilizing Improved Cuckoo Search. *Scientific Reports*. 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13247-1>

12. Fesenko H., Illiashenko O., Kharchenko V., Kliushnikov I., Morozova O., Sachenko, A., Skorobohatko S. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring. *Drones*, 7(7), 409. <https://doi.org/10.3390/drones7070409>

References

1. Catelani M., Ciani L., Bartolini A., Del Rio C., Guidi G., Patrizi G. Reliability Analysis of Wireless Sensor Network for Smart Farming Applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21, article no. 22. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/s21227683>
2. Xing L. Reliability Modeling of Wireless Sensor Networks: A Review. *Recent Patents on Engineering*. 2021. Vol. 15. P. 3–11. <https://doi.org/10.2174/1872212113666191209091947>
3. Kaur B., Prashar D., Masic L., Almogren A., Rehman A., Altameem A., Hussien S. Enhancing the Reliability and Accuracy of Wireless Sensor Networks Using a Deep Learning and Blockchain Approach with DV-HOP Algorithm for DDoS Mitigation and Node Localization. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2025. Article no. 46. <https://doi.org/10.1186/s13638-025-02465-w>
4. Shakhov V., Migov D., Chen H., Mishchenko P., Koo I. Toward Reliability of Long Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 124506–124516. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3454367>
5. Yang J., Chen J., Huo Y., Liu Y. A Novel Cluster-Based Wireless Sensor Network Reliability Model. *Journal of Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/8869544>
6. Leichenko K., Skorobohatko S., Fesenko H., Kharchenko V., Yakovlev S. Assessment of the Reliability of Wireless Sensor Networks for Forest Fire Monitoring Systems Considering Fatal Combinations of Multiple Sensor Failures. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2025. Vol. 61, no. 1. P. 137–147. <https://doi.org/10.1007/s10559-025-00753-3>
7. Sobchuk A. V., Barabash O. V., Musienko A. P. Assessment methods of functional stability of wireless sensor networks. *Telecommunication and Information Technologies*. 2019. No. 3(64). P. 46–54. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2019.034654>
8. Openko P., Dovzhenko N., Orikhovsky P., Ikaev D. Ensuring Reliability and Security in Modern Wireless Sensor Networks Based on RSSI Metrics. *Air Power of Ukraine*. 2024. Vol. 1, no. 6. P. 131–136. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-131-136>
9. Mashtalir V., Zhuk O., Minenko L., Artyukh S. Conceptual approaches to the use of wireless sensor networks by the armies of the world's leading countries. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. 2023. Vol. 47, no. 2. P. 96–112. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-96-112>
10. Bolduiev M., Bolduieva O., Lyshchenko O. Modern approaches to ensuring the reliability and security of information in corporate telecommunications systems. *Agrosvit*. 2024. No. 13. P. 42–47. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2024.13.40>
11. Yang SY., Chen CF., Zhou KQ., Ou Y. Coverage Optimization of Wireless Sensor Network Utilizing Improved Cuckoo Search. *Scientific Reports*. 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13247-1>
12. Fesenko H., Illiashenko O., Kharchenko V., Kliushnikov I., Morozova O., Sachenko, A., Skorobohatko S. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring. *Drones*, 7(7), 409. <https://doi.org/10.3390/drones7070409>