

УЗАГАЛЬНЕНИЙ МЕТОД СИНТЕЗУ ТЕСТІВ КОМПОНЕНТІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ШЛЮЗУ ВИСОКОЩІЛЬНОГО ІОТ

Володимир Панченко

Анотація. У роботі представлено розробку узагальненого методу синтезу діагностичних тестів для інтелектуальних шлюзів периферійного шару високощільного Інтернету речей (HDІoT). Запропоновано адаптивну архітектуру методу, що базується на поділі керуючої частини на блоки планувальника та диспетчера. Використання еволюційно-генетичних алгоритмів дозволяє оптимізувати повноту покриття несправностей при жорстких обмеженнях на час тестування. Метод забезпечує гнучкість при роботі з гетерогенними протоколами та компонентами Edge AI, що є критичним для надійності промислових систем.

Ключові слова: Інтернет речей; інтелектуальний шлюз; синтез тестів; еволюційні алгоритми; технічна діагностика.

I. ВСТУП

Стрімкий розвиток цифрової трансформації та перехід до концепцій Industry 4.0 та 5.0 зумовлюють фундаментальну зміну парадигми функціонування мережевих інфраструктур. Сучасний етап розвитку Інтернету речей (IoT) характеризується не лише кількісним зростанням підключених вузлів, яке у 2025 році перевищило 30 мільярдів одиниць [1], а й якісним ускладненням архітектурних рішень. Особливого значення набувають системи високощільного Інтернету речей (High-Density IoT, HDIoT), де концентрація пристроїв може сягати тисяч вузлів на квадратний кілометр, що створює безпрецедентне навантаження на канали зв'язку та вузли обробки даних.

У центрі таких екосистем знаходяться інтелектуальні граничні шлюзи (Intelligent Edge Intelligence Gateways). Вони виконують критичні функції агрегації даних, попередньої фільтрації, протокольної конвертації та запуску моделей штучного інтелекту безпосередньо на межі мережі (Edge AI), що є життєво необхідним для забезпечення латентності менше 10 мс у промислових сценаріях. Збільшення функціональної складності цих пристроїв призводить до експоненціального зростання простору станів, що робить традиційні методи діагностики та верифікації малоефективними або взагалі непридатними через проблему «вибуху станів» [2].

Технічна діагностика компонентів шлюзів у середовищі HDIoT стикається з викликами гетерогенності протоколів (BLE, Zigbee, LoRaWAN, NB-IoT), динамічною зміною топології та жорсткими вимогами до енергоефективності. Відмова граничного шлюзу загрожує каскадними збоями в мережі, де один вузол обслуговує тисячі сенсорів. Таким чином, розробка методів автоматизованого синтезу тестів, здатних адаптуватися до складної структури об'єкта діагностування, є першочерговим завданням забезпечення надійності сучасних кіберфізичних систем.

Еволюційно-генетичні алгоритми (ЕГА) на сьогодні визнані одним із найбільш перспективних інструментів для розв'язання складних комбінаторних задач оптимізації, до яких належить і синтез діагностичних тестів. Використання принципів природного відбору, мутації та рекомбінації дозволяє ЕГА ефективно досліджувати багатовимірні простори пошуку, знаходячи оптимальні рішення за прийнятний час [3]. Однак пряме застосування класичних генетичних алгоритмів до діагностики інтелектуальних шлюзів часто супроводжується передчасною збіжністю та втратою різноманітності популяції.

Дана робота спрямована на розробку узагальненого методу синтезу тестів, який базується на математичній формалізації процесів еволюції за допомогою теорії універсальних алгебр та теорії категорій. Такий підхід дозволяє об'єднати переваги різних

евристичних стратегій у єдину адаптивну систему, здатну динамічно реагувати на особливості об'єкта діагностування та поточну ефективність пошуку.

II. ДАНІ ТА МЕТОДИ

Розробка узагальненого методу вимагає створення математичного підґрунтя для перенесення алгоритмів еволюційно-популяційної генетики в область технічної діагностики цифрових пристроїв та шлюзів IoT.

Для уніфікації підходів до синтезу тестів використано апарат сучасної алгебри [4]. Кожен еволюційний метод описується парою універсальних алгебр: A_1 , що відповідає за формування окремих тестових векторів (хромосом), та A_2 , що описує механізми розвитку популяцій та селекції найкращих рішень. Формально це представляється як:

$$A_1(M_1, D_1), A_2(M_2, D_2) \quad (1)$$

де M_1 – множина допустимих вхідних впливів,

D_1 – сигнатура операцій над ними (мутація, інверсія, транслокація тощо).

Алгебра A_2 оперує множиною популяцій M_2 за допомогою операцій редукції та формування нових поколінь D_2 . Використання властивості гомоморфізму алгебр дозволяє формально переносити успішні алгоритми з однієї галузі в іншу, гарантуючи при цьому збереження логічної цілісності процесу синтезу.

Процес формування тестів можна розглядати не лише з позицій застосування теорії універсальних алгебр, отримання тестових наборів та тестових послідовностей можна описати також і за допомогою більш абстрактніших математичних об'єктів – категорій [5]. Якщо представити категорію $K_1 = (Ob K_1 Mor K_1)$, де $Ob K_1 = M_1$, а морфізми $Mor K_1$ – переходи між елементами M_1 , і аналогічним чином $K_2 = (Ob K_2 Mor K_2)$, де $Ob K_2 = M_1$, то наявність унівалентного функтора між категорією K_2 та K_1 математично доводить можливість застосування генетичних операторів для виявлення дефектів у складних системах.

На основі проведеного математичного обґрунтування було розроблено метод синтезу тестів компонентів шлюзів HDIoT, ключовою особливістю якого є поділ керуючої частини на два функціональні блоки: планувальник та диспетчер. Планувальник здійснює аналіз проміжних результатів синтезу (повноти покриття, швидкості виявлення нових несправностей) та приймає рішення про зміну стратегії пошуку. Диспетчер відповідає за технічну передачу даних між методами (частково побудований тест, матриця несправностей) та активацію відповідного структурного блоку.

Запропоновано чотири основні алгоритми дій планувальника для вибору структурних блоків:

- вибір на основі паралельної роботи – декілька методів працюють у режимі квантування часу, після чого обирається найефективніший для фінальної стадії;
- вибір за множиною ознак – метод відбирається на основі апріорних даних про об'єкт (кількість компонентів, складність топології);
- імовірнісний відбір – методи вибираються стохастично, але ймовірність вибору успішного методу динамічно зростає;
- випадковий вибір на період ефективної роботи – метод працює, доки забезпечує приріст повноти тесту, після чого активується планувальник.

Для підвищення ефективності пошуку розроблено адаптивну функцію пристосованості $\mu(a_{it})$, яка враховує не лише загальне покриття, а й динаміку процесу:

$$\mu(a_{it}) = k_N \times k_P \times k_C, \quad (2)$$

де k_N – коефіцієнт новизни (стимулює виявлення раніше не знайдених дефектів),
 k_P – ефект номера покоління (запобігає стагнації на пізніх етапах),
 k_C – здатність індивідуального набору до виявлення несправностей.

Особливе місце займає оператор мутації, ймовірність якого P_m регулюється адаптивно:

$$P_m(a_k^t) = \frac{1}{N_{in} \cdot \sqrt{1+\lambda}} \cdot \exp\left(-\frac{\mu(a_k^t)}{\mu_{max}}\right), \quad (3)$$

де N_{in} – кількість вхідних ліній,
 λ – коефіцієнт структурної складності.

Це дозволяє підтримувати високу інтенсивність пошуку при низькій пристосованості та стабілізувати «хороші» рішення при наближенні до оптимуму.

Також запропоновано використання оператора суміщеного кросовера, який поєднує класичну рекомбінацію з інверсією генів одного з батьків. Це забезпечує вихід із локальних екстремумів за рахунок генерації радикально нових вхідних комбінацій, що особливо важливо для діагностики асинхронних вузлів шлюзу.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ

Експериментальна частина дослідження базується на використанні імітаційної моделі, яка дозволяє моделювати процеси синтезу тестів для об'єктів різного ступеня складності.

Для кількісної оцінки ефективності розробленого методу проведено повний факторний експеримент типу 2^4 . Факторами виступали: кількість компонентів шлюзу (X_1), довжина тесту (X_2), ймовірність мутації (X_3) та кількість точок кросовера (X_4). Встановлено, що складність об'єкта діагностування (X_1) лінійно збільшує час синтезу, проте використання адаптивних популяцій (X_2) дозволяє компенсувати цей ріст.

На рівні всього інтелектуального шлюзу задачу діагностики зведено до синтезу оптимального пулу тестів, що покриває 18 функціональних компонентів (від драйверів LoRa до модулів Edge AI) [6]. Використання ЕГА дозволило сформувати набір з 8–12 комплексних тестів, що забезпечують 100 % покриття критичних вузлів при дотриманні ліміту часу T_{max} .

Як показано на Рисунку 1, динаміка покриття несправностей комплексним методом позбавлена «ефекту плато», що дозволяє впевнено досягати високих рівнів діагностичного покриття (>95 %).

При появі ситуації повної ідентичності генотипів у популяції планувальник ініціює зміну оператора кросовера з класичного на суміщений, що примусово вносить генетичну різноманітність та дозволяє виявляти раніше не знайдені несправності. Важливим результатом є підтвердження ефективності: у досліджах, де використовувався оператор суміщеного кросовера, повнота тесту зростала на 5–7 % швидше в умовах високої однорідності популяції.

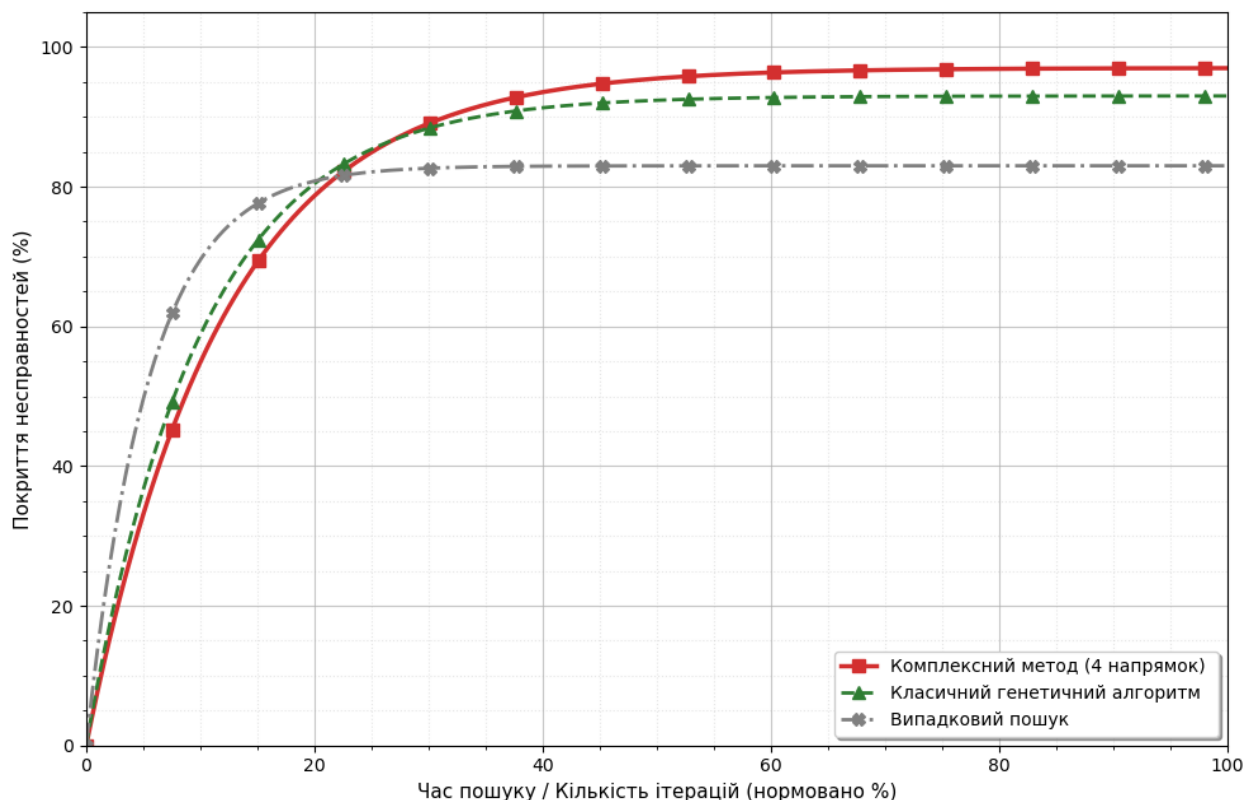


Рисунок 1. Динаміка зростання повноти покриття для різних методів

IV. ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Проведене дослідження демонструє, що інтелектуальні шлюзи периферійного шару HDIoT потребують нових підходів до технічної діагностики, які виходять за межі статичного аналізу логічних схем. Узагальнений еволюційний метод, побудований на принципах адаптивного керування пошуком, забезпечує необхідну гнучкість при роботі з гетерогенними та складними об'єктами.

Основні наукові та практичні висновки:

1. Формалізація процесу синтезу тестів за допомогою апарату універсальних алгебр та теорії категорій дозволила створити теоретичну базу для побудови комплексних еволюційних методів, що інтегрують переваги різних стратегій.
2. Розробка архітектури з «Планувальником» та «Диспетчером» забезпечує автоматичну адаптацію процесу синтезу до поточної динаміки виявлення несправностей, що мінімізує часові витрати на непродуктивні ітерації.
3. Запропонована модифікація генетичних операторів дозволяє ефективно вирішувати задачу синтезу компактних тестів для пристроїв із великим простором станів.
4. Експериментально підтверджено, що комплексний метод забезпечує повноту покриття 95–98 % для складних компонентів шлюзу при скороченні часу синтезу на 5–7 % порівняно з класичними генетичними алгоритмами.
5. Метод синтезу тестового пулу дозволяє оптимізувати процедури інтегрального тестування шлюзів у реальних умовах HDIoT, враховуючи обмеження на паралельне виконання тестів та час обслуговування.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні систем автоматизованого тестування та розробці засобів вбудованого самотестування для критично важливих вузлів інфраструктури Інтернету речей.

ДЖЕРЕЛА

1. Jain, S. *et al.* (2025), ‘A scientometric analysis of reviews on the internet of things’, *The Journal of Supercomputing*, 81(6). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07230-w>
2. Minani, J. B., Sabir, F., Moha, N., & Guéhéneuc, Y.-G. (2024), ‘A Systematic Review of IoT Systems Testing: Objectives, Approaches, Tools, and Challenges’, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 50(4), P. 785–815. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3363611>
3. Yousif, A., Bashir, M. B., & Ali, A. (2024), ‘An Evolutionary Algorithm for Task Clustering and Scheduling in IoT Edge Computing’, *Mathematics*, 12(2), 281. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12020281>
4. Sampathkumar, B., Das, R., Martin, B., Enescu, F., & Kalla, P. (2025), ‘An Algebraic Approach to Partial Synthesis of Arithmetic Circuits’, *Proceedings of the 30th Asia and South Pacific Design Automation Conference*, P. 1097–1103. DOI: <https://doi.org/10.1145/3658617.3697724>
5. Jia, Y., Peng, G., Yang, Z., & Chen, T. (2025), ‘Category-Theoretical and Topos-Theoretical Frameworks in Machine Learning: A Survey’, *Axioms*, 14(3), 204. DOI: <https://doi.org/10.3390/axioms14030204>
6. Panchenko, V., Kuchuk, H., Noskov, V., Leonov, S., & Lipchanska, O. (2026), ‘Method of Test Pool Synthesis for an Intelligent High-Density IoT Edge-Layer Gateway’, *Advanced Information Systems*, 10(1), P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.06>
7. Главчев М.І., Главчев Д.М., Панченко В.І. БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ DDOS-АТАКАМ. Системи обробки інформації. 2025. № 4(183). С. 7-14. <https://doi.org/10.30748/soi.2025.183.01>.
8. Катунін, А., Коломійцев, О., Кулаков, О., Панченко, В., Олійник, Р. і Кожушко, М. (2025) «МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТРУМОВІДНИХ ЖИЛ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІЗОЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРОВОДУ», Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, (3(25), с. 109-117. doi: 10.37701/dndivsovt.25.2025.14.



ВОЛОДИМИР ПАНЧЕНКО

старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ORCID: 0000-0003-3364-3398

E-mail: volodymyr.panchenko@khpі.edu.ua

Працює з 1995 року в НТУ «ХПІ». Досвід викладання в ЗВО більше 25 років. Має понад 120 наукових та навчально-методичних праць, зокрема за останні 5 років – 5 навчальних посібників, 4 публікації в Scopus/WoS.

Наукові інтереси – системне програмне забезпечення, операційні системи.