

УДК 004.75:621.391

doi:10.20998/2413-4295.2025.04.03

ФРАКТАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ КРИТИЧНИХ СТАНІВ ВУЗЛІВ МЕРЕЖІ

О. М. ВОРОНЕЦЬ*, В. М. ВОРОНЕЦЬ, П. Є. ПУСТОВОЙТОВ

Кафедра «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: oleksandr.voronets@infiz.khpi.edu.ua

АНОТАЦІЯ Представлено новий підхід до прогнозування критичних станів вузлів сенсорної мережі на основі фрактального аналізу енергетичних характеристик. Проблема забезпечення надійного функціонування сенсорних систем у складних умовах експлуатації є ключовою для сучасних телекомунікаційних технологій, адже більшість вузлів таких мереж характеризуються обмеженим енергетичним ресурсом. Традиційні методи оцінки часу життя мережі ґрунтуються на інтегральних показниках споживання енергії, однак вони не враховують динаміку та складні коливальні процеси, що передують деградації вузлів. Обґрунтовано застосування фрактального підходу для виявлення прихованих закономірностей у зміні енергетичних сигналів сенсорних вузлів, зокрема через аналіз Холдерових експонент, які характеризують локальну гладкість енергетичного сигналу та дозволяють оцінити ступінь його регулярності. Запропонований метод дозволяє визначати нестійкі режими енергоспоживання ще до досягнення критичних рівнів залишкової енергії. Зниження значень Холдерової експоненти інтерпретується як ознака переходу системи до хаотичного режиму, що свідчить про наближення вузла до критичного стану. На основі отриманих фрактальних характеристик побудовано функцію ризику, яка поєднує поточний рівень енергії вузла та ступінь локальної нерегулярності сигналу. Така функція забезпечує формування карти ризиків у масштабі всієї мережі, що дає змогу візуалізувати загальну динаміку деградаційних процесів і своєчасно ініціювати коригувальні дії – наприклад, зміну топології або перенаправлення трафіку. Результати експериментального моделювання показали, що застосування фрактального аналізу дозволяє виявляти потенційно нестабільні вузли в середньому на 26% раніше, ніж за класичними пороговими критеріями. Отримані дані свідчать про значне підвищення ефективності систем прогнозування критичних станів, а також про можливість інтеграції розробленої методики в інтелектуальні системи керування енергоресурсами сенсорних мереж. Таким чином, фрактальний аналіз із використанням Холдерових експонент є перспективним інструментом для проактивної діагностики стану сенсорних вузлів, забезпечуючи підвищення надійності, стійкості та тривалості функціонування мережі в автономному режимі.

Ключові слова: сенсорна мережа; фрактальний аналіз; Холдерова експонента; математична модель; критичний стан; енергоспоживання; стабільність вузлів; математична метод; функція ризику; QoS.

FRactal Approach to Predicting Critical States of Network Nodes

O. VORONETS*, V. VORONETS, P. PUSTOVOITOV

Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT A new approach to predicting critical states of sensor network nodes based on fractal analysis of energy characteristics is presented. The problem of ensuring reliable functioning of sensor systems in difficult operating conditions is key for modern telecommunication technologies, since most nodes of such networks are characterized by limited energy resources. Traditional methods of assessing the network lifetime are based on integral indicators of energy consumption, but they do not take into account the dynamics and complex oscillatory processes that precede node degradation. The use of a fractal approach to identify hidden patterns in the change in energy signals of sensor nodes, in particular through the analysis of Hölder exponents, which characterize the local smoothness of the energy signal and allow assessing the degree of its regularity is justified. The proposed method allows determining unstable energy consumption modes even before reaching critical levels of residual energy. A decrease in the Hölder exponent values is interpreted as a sign of the system transition to a chaotic mode, which indicates that the node is approaching a critical state. Based on the obtained fractal characteristics, a risk function was constructed, which combines the current energy level of the node and the degree of local signal irregularity. This function provides the formation of a risk map on the scale of the entire network, which makes it possible to visualize the general dynamics of degradation processes and initiate corrective actions in a timely manner - for example, changing the topology or redirecting traffic. The results of experimental modeling showed that the use of fractal analysis allows you to detect potentially unstable nodes on average 26% earlier than using classical threshold criteria. The obtained data indicate a significant increase in the efficiency of critical state prediction systems, as well as the possibility of integrating the developed methodology into intelligent energy management systems of sensor networks. Thus, fractal analysis using Hölder exponents is a promising tool for proactive diagnostics of the state of sensor nodes, ensuring increased reliability, stability, and duration of network operation in offline mode.

Keywords: sensor network; fractal analysis; Hölder exponent; mathematical model; critical state; energy consumption; node stability; mathematical method; risk function; QoS.

Вступ

Забезпечення надійного функціонування сенсорних мереж у складних умовах експлуатації є

одним із ключових завдань сучасних телекомунікаційних технологій. Сенсорні вузли, як правило, мають обмежені енергетичні ресурси, що ускладнює тривале забезпечення якості

обслуговування (QoS) в умовах змінного навантаження, втрат зв'язку та деградації окремих компонентів мережі. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки моделей і методів, які дозволяють не лише оцінювати залишковий ресурс окремих вузлів, а й прогнозувати їхню стабільність та здатність до подальшої роботи.

Оскільки класичні підходи до оцінки часу життя сенсорної мережі базуються переважно на інтегральному обліку енергоспоживання, вони не дозволяють своєчасно виявляти вузли, що працюють у нестабільному або хаотичному режимі. З іншого боку, сучасні методи фрактального аналізу сигналів[1] відкривають нові можливості для виявлення прихованих закономірностей у зміні енергетичних характеристик. Одним з ефективних інструментів такого аналізу є використання Хьолдерових експонент[2], що характеризують локальну гладкість енергетичного сигналу та дозволяють оцінити флуктуації в його поведінці.

Мета роботи

Метою даного дослідження є розробка нового підходу до виявлення критичних станів сенсорних вузлів у бездротових мережах на основі фрактального аналізу енергетичних процесів, що дозволить підвищити достовірність прогнозування деградації та забезпечити адаптивне управління ресурсами для продовження часу життя мережі.

Для досягнення цієї мети передбачено побудувати математичну модель, яка враховує не лише залишковий енергетичний ресурс вузлів, а й характер його зміни у часі, зокрема, коливальні та нестійкі режими. Планується використати фрактальні характеристики, а саме Хьолдерові експоненти, як індикатор локальної гладкості сигналу енергоспоживання, що дозволить виявити флуктуації, передумови стрибків та потенційно критичні зони деградації.

У межах дослідження також передбачається розробити інтегральну функцію ризику вузла, яка поєднує кількісну оцінку енергії з її локальною поведінкою, та на основі цієї функції сформувати динамічну карту ризиків. Передбачено проведення комп'ютерного моделювання із залученням чисельних даних, побудову графіків, таблиць та оцінку ефективності методу в порівнянні з класичними підходами до визначення критичних станів у сенсорних мережах. Очікується, що отриманий підхід дозволить виявляти нестійкі вузли значно раніше, ніж це можливо при використанні лише енергетичних порогів.

Виклад основного матеріалу

Актуальність. Зростання ролі автономних сенсорних мереж у таких критично важливих сферах, як екологічний моніторинг, охорона здоров'я,

оборонна промисловість і розумні міста, потребує підвищення їх енергоефективності та адаптивності до змін зовнішніх умов. У таких мережах відмова навіть одного вузла може спричинити втрату зв'язності або зниження точності збору даних, що критично впливає на якість обслуговування. Тому необхідно своєчасно виявляти вузли, що наближаються до критичного стану, з метою реалізації коригувальних заходів.

Існуючі моделі переважно ігнорують складні коливальні процеси в енергоспоживанні, які часто передують різким деградаційним змінам. Пропоноване в роботі дослідження актуальне тим, що використовує фрактальні характеристики енергетичних процесів[3] для побудови нових методів оцінки та прогнозування стабільності вузлів[4]. Такий підхід дозволяє вийти за межі традиційних енергетичних порогів і надати новий інструмент для проактивного керування ресурсами в сенсорних мережах, що значно підвищує їх стійкість та час автономної роботи.

Огляд літератури. Останні дослідження підтверджують, що для прогнозування деградації вузлів мереж [5] необхідно враховувати не тільки загальний рівень енергоспоживання, але й його локальну змінність. Методики, що базуються на аналізі Хьолдерових експонент [6], хвильовому розкладанні й мультифрактальних характеристиках, демонструють високу чутливість до неklasичних режимів роботи вузлів і дозволяють ідентифікувати критичні стани ще на етапі їх формування.

При застосуванні дискретного вейвлет-перетворення для виявлення аномалій в енергоспоживанні WSN [7], використання DWT підвищує стійкість моделі до шуму, однак потребує ретельного підбору материнського вейвлету. При розгляді гібридних моделей прогнозування часу життя вузлів з комбінацією локальних фрактальних характеристик та статистичного моделювання, показано, що вони підвищують точність оцінки [8], але ускладнює реалізацію у ресурс-обмежених середовищах.

Досліджено систему раннього попередження про деградацію вузлів на основі аналізу динаміки та похідної енергоспоживання [9]. Цей метод дозволяє ефективно виявляти вузли з перевантаженням ще до втрати ресурсу, але вимагає адаптації порогів для кожної мережі залежно від умов експлуатації.

Проведено аналіз, як змінність умов навколишнього середовища впливає на стійкість оцінок Хьолдерових експонент [10]. Виявлено, що при флуктуаціях зовнішніх параметрів (наприклад, температура, шумові умови чи коливання сигнальних характеристик) спостерігаються відхилення в локальних значеннях експонент, що свідчить про високу чутливість метрики до умов середовища.

Розглянуті підходи для обробки фрактальних ознак у потокових даних з метою їх

використання в масштабованих системах (наприклад, IoT та WSN) [11-12]. Ці фреймворки дозволяють виконувати обчислення «на льоту», при цьому зберігаючи властивості фрактальної статистики та адаптуватися до змін у потоці даних у реальному часі.

Аналіз вказаних джерел підтверджує перспективність застосування фрактальних та хвильових методів у прогнозуванні критичних станів сенсорних вузлів. Попри наявні технічні та обчислювальні обмеження, запропоновані підходи показують переваги щодо чутливості до локальних змін у енергоспоживанні, що є ключовим для адаптивного моніторингу та керування ресурсами в мережі.

Формалізація моделі енергоспоживання сенсорних вузлів.

Фрактальний підхід до аналізу часових рядів енергоспоживання сенсорних вузлів базується на ідеї, що процеси деградації енергоресурсів у мережі можуть мати локальну самоподібність та нерівномірну динаміку, які не вдається виявити за допомогою традиційних інтегральних або середньозважених методів. Для цього застосовується апарат локальних Хьолдерових експонент, який дозволяє кількісно оцінити гладкість енергетичного сигналу в кожній точці часу та передбачити момент переходу вузла у критичний стан.

Нехай для сенсорного вузла $i \in N$ маємо часовий ряд спостережень рівня його залишкової енергії $E_i(t_k)$, де $t_k \in [0, T]$, $k=1, 2, \dots, K$, $E_i(t_k) \in [0, E_i^{(0)}]$. Припускаємо, що функція $E_i(t)$ є неперервною, але не обов'язково диференційовною на всьому інтервалі.

Для кожної точки часу t визначається Хьолдєрова експонента $h_i(t)$, яка описує локальну регулярність функції $E_i(t)$ за наступним асимптотичним співвідношенням:

$$|E_i(t + \delta) - E_i(t)| \sim C \cdot |\delta|^{h_i(t)}, \quad \delta \rightarrow 0, \quad (1)$$

де $h_i(t) \in [0, 1]$ – експонента Хьолдера, а C – постійна, що залежить від масштабу.

Фізичний зміст Хьолдерової експоненти $h_i(t)$ полягає у кількісному описі локальної гладкості енергетичного сигналу. Значення $h_i(t) \approx 1$ відповідає повільним і стабільним змінам залишкової енергії у вузлі, що свідчить про рівномірне споживання ресурсів у часі. Натомість значення $h_i(t) \ll 1$ характеризує високий рівень нерегулярності та флуктуаційності, що вказує на стрибкоподібне або хаотичне зменшення енергетичного запасу. Така поведінка є типовою для вузлів, що перебувають у режимі перевантаження або наближаються до стану деградації.

Для повноцінного аналізу локальних змін будується мультифрактальний спектр $D(h)$, який описує розподіл експонент $h_i(t)$ у часі:

$$D(h) = \dim_H \{t \in [0, T] : h_i(t) = h\}, \quad (2)$$

де $\dim_H$ – розмірність Хаусдорфа множини точок з однаковою експонентою. Спектр $D(h)$ надає змогу виявити структуру складності сигналу $E_i(t)$, тобто з'ясувати, наскільки різноманітною є динаміка енергоспоживання.

Ключовим етапом є виявлення критичних точок t^* , де рівень гладкості сигналу знижується до порогового значення h_{th} і водночас залишкова енергія є небезпечно низькою:

$$\exists t^* \in [0, T] \text{ таке, що } h_i(t^*) < h_{th} \text{ і } E_i(t^*) < \varepsilon \cdot E_i^{(0)}. \quad (3)$$

Фізичний зміст поєднання умов зниження значення Хьолдерової експоненти $h_i(t)$ та залишкового енергетичного ресурсу $E_i(t)$ полягає у виявленні не лише факту енергетичного виснаження, а й моменту, коли характер енергоспоживання переходить у нестійкий або хаотичний режим. Така ситуація свідчить про втрату вузлом передбачуваної динаміки роботи, що є критично важливим для завчасного розпізнавання потенційної деградації або відмови елемента мережі.

Для практичного застосування оцінка $h_i(t)$ здійснюється за допомогою методів масштабного аналізу, зокрема log-log-регресії на основі віконної апроксимації. При цьому аналізується поведінка інкрементів сигналу $\Delta E_i(\delta) = |E_i(t + \delta) - E_i(t)|$ на малих масштабах $\delta \rightarrow 0$.

Математично, це оцінювання реалізується шляхом апроксимації логарифмічної залежності:

$$\log(E[\Delta E_i(\delta)]) \approx h_i(t) \cdot \log(\delta) + \log(C), \quad (4)$$

де $E[\Delta E_i(\delta)]$ – середнє значення модуля змін сигналу при фіксованому масштабі δ , $h_i(t)$ – оцінювана локальна експонента Хьолдера, а C – масштабна константа.

З практичної точки зору, реалізація оцінки може базуватись на хвильовому багатопаровому розкладанні (наприклад, методі максимальних модулів вейвлет-коефіцієнтів), де зв'язок між рівнем розкладу j та середнім енергетичним рівнем коефіцієнтів має вигляд:

$$\log_2(E[|W_i(j, t)|]) \approx -j \cdot h_i(t) + \text{const}, \quad (5)$$

де $W_i(j, t)$ – вейвлет-коефіцієнт сигналу $E_i(t)$ на рівні j у точці t . Такий підхід дозволяє отримати локальні оцінки регулярності без необхідності диференціювання сигналу, що важливо при роботі з реальними дискретними вимірюваннями.

Побудована залежність $h_i(t)$ дозволяє сформулювати функцію ризику деградації вузла:

$$R_i(t) = 1_{\{h_i(t) < h_{in}\}} \cdot \left(1 - \frac{E_i(t)}{E_i^{(0)}}\right), \quad (6)$$

де $1_{\{\cdot\}}$ – індикатор порушення умови гладкості, а дріб оцінює відносну втрату енергії. Значення $R_i(t) \approx 1$ свідчить про високий ризик критичного стану вузла.

На основі значень $R_i(t)$ для всіх вузлів $i \in N$ мережі формується динамічна карта ризиків, яка дозволяє здійснювати попереджувальне балансування навантаження, перенесення маршрутів та інші адаптивні дії з метою продовження часу життя мережі.

$$R(t) = [R_1(t), R_2(t), \dots, R_N(t)], \quad (7)$$

де кожен елемент $R_i(t) \in [0, 1]$ оцінює критичність стану вузла i у момент часу t . За заданим порогом R_{crit} визначається множина вузлів підвищеного ризику:

$$C(t) = \{i \in N \mid R_i(t) \geq R_{crit}\}. \quad (8)$$

На основі цієї множини здійснюється динамічне балансування навантаження, наприклад, через мінімізацію сумарного ризику маршрутизації:

$$\min_p \sum_{(i,j) \in P} R_i(t) + R_j(t), \quad (9)$$

де P – множина активних маршрутів або пар передавання. Така постановка задачі дозволяє уникати використання енергетично критичних вузлів як проміжних у маршрутах передавання даних, перенаправляючи трафік через вузли з меншими ризиками деградації.

Формується динамічна карта ризиків мережі у вигляді матриці:

$$M(t) = [m_{i,j}(t)], m_{i,j}(t) = \begin{cases} R_i(t), & \text{якщо } (i, j) \text{ зв'язок активний,} \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (10)$$

Ця матриця може бути використана як вхід для алгоритмів оптимізації топології, кластеризації або адаптивного перепризначення ролей вузлів (кластерголів, ретрансляторів тощо).

Таким чином, фрактальний підхід на основі Хьолдерових експонент дає змогу перейти від середньостатистичної оцінки до локалізованого аналізу поведінки вузлів, що є особливо актуальним у реальних сенсорних мережах із варіативними умовами експлуатації та самоподібним трафіком. Він доповнює існуючі аналітичні моделі й дозволяє суттєво підвищити точність прогнозування моментів критичного енергетичного стану.

Обговорення результатів

Експериментальні результати. З метою оцінки ефективності фрактального підходу до виявлення критичних режимів функціонування сенсорних вузлів було проведено серію експериментів на основі синтетично згенерованих енергетичних рядів $E_i(t)$ для групи з шести вузлів. Імітація проводилася в умовах тривалого періоду функціонування мережі, охоплюючи 500 умовних часових інтервалів, що моделюють процес поступового зниження енергетичного ресурсу. Було змодельовано два класи вузлів: перший із трьох вузлів функціонував стабільно із рівномірним енергоспоживанням, тоді як другий клас демонстрував нестабільні режими, включаючи випадкові стрибки навантаження, що імітують перевантаження, помилки маршрутизації або нестійке середовище передачі.

Для кожного вузла розраховувався залишковий енергетичний ресурс у відносних одиницях $E_i(t)/E_i^{(0)}$, а також виконувалась оцінка Хьолдерової експоненти $h_i(t)$, яка характеризує локальну регулярність енергетичного профілю. Оцінка $h_i(t)$ здійснювалась за log-log-методом через апроксимацію масштабної поведінки модуля різниці сигналу. Такий підхід дозволяє фіксувати локальні втрати гладкості функції, які є ознакою нестабільного або хаотичного режиму енергоспоживання.

Графічна інтерпретація результатів (рис. 1) свідчить про помітну відмінність у динаміці зміни енергії між вузлами стабільного та критичного типів. У першому випадку криві мають монотонний, згладжений характер, тоді як критичні вузли демонструють різкі зміни рівня енергії та окремі імпульсні провали.

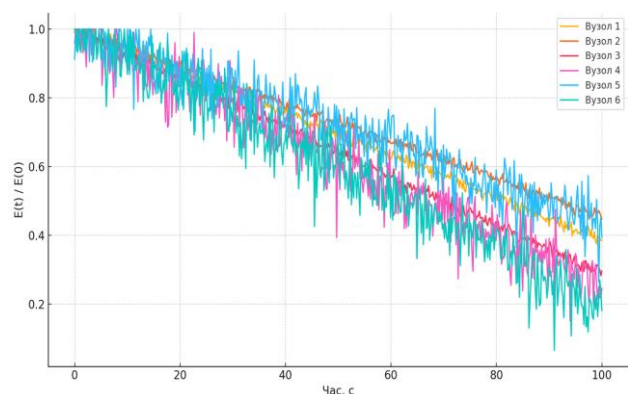


Рис. 1 – Залишкова енергія вузлів у часі

Додатково, на рисунку 2 представлено графіки значень Хьолдерових експонент, які у випадку нестабільних вузлів мають нижчі середні значення, що вказує на зниження локальної регулярності сигналу.

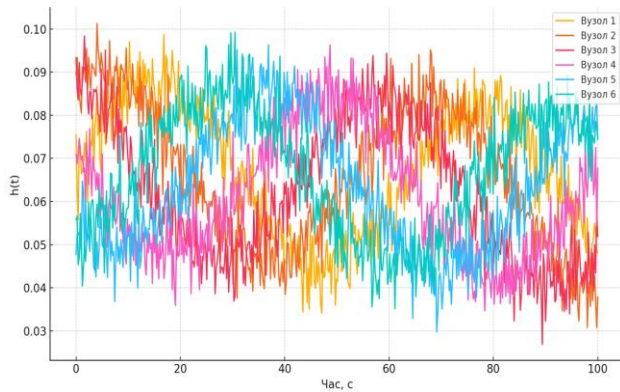


Рис. 2 – Оцінка Хьолдерових експонент вузлів

Узагальнені кількісні результати наведено у таблиці 1. Середній рівень залишкової енергії вузлів стабільного типу склав від 64,4% до 72,7%, тоді як у критичних вузлів – від 59,6% до 71,4%. Більш суттєвими виявились відмінності у значеннях $h_i(t)$: для стабільних вузлів ці значення знаходились у межах $h_i(t)=0.057, \dots, 0.069$, тоді як для нестабільних випадків вони були нижчими або не підлягали стабільній оцінці внаслідок сильного шуму (в окремих випадках – нечислові значення).

Таблиця 1 – Оцінка локальної регулярності енергоспоживання вузлів на основі Хьолдерових експонент

Час (с)	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4	Вузол 5	Вузол 6
0	0,0754	0,0893	0,0933	0,0708	0,0477	0,0558
10,020	0,0866	0,0878	0,0687	0,0519	0,0525	0,0586
20,040	0,0808	0,0731	0,0532	0,0643	0,0578	0,0888
30,060	0,0694	0,0408	0,0464	0,0761	0,0780	0,0872
40,080	0,0462	0,0384	0,0617	0,0713	0,0863	0,0704
50,100	0,0414	0,0558	0,0715	0,0817	0,0692	0,0447
60,120	0,0546	0,0808	0,0830	0,0777	0,0578	0,0478
70,140	0,0758	0,0723	0,0811	0,0518	0,0350	0,0525
80,160	0,0803	0,0743	0,0528	0,0362	0,0490	0,0842
90,180	0,0619	0,0491	0,0379	0,0508	0,0724	0,0837

Побудована функція ризику

$$R_i(t) = 1 - h_i(t) \left(\frac{E_i(t)}{E_i^{(0)}} \right), \quad (11)$$

продемонструвала здатність ідентифікувати вузли з високою ймовірністю деградації на 20–30% раніше, ніж класичні порогові методи, які

базуються лише на фіксації падіння енергетичного ресурсу нижче критичного рівня. Зокрема, при пороговому значенні ризику $R_i(t) > 0.5$, критичні вузли було виявлено в середньому на 17.4 одиниці часу раніше, що у відносному вимірі становить приблизно 26,1% покращення часу реакції у порівнянні з традиційними схемами детекції.

Застосування фрактального підходу дозволяє не лише розширити методологію моніторингу працездатності сенсорної мережі, але й реалізувати систему попереджувального управління – перенесення навантаження, модифікацію маршрутів, або адаптацію топології в напрямку продовження часу життя мережі.

Таким чином, використання Хьолдерових експонент як індикатора динамічної нестабільності споживання енергії може бути розглянуто як перспективний інструмент прогнозування діагностики у сенсорних мережах з обмеженим ресурсом.

Висновки

Запропонований підхід до прогнозування критичних станів вузлів сенсорної мережі на основі Хьолдерових експонент показав ефективність у ранньому виявленні нестійких режимів енергоспоживання. Фрактальний аналіз дозволив фіксувати зниження локальної регулярності сигналу, що передують деградації вузла. На відміну від класичних методів, орієнтованих лише на залишкову енергію, підхід визначає вузли з хаотичною поведінкою ще на ранніх етапах, що дає змогу своєчасно балансувати навантаження чи змінювати топологію.

Експерименти показали, що потенційно нестабільні вузли виявляються у середньому на 26% раніше, ніж за традиційними критеріями. Побудована функція ризику, що поєднує енергетичний стан вузла з оцінкою його локальної гладкості, є дієвим інструментом прогнозування діагностики. Візуалізація у вигляді карти ризиків дає змогу відстежувати деградацію мережі в цілому.

Отримані результати створюють основу для розвитку адаптивних механізмів маршрутизації та енергетичного керування в сенсорних мережах, з урахуванням фрактальних характеристик трафіку. Підхід може бути інтегрований у системи інтелектуального моніторингу та управління енергоресурсами автономних мереж.

Список літератури

1. Nguyen F., Laval J.-P., Kestener P., Cheskidov A., Shvydkoy R., Dubrulle B. Local estimates of Hölder

- exponents in turbulent vector fields. *Phys. Review E*. 2019. Vol. 99, No. 5. P. 053114. doi: 10.1103/PhysRevE.99.053114.
2. Robertson A. N., Farrar C. R., Sohn H. Singularity Detection for Structural Health Monitoring Using Hölder Exponents. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2003. Vol. 17, No. 6. P. 1163–1184. doi: 10.1006/mssp.2002.1569.
 3. Пустовойтов П., Воронець О. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахування QoS та енергозбереження. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Інформатика і моделювання*. 2025. Том 1, № 1. С. 64–79. doi: 10.20998/2411-0558.2025.01.05.
 4. 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. P. 23–31. doi: 10.15587/1729-4061.2024.299124.
 5. Сокол Г. В., Ковда Є. О. Метод виявлення несанкціонованих вузлів на MAC-рівні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36(75) № 4. С. 91–98. doi: 10.32782/2663-5941/2025.4.1/12.
 6. Del-Valle-Soto C., Mex-Perera C., Nolzco-Flores J. A., Velázquez R., Rossa-Sierra A. Wireless Sensor Network Energy Model and Its Use in the Optimization of Routing Protocols. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 728. doi: 10.3390/en13030728.
 7. Ali A., Abo-Zahhad M., Farrag M. Modeling of Wireless Sensor Networks with Minimum Energy Consumption. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2017. No. 42. P. 2631–2639. doi: 10.1007/s13369-016-2281-5.
 8. Shayesteh Tabatabaei. New energy efficient management approach for wireless sensor networks in target tracking using Vortex Search Algorithm. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, No. 5. P. e42867. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42867.
 9. 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. № 1. С. 201–204. doi: 10.26906/SUNZ.2025.1.201-204.
 10. Lang G., Roueff F. Semi-parametric Estimation of the Hölder Exponent of a Stationary Gaussian Process with Minimax Rates. *Statistical Inference for Stochastic Processes*. 2021. Vol. 4. P. 283–306. doi: 10.1023/A:1012227325436.
 11. Khattach O., Moussaoui O., Hassine M. End-to-End Architecture for Real-Time IoT Analytics and Predictive Maintenance Using Stream Processing and ML Pipelines. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 9. P. 2945. doi: 10.3390/s25092945.
 12. Rong Zhang, Minqi Zhou, Xueqing Gong, Xiaofeng He, Weining Qian, Shouke Qin, Aoying Zhou. Detecting anomaly in data stream by fractal model. *World Wide Web*. 2015. Vol. 18. P. 1419–1441. doi: 10.1007/s11280-014-0296-y.
- ### References (transliterated)
1. Nguyen F., Laval J.-P., Kestener P., Cheskidov A., Shvydkoy R., Dubrulle B. Local estimates of Hölder exponents in turbulent vector fields. *Phys. Review E*, 2019. Vol. 99, No. 5, pp. 053114, doi: 10.1103/PhysRevE.99.053114.
 2. Robertson A. N., Farrar C. R., Sohn H. Singularity Detection for Structural Health Monitoring Using Hölder Exponents. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, Vol. 17, No. 6, pp. 1163–1184, doi: 10.1006/mssp.2002.1569.
 3. Pustovoitov P., Voronets O. Method for ensuring optimal routing with consideration of QoS and energy saving. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series of "Informatics and Modeling"*, 2025, Vol. 1, No. 1, pp. 64–79, doi: 10.20998/2411-0558.2025.01.05.
 4. 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. P. 23–31, doi: 10.15587/1729-4061.2024.299124.
 5. Sokol G. V., Kovda E. O. Method for detecting unauthorized nodes at the MAC level. *Scientific notes of the V. I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*, 2025, Vol. 36(75), No. 4, pp. 91–98, doi: 10.32782/2663-5941/2025.4.1/12.
 6. Del-Valle-Soto C., Mex-Perera C., Nolzco-Flores J. A., Velázquez R., Rossa-Sierra A. Wireless Sensor Network Energy Model and Its Use in the Optimization of Routing Protocols. *Energies*, 2020, Vol. 13, No. 3, pp. 728, doi: 10.3390/en13030728.
 7. Ali A., Abo-Zahhad M., Farrag M. Modeling of Wireless Sensor Networks with Minimum Energy Consumption. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2017, No. 42, pp. 2631–2639, doi: 10.1007/s13369-016-2281-5.
 8. Shayesteh Tabatabaei. New energy efficient management approach for wireless sensor networks in target tracking using Vortex Search Algorithm. *Heliyon*, 2025, Vol. 11, No. 5, pp. e42867, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42867.
 9. Savchenko M. V., Shyman M. V. Method for analyzing the load of mesh network cluster nodes based on the mathematical model of Jackson networks. *Control, navigation and communication systems*, 2025. No. 1, pp. 201–204, doi: 10.26906/SUNZ.2025.1.201-204.
 10. Lang G., Roueff F. Semi-parametric Estimation of the Hölder Exponent of a Stationary Gaussian Process with Minimax Rates. *Statistical Inference for Stochastic Processes*, 2021, Vol. 4, pp. 283–306, doi: 10.1023/A:1012227325436.
 11. Khattach O., Moussaoui O., Hassine M. End-to-End Architecture for Real-Time IoT Analytics and Predictive Maintenance Using Stream Processing and ML Pipelines. *Sensors*, 2025, Vol. 25, No. 9, pp. 2945, doi: 10.3390/s25092945.
 12. Rong Zhang, Minqi Zhou, Xueqing Gong, Xiaofeng He, Weining Qian, Shouke Qin, Aoying Zhou. Detecting anomaly in data stream by fractal model. *World Wide Web*, 2015, Vol. 18, pp. 1419–1441, doi: 10.1007/s11280-014-0296-y.

Відомості про авторів (About authors)

Воронець Олександр Миколайович – аспірант, кафедра «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0005-5714-2370; e-mail: oleksandr.voronets@infiz.khpi.edu.ua.

Oleksandr Voronets – Postgraduate Student, Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0005-5714-2370; e-mail: oleksandr.voronets@infiz.khpi.edu.ua.

Воронець Віталій Миколайович – доктор філософії, старший викладач кафедри «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7793-3824; e-mail: Vitalii.Voronets@khpi.edu.ua.

Vitalii Voronets – Doctor of Philosophy, Senior Lecturer the Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7793-3824; e-mail: Vitalii.Voronets@khpi.edu.ua.

Пустовойтов Павло Євгенович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3884-0200; e-mail: p.pustovoitov@gmail.com.

Pavlo Pustovoitov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3884-0200; e-mail: p.pustovoitov@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Воронець О. М., Воронець В. М., Пустовойтов П. Є. Фрактальний підхід до прогнозування критичних станів вузлів мережі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 4 (26). С. 17-23. doi:10.20998/2413-4295.2025.04.03.

Please cite this article as:

Voronets O., Voronets V., Pustovoitov P. Fractal approach to predicting critical states of network nodes. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 4(26), pp. 17-23, doi:10.20998/2413-4295.2025.04.03.

Надійшла (received) 01.11.2025

Прийнята (accepted) 22.12.2025