УДК 004.71

ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ РОЗПОДІЛЕНИХ IOT-СИСТЕМ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ МОДУЛЯРНОЇ АРИФМЕТИКИ

Ковальчук Д.М., PhD (комп'ютерні науки)[1]
[1] Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
[1] Україна, Харків
[1] ORCID 0000-0002-8229-836X

Анотація. *У роботі досліджено можливості застосування модулярної арифметики для підвищення відмовостійкості розподілених IoT-систем. Розглянуто особливості використання системи залишкових класів, зокрема надлишкових модулів для виявлення, локалізації та корекції помилок під час обробки й передавання інформації. Обґрунтовано переваги паралельної обробки даних та інтеграції СЗК у периферійні обчислювальні вузли. Запропонований підхід може бути використаний під час проєктування автономних сенсорних мереж і розподілених IoT-інфраструктур для підвищення достовірності інформаційного обміну та стійкості до відмов.*
Ключові слова: *система залишкових класів; модулярна арифметика; відмовостійкість; розподілені IoT-системи; корекція помилок.*

Вступ. Сучасний розвиток інформаційних технологій характеризується активним впровадженням розподілених систем Інтернету речей (IoT), які забезпечують автоматизований збір, обробку та передавання інформації між великою кількістю взаємопов'язаних пристроїв. Такі системи широко використовуються у промисловій автоматизації, сільському господарстві, транспортній інфраструктурі, енергетиці та системах моніторингу. Проте зі збільшенням кількості підключених пристроїв зростає ймовірність виникнення апаратних відмов, порушень зв'язку, пошкодження даних та збоїв під час обчислень [1].

Особливої актуальності проблема відмовостійкості набуває для автономних IoT-систем, у яких кінцеві пристрої функціонують у важкодоступних місцях, мають обмежені обчислювальні ресурси та не завжди можуть отримувати оперативне технічне обслуговування. Традиційні методи забезпечення надійності, зокрема резервування компонентів, контрольні суми та повторне передавання пакетів, потребують додаткових ресурсів і можуть збільшувати енергоспоживання та затримки обробки інформації [2].

Перспективним напрямом вирішення зазначених проблем є використання системи залишкових класів (СЗК), яка ґрунтується на принципах модулярної арифметики. Її основною перевагою є можливість незалежного виконання арифметичних операцій за окремими модулями, що забезпечує паралельну обробку даних і локалізацію помилок. Додаткове використання надлишкових модулів дозволяє виявляти та виправляти спотворення інформації без необхідності повного повторного передавання даних [2, 3].

Метою роботи є дослідження можливостей використання модулярної арифметики для підвищення відмовостійкості розподілених IoT-систем шляхом забезпечення паралельної обробки інформації, виявлення та корекції помилок.

Основна частина. Архітектура сучасних IoT-систем передбачає взаємодію великої кількості автономних пристроїв, які виконують функції збору, обробки та передавання інформації. Типова інфраструктура включає сенсорні вузли, периферійні шлюзи, сервери

обробки даних і хмарні платформи. Така структура забезпечує масштабованість системи, однак одночасно збільшує кількість потенційних точок відмови [3].

Основними причинами порушення працездатності є апаратні несправності кінцевих пристроїв, нестабільність каналів зв'язку, помилки обробки інформації та перебої електроживлення. Відмова окремого вузла може призвести до втрати частини інформаційного потоку або порушення взаємодії між компонентами системи.

Використання традиційних механізмів резервування та контролю цілісності не завжди є ефективним для пристроїв із обмеженими обчислювальними ресурсами. Зокрема, повторне передавання пошкоджених пакетів збільшує навантаження на мережу, а дублювання обчислювальних процесів потребує додаткових апаратних ресурсів [3, 4].

У зв'язку з цим виникає необхідність застосування альтернативних математичних підходів, які дозволяють підвищити достовірність обробки інформації без суттєвого ускладнення архітектури IoT-систем. Одним із таких підходів є використання модулярної арифметики на основі системи залишкових класів.

Наукова основа запропонованого підходу полягає у використанні непозиційного представлення чисел, за якого кожне значення розкладається на набір залишків за системою взаємно простих модулів. Такий спосіб представлення інформації дозволяє виконувати арифметичні операції незалежно в кожному модульному каналі [3 – 5].

Нехай задано систему взаємно простих модулів $M = \{m_1, m_2, \ldots, m_n\}$. Тоді ціле число X представляється набором залишків $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, де кожен залишок визначається виразом $x_i = X \bmod m_i$. Динамічний діапазон системи визначається добутком інформаційних модулів $M_0 = \prod_{i=1}^{n} m_i$.

Основною перевагою СЗК є відсутність міжрозрядних переносів під час виконання операцій додавання, віднімання та множення. Результат кожної операції визначається незалежно для відповідного модуля. Це створює передумови для паралельної обробки інформації на декількох обчислювальних вузлах і зменшує залежність результатів обчислень від окремих модульних компонентів.

Особливе значення для підвищення відмовостійкості має використання надлишкової системи залишкових класів. Її принцип полягає у введенні додаткових контрольних модулів, які забезпечують перевірку правильності сформованого модулярного представлення. У такому випадку система набуває вигляду $M = \{m_1, m_2, \ldots, m_n, m_{n+1}, \ldots, m_{n+k}\}$, де перші n модулів є інформаційними, а наступні k – контрольними.

Наявність додаткових модулів дозволяє виявляти пошкоджені залишки, локалізувати помилки та за відповідних умов відновлювати початкові значення. Для класичної моделі надлишкової СЗК k контрольних модулів дозволяють виявляти до k помилкових залишків або виправляти до $\lfloor k/2 \rfloor$ помилкових залишків за умови виконання відповідних вимог до системи модулів.

Таким чином, використання надлишкових модулів дозволяє реалізувати додатковий рівень контролю цілісності інформації без необхідності повного дублювання обчислювальних процесів.

Запропонований підхід передбачає інтеграцію модулярної арифметики на рівні кінцевих пристроїв і периферійних обчислювальних вузлів. Сенсорні пристрої здійснюють збір первинної інформації, її попередню обробку та перетворення у модулярне

представлення. Після цього сформовані залишки передаються до периферійного шлюзу, який виконує перевірку їхньої цілісності та виявлення можливих спотворень.

Наступний рівень представлений розподіленими обчислювальними вузлами, які забезпечують обробку інформації та відновлення пошкоджених значень. Використання незалежних модульних каналів дозволяє розподіляти обчислювальне навантаження між декількома пристроями, зменшуючи залежність системи від централізованої обробки.

У разі виявлення помилки система може виконати корекцію пошкоджених даних за допомогою контрольних модулів або ініціювати повторне отримання інформації, якщо наявної надлишковості недостатньо. Важливо зазначити, що для компенсації фізичного виходу з ладу цілого пристрою необхідно додатково передбачати резервування вузлів та каналів зв'язку.

Інтеграція СЗК із технологіями периферійних обчислень (Edge Computing) дозволяє здійснювати перевірку та відновлення інформації без постійного звернення до центрального сервера. Це підвищує автономність функціонування IoT-інфраструктури та забезпечує додаткову стійкість до тимчасових порушень мережевого з'єднання.

Застосування модулярної арифметики забезпечує декілька важливих переваг для розподілених IoT-систем. Незалежність модульних каналів дозволяє локалізувати помилки та запобігати їх поширенню на весь обчислювальний процес. Використання надлишкових модулів забезпечує можливість виявлення та корекції пошкоджених даних без обов'язкового повторного передавання інформації. Паралельне виконання арифметичних операцій створює передумови для підвищення продуктивності обчислювальних вузлів.

Окрім цього, використання СЗК дозволяє реалізувати розподілену обробку інформації без надмірної залежності від централізованих ресурсів. Це має особливе значення для автономних систем моніторингу, промислових сенсорних мереж та інфраструктури критичного призначення.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує перспективність використання модулярної арифметики для підвищення відмовостійкості розподілених IoT-систем. Застосування системи залишкових класів забезпечує незалежність модульних каналів, що дозволяє локалізувати помилки та зменшити ризик їх поширення під час обробки інформації. Використання надлишкових модулів створює можливість виявлення та корекції пошкоджених залишків без обов'язкового повторного передавання даних, підвищуючи достовірність інформаційного обміну. Водночас паралельне виконання арифметичних операцій за окремими модулями дозволяє розподіляти обчислювальне навантаження між незалежними вузлами та зменшувати залежність системи від централізованої інфраструктури. Можливість регулювання кількості контрольних модулів залежно від вимог до надійності створює передумови для побудови адаптивних IoT-систем із різними рівнями відмовостійкості. Таким чином, модулярна арифметика може стати основою додаткового механізму забезпечення цілісності та достовірності інформації в розподілених обчислювальних середовищах. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка адаптивних алгоритмів розподілу модульних компонентів між незалежними IoT-вузлами, які забезпечуватимуть автоматичне виявлення відмов, реконфігурацію обчислювальної структури та відновлення інформаційних потоків без зупинки функціонування всієї системи.

Використання інструментів ШІ. Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи**.**

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Чугреєв, К., & Волощук, О. (2025). Метод прогнозування збоїв для мереж Інтернету речей за допомогою машинного навчання. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка,* 3(31), 752–761. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1072

[2] Yanko, A., Krasnobayev, V., & Martynenko, A. (2023). Influence of the number system in residual classes on the fault tolerance of the computer system. *Radioelectronic and Computer Systems,* (3), 159–172. https://doi.org/10.32620/reks.2023.3.13

[3] Ковальчук, Д. (2025). Концепція побудови високопродуктивних систем реального часу з використанням системи залишкових класів. *Інформаційні технології та суспільство,* 3(18), 77–82. https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.3.10

[4] Янко, А. С., Глушко, А. Д., Крук, О. І., & Прокудін, А. Ю. (2024). Підвищення ефективності процесу корекції даних у системі залишкових класів. *Системи управління, навігації та зв'язку,* 4(78), 169–175. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.169

[5] Янко, А. С., & Крук, О. І. (2026). Метод прискореної реалізації модульних операцій у спеціалізованих комп'ютерних засобах на основі реверсивного кільцевого зсуву. *Системи управління, навігації та зв'язку, 2.* https://doi.org/10.26906/SUNZ.2026.2.189

Kovalchuk D. M.

Enhancing the Fault Tolerance of Distributed IoT Systems through the Use of Modular Arithmetic

Abstract. *This paper investigates the application of modular arithmetic to enhance the fault tolerance of distributed IoT systems. It examines the use of the Residue Number System (RNS)–specifically, the incorporation of redundant moduli–for the detection, localization, and correction of errors during information processing and transmission. The advantages of parallel data processing and the integration of RNS into edge computing nodes are substantiated. The proposed approach can be utilized in the design of autonomous sensor networks and distributed IoT infrastructures to improve the reliability of data exchange and overall fault tolerance.*

Keywords: *Residue Number System; modular arithmetic; fault tolerance; distributed IoT systems; error correction.*