

ОСАДЧУК Олександр  
Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>  
ЗАВАЛЬНІЮК Максим  
Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0009-0009-2387-4476>

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ СИГНАЛІВ ЧАСТОТНИХ СЕНСОРІВ У ВУЗЛАХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ

У статті розглянуто та запропоновано підхід до вирішення задачі підвищення точності вимірювання та зниження енергоспоживання у вузлах безпроводних сенсорних мереж (БСМ), що використовують первинні перетворювачі з частотним вихідним сигналом. Традиційні підходи до інтеграції БСМ із хмарними платформами (Sensor-Cloud) стикаються з проблемою обмеженого енергетичного бюджету автономних вузлів. Використання частотних сенсорів дозволяє виключити з тракту обробки енергоємні аналого-цифрові перетворювачі, однак висуває специфічні вимоги до алгоритмів вимірювання частоти на стороні мікроконтролера. Встановлено, що класичний метод безпосереднього рахунку частоти є неефективним для низькочастотних сигналів, оскільки вимагає тривалого часу активності процесора, що призводить до пропорційного (лінійного) зростання енергоспоживання та вносить недопустимі затримки у передачу даних. Для вирішення цієї проблеми обґрунтовано доцільність застосування методу вимірювання періоду (зворотного рахунку) у поєднанні з алгоритмами периферійних обчислень (Edge Computing). Запропоновано використання простої лінійної регресії (методу найменших квадратів) для обробки масиву часових міток фронтів сигналу безпосередньо на мікроконтролері. Це дозволяє суттєво знизити вплив фазового джитеру та апаратних шумів компаратора на загальну похибку квантування без необхідності збільшення часу вимірювання. Проведено математичне та імітаційне моделювання запропонованих алгоритмів у середовищі Python. Показано, що регресійна оцінка частоти зменшує дисперсію похибки обернено пропорційно кореню квадратному з кількості вибірок, забезпечуючи стабільну роздільну здатність у широкому діапазоні частот. Додатково проаналізовано вплив обраного методу вимірювання на загальний енергетичний баланс вузла при використанні легких прикладних протоколів передачі даних (MQTT-SN та CoAP). Встановлено, що перенесення обчислювального навантаження на сенсорний вузол (агрегація даних) та використання подієво-орієнтованої моделі відправки повідомлень дозволяє багаторазово зменшити обсяг переданого радіотрафіку. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні автономних інформаційно-вимірювальних систем тривалого функціонування.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, частотний сенсор, метод зворотного рахунку, фазовий джитер, лінійна регресія, енергоефективність, периферійні обчислення.

OSADCHUK Oleksandr, ZAVALNIUK Maksym  
Vinnytsia National Technical University

## IMPROVING THE ACCURACY AND ENERGY EFFICIENCY OF FREQUENCY SENSOR SIGNAL MEASUREMENTS IN WIRELESS NETWORK NODES

The article addresses the actual scientific and applied problem of improving measurement accuracy and reducing power consumption in wireless sensor network (WSN) nodes that use primary transducers with a frequency output signal. Traditional approaches to integrating WSNs with cloud platforms under the Sensor-Cloud concept face the challenge of a strictly limited energy budget of autonomous edge nodes, which restricts their operational lifetime. The use of frequency sensors makes it possible to eliminate power-consuming analog-to-digital converters from the signal processing pipeline; however, it imposes specific and non-trivial requirements on the frequency measurement algorithms implemented on the microcontroller side. It has been proven that the classical direct frequency counting method is highly inefficient for low-frequency signals, since it requires extended processor active time proportional to the measurement gate interval, which leads to a linear increase in energy consumption and introduces unacceptable latency in data transmission to the gateway. To overcome this fundamental limitation, the expediency of applying the reciprocal counting method (period measurement) combined with Edge Computing algorithms is rigorously justified. The use of simple linear regression — the ordinary least squares method — for processing an array of signal edge timestamps directly on the microcontroller is proposed as the core algorithmic contribution. This approach significantly reduces the impact of phase jitter and comparator hardware noise on the overall quantization error without the need to increase the measurement time window. Mathematical analysis and simulation modelling of the proposed algorithms were carried out in the Python environment with AWGN jitter model ( $\sigma = 5 \mu\text{s}$ ). It is demonstrated that the regression-based frequency estimator reduces the error variance inversely proportionally to the square root of the number of processed samples, thereby providing stable and predictable resolution across a wide operating frequency range of the sensor. Additionally, the impact of the selected measurement method on the overall energy balance of the node is analysed when using lightweight IoT application-layer data transfer protocols such as MQTT-SN and CoAP. It has been established that shifting the computational load to the sensor node through local data aggregation and adopting an event-driven message delivery model makes it possible to reduce the volume of transmitted radio traffic by a factor of  $N$ , where  $N$  is the number of processed edges. The results of the study can be used in the design of energy-efficient and highly autonomous information-measuring systems intended for long-term unattended operation in IoT and Sensor-Cloud deployments.

Key words: wireless sensor network, frequency sensor, reciprocal counting method, phase jitter, linear regression, energy efficiency, edge computing.



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

Сучасний етап розвитку Інтернету речей (IoT) та безпроводних сенсорних мереж (БСМ) вимагає створення автономних вимірювальних вузлів, здатних працювати від одного джерела живлення роками. Інтеграція таких мереж із хмарними платформами (концепція Sensor-Cloud) розширює можливості аналітики, але створює "пляшкове горлечко" в питаннях енергоспоживання під час збору та передачі даних. Використання сенсорів фізичних величин із частотним вихідним сигналом є одним із найперспективніших шляхів вирішення цієї проблеми. Інформативним параметром у них є частота (або період), що забезпечує високу завадостійкість та дозволяє відмовитися від використання енергоємних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), підключаючи сенсор безпосередньо до цифрових таймерів мікроконтролера. Проте загальна якість вимірювань та енергоспоживання вузла критично залежать від обраного програмного методу оцінки частоти та політики передачі даних. Традиційні алгоритми вимагають тривалого часу активності процесора для досягнення прийнятної точності, що зводить нанівещь апаратні переваги частотних сенсорів. Отже, виникає науково-практична проблема пошуку компромісу між точністю квантування частоти та енергетичними витратами на її обчислення і подальшу передачу в мережу.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Теоретичні аспекти побудови мікроелектронних частотних перетворювачів, зокрема на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, ґрунтовно досліджені у працях вітчизняних науковців [1]. Такі сенсори характеризуються високою чутливістю та технологічністю. У світовій практиці питання інтеграції БСМ з хмарними технологіями активно досліджуються в контексті глобальних архітектур Інтернету речей [2, 3]. Зокрема, у роботах, присвячених Sensor-Cloud системам [4], доведено перевагу локальної обробки даних на граничних вузлах перед безпосередньою передачею "сирих" вимірювань. Дослідження протоколів прикладного рівня (MQTT-SN, CoAP) показують їх високу ефективність для обмежених пристроїв [5], однак ці роботи рідко враховують специфіку саме частотних сигналів, де сам процес вимірювання є розтягнутим у часі. Недостатньо дослідженим залишається питання оптимізації алгоритмів вимірювання періоду на малопотужних мікроконтролерах за умов наявності апаратного джитеру в концепції периферійних обчислень (Edge Computing) [6].

## ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є розроблення та математичне обґрунтування енергоефективного алгоритму вимірювання сигналів частотних сенсорів у вузлах БСМ на основі методу зворотного рахунку та лінійної регресії, а також оцінка ефективності цього алгоритму за допомогою імітаційного моделювання для мінімізації енергоспоживання вузла при передачі даних до хмарної платформи.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Процес інтеграції частотних сенсорів у вузли безпроводних сенсорних мереж вимагає перетворення неперервного частотного сигналу в цифровий код. Це завдання традиційно виконується за допомогою вбудованих апаратних таймерів-лічильників мікроконтролера. Проте, вибір алгоритму обчислення безпосередньо впливає не лише на метрологічні характеристики (точність), але й на енергоспоживання пристрою.

Теоретичні основи методів вимірювання частоти. Існує два базових підходи до цифрового вимірювання частоти. Перший – метод безпосереднього (прямого) рахунку (Direct Counting). Суть методу полягає у підрахунку кількості цілих імпульсів  $N_x$  вхідного сигналу частотою  $f_x$  за фіксований, наперед заданий інтервал часу стробування  $T_{gate}$ . Тоді оцінка частоти визначається за формулою:

$$\hat{f}_{direct} = \frac{N_x}{T_{gate}} \quad (1)$$

Оскільки мікроконтролер фіксує лише цілі імпульси, виникає абсолютна похибка квантування, яка може становити  $\pm 1$  імпульс. Відповідно, відносна похибка квантування для методу прямого рахунку дорівнює  $\delta_{direct} \approx \frac{1}{(f_x \cdot T_{gate})}$ . Аналіз цієї формули показує її головний недолік у контексті БСМ: для забезпечення прийнятної точності при роботі з низькочастотними сенсорами час вимірювання  $T_{gate}$  повинен складати секунди. Протягом усього цього часу процесорне ядро не може перейти в режим глибокого сну (Deep Sleep), що призводить до швидкого виснаження батареї.

Другий підхід – метод вимірювання періоду або зворотний рахунок (Reciprocal Counting). У цьому випадку вимірюється не кількість імпульсів за фіксований час, а час  $T_{meas}$ , за який проходить наперед задана

кількість періодів  $N_x$  вхідного сигналу. Вимірювання часу здійснюється шляхом підрахунку імпульсів внутрішнього високочастотного опорного генератора мікроконтролера  $f_{ref}$ . Оцінка частоти обчислюється як:

$$\hat{f}_{rec} = \frac{N_x}{T_{meas}} = \frac{N_x \cdot f_{ref}}{N_{ref}} \quad (2)$$

де  $N_{ref}$  - кількість імпульсів опорного генератора. Відносна похибка квантування для методу зворотного рахунку визначається переважно частотою опорного генератора  $\delta_{rec} \approx 1/(f_{ref} \cdot T_{meas})$ .

Алгоритм регресійної оцінки частоти. На практиці ідеальних умов не існує. Сигнали з реальних мікроелектронних частотних сенсорів завжди містять апаратні шуми. При проходженні сигналу через аналоговий компаратор мікроконтролера ці шуми трансформуються у фазовий джитер (похибку визначення моменту переходу через нуль). Для мінімізації впливу фазового джитеру без необхідності надмірного збільшення часу вимірювання  $T_{meas}$ , пропонується алгоритм на основі лінійної регресії. Мікроконтролер за допомогою підсистеми захоплення (Input Capture) фіксує масив часових міток  $t_i$  для кожного  $i$ -го фронту вхідного сигналу. Теоретично, залежність часу від номера імпульсу є строго лінійною:

$$t_i \approx a \cdot i + b \quad (3)$$

де  $a$  - оцінка істинного періоду сигналу,  $b$  - початкова фаза (зміщення).

Застосовуючи метод найменших квадратів (МНК) до накопиченого масиву міток безпосередньо на обчислювальному ядрі сенсорного вузла, знаходиться оптимальне значення коефіцієнта  $a$ , після чого скоригована частота визначається як  $\hat{f}_{reg} = 1/a$ . Такий алгоритм дозволяє ефективно усереднити некорельований часовий шум. Згідно з теорією статистичної обробки, похибка вимірювання при цьому зменшується пропорційно  $1/\sqrt{N}$ , де  $N$  - кількість оброблених фронтів.

Розглянемо задачу оцінювання параметрів лінійної моделі (3) за наявності адитивного шуму. Нехай зафіксовано масив із  $N$  часових міток  $\{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ , де кожна мітка містить випадкову складову  $\varepsilon_i$ :

$$t_i = a \cdot i + b + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

де  $\varepsilon_i$  — незалежні однаково розподілені випадкові величини з нульовим математичним сподіванням  $M[\varepsilon_i] = 0$  та дисперсією  $D[\varepsilon_i] = \sigma^2$ . Застосовуючи МНК, мінімізуємо суму квадратів відхилень:

$$S(a, b) = \sum (t_i - a \cdot i - b)^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

Прирівнюючи часткові похідні  $\partial S/\partial a$  та  $\partial S/\partial b$  до нуля, отримуємо систему нормальних рівнянь. Її розв'язок дає незміщену оцінку коефіцієнта  $a$  (істинного періоду сигналу):

$$\hat{a} = (N \cdot \sum i \cdot t_i - \sum i \cdot \sum t_i) / (N \cdot \sum i^2 - (\sum i)^2) \quad (6)$$

Оскільки суми  $\sum i = N(N+1)/2$  та  $\sum i^2 = N(N+1)(2N+1)/6$  є детермінованими, дисперсія оцінки  $\hat{a}$  визначається лише через дисперсію шуму  $\sigma^2$ :

$$D[\hat{a}] = 12\sigma^2/(N(N^2-1)) \quad (7)$$

Звідси середньоквадратична похибка оцінки істинного періоду:

$$\sigma_{\hat{a}} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{12}{N(N^2-1)}} \approx \frac{2\sqrt{3} \cdot \sigma}{N^{(3/2)}} \text{ при } N \gg 1 \quad (8)$$

Оскільки оцінювана частота  $\hat{f}_{reg} = 1/a$ , а відносна похибка частоти за малих відхилень дорівнює відносній похибці оцінки періоду, отримуємо:

$$\delta_{reg} \approx \sigma_{\hat{a}} / a = (2\sqrt{3} \cdot \sigma \cdot f_x) / N^{(3/2)} \quad (9)$$

Цей вираз кількісно підтверджує дві ключові властивості запропонованого алгоритму. По-перше, похибка зменшується пропорційно  $N^{(3/2)}$ , що є суттєво швидшою збіжністю порівняно з простим усередненням одиничних вимірювань (де похибка спадає лише як  $1/\sqrt{N}$ ). По-друге, точність алгоритму залежить від абсолютного рівня джитеру та вимірюваної частоти, але не від частоти опорного генератора, що

принципово відрізняє регресійний метод від базового методу зворотного рахунку. Таким чином, для заданого рівня похибки  $\delta$  необхідна кількість оброблених фронтів визначається як:

$$N_{min} = \sqrt[3]{12\sigma^2 f_x^2 / \delta^2} \quad (10)$$

Ця формула дозволяє адаптивно обирати розмір вибірки залежно від поточної частоти сенсора та метрологічних вимог системи, що є важливою перевагою при реалізації на мікроконтролері з обмеженим ресурсом RAM.

Для практичної реалізації запропонованого методу необхідно розглянути апаратну архітектуру вузла БСМ. Перехід від концепції централізованої обробки (Cloud Computing) до периферійної (Edge Computing) вимагає наявності відповідних апаратних модулів безпосередньо на сенсорі. Узагальнену структурну схему розробленого енергоефективного вузла представлено на рис. 1.

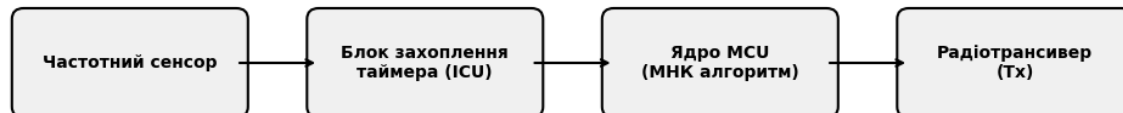


Рис. 1. Структурна схема енергоефективного сенсорного вузла з частотним виходом

Як видно зі структурної схеми, частотний сигнал із первинного перетворювача надходить безпосередньо на вхід блоку захоплення (Input Capture Unit) мікроконтролера. Використання апаратних переривань дозволяє ядру процесора (CPU) перебувати в режимі енергозбереження між фронтами сигналу. Після накопичення заданого масиву часових міток  $N$  мікроконтролер "прокидається", виконує розрахунок коефіцієнта  $a$  за алгоритмом лінійної регресії, формує пакет даних і передає його через радіотрансивер до шлюзу.

Щоб кількісно оцінити переваги такого архітектурного рішення, скористаємося загальноприйнятою "Радіомоделлю першого порядку" (First Order Radio Model) [7]. Згідно з цією моделлю, загальне енергоспоживання вузла  $E_{total}$  складається з енергії на роботу сенсора  $E_{sens}$ , енергії на математичну обробку мікроконтролером  $E_{proc}$  та енергії комунікації  $E_{comm}$ :

$$E_{total} = E_{sens} + E_{proc} + E_{comm} \quad (11)$$

Оскільки енергоспоживання радіотракту є домінуючим, розглянемо його детальніше. Енергія, необхідна для передачі пакету даних довжиною  $k$  біт на відстань  $d$ , визначається сумою енергії на роботу електронних схем трансивера  $E_{elec}$  та енергії підсилювача потужності  $E_{amp}$ :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \cdot k + \epsilon_{amp} \cdot k \cdot d^\alpha \quad (12)$$

де  $\epsilon_{amp}$  - коефіцієнт підсилення, який залежить від моделі поширення радіохвиль;  $\alpha$  - показник втрат на трасі ( $\alpha = 2$  для моделі вільного простору). Енергія на прийом пакету становить  $E_{Rx}(k) = E_{elec} \cdot k$ .

Аналіз моделі передачі показує, що витрати енергії прямо пропорційні довжині переданого повідомлення  $k$ . У традиційному підході (пряме передавання "сирих" даних) вузол повинен відправити масив з  $N$  часових міток, кожна з яких займає 4 байти (32 біти), плюс службові заголовки протоколу  $k_{hdr}$ . Тоді довжина корисного навантаження становить  $k_{data} = N \cdot 32$ .

При використанні запропонованого алгоритму регресії на стороні вузла (Edge Computing), масив з  $N$  міток згортається в одне розраховане значення частоти (тип float, 32 біти). Отже, довжина пакету скорочується в  $N$  разів. Ураховуючи, що  $E_{proc}$  (енергія на кілька операцій множення і додавання в МНК) на кілька порядків (залежно від апаратної платформи) менша за  $E_{Tx}$  для відправки одного байта по радіоканалу [8], загальний енергетичний баланс вузла покращується пропорційно зменшенню обсягу даних. Це обґрунтовує високу ефективність застосування регресійних алгоритмів саме на мікроконтролері до моменту передачі даних у мережу.

Методика та результати імітаційного моделювання. Оскільки метою роботи є дослідження алгоритмічної ефективності методів вимірювання на програмному рівні, експериментальна частина була реалізована у вигляді комп'ютерної імітаційної моделі (на базі мови програмування Python). Розроблена модель імітує роботу апаратного таймера мікроконтролера з тактовою частотою  $f_{ref} = 10$  МГц. Програмний блок генерації формує ідеальну послідовність часових міток фронтів, до яких додається адитивний білий гаусівський шум (AWGN) із середньоквадратичним відхиленням  $\sigma = 5$  мкс, що використовується як модель для апроксимації теплових шумів компаратора. На першому етапі було проведено моделювання теоретичної

похибки квантування обох методів у діапазоні частот сенсора від 10 Гц до 100 кГц при часі вікна вимірювання  $T_{gate} = 1$  с (без урахування шумів). Результати симуляції наведено на рис. 2.

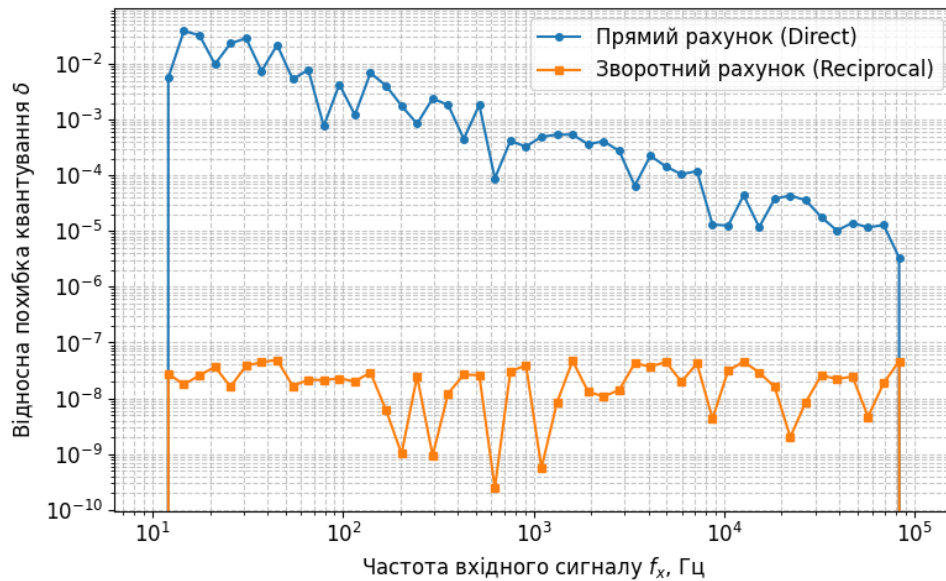


Рис. 2. Залежність відносної похибки квантування від частоти вхідного сигналу (результати імітаційного моделювання)

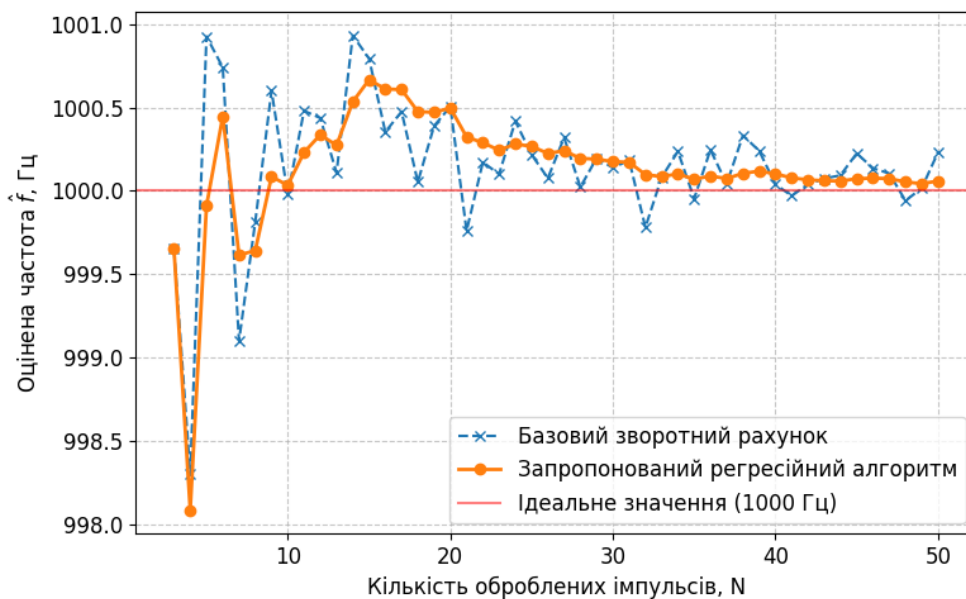


Рис. 3. Динаміка збіжності оцінки частоти в умовах фазового джитеру

Як видно з графіків на рис. 2, метод прямого рахунку (синя крива) є неефективним для низькочастотних сигналів через дискретність рахунку. Натомість метод зворотного рахунку (помаранчева крива) забезпечує стабільно низьку похибку (на рівні  $10^{-7}$ ) у всьому досліджуваному діапазоні.

Для перевірки ефективності регресійного алгоритму було проведено другий етап моделювання. Генерувався сигнал номінальною частотою 1000 Гц із додаванням джитеру. Результати збіжності оцінки частоти залежно від кількості оброблених імпульсів наведено на рис. 3.

Як свідчать результати моделювання (рис. 3), базовий метод зворотного рахунку демонструє значну дисперсію оцінки через високу чутливість до джитеру на одиничних фронтах. Натомість застосування лінійної регресії дозволяє швидко компенсувати флуктуації: вже після обробки 15–20 імпульсів оцінка частоти стабілізується поблизу істинного значення.

Вплив на енергоефективність мережі. Запропонований алгоритмічний підхід має пряме відношення до енергоефективності БСМ. Реалізація регресійних обчислень на стороні мікроконтролера є класичним прикладом концепції Edge Computing (периферійних обчислень). Замість того, щоб передавати по радіоканалу високочастотний потік масиву "сирих" часових міток для подальшої обробки на сервері, вузол виконує



локальну математичну агрегацію і передає в мережу лише одне високоточне значення частоти. Враховуючи, що енергія на передачу 1 біта радіотрансивером набагато перевищує енергію на виконання математичної операції ядром процесора, такий підхід значно зменшує енергетичний бюджет транзакції. У поєднанні з використанням легковагових IoT-протоколів (MQTT-SN або CoAP з механізмом Observe), вузол здатен швидко провести точне вимірювання, відправити короткий пакет даних та перейти в режим глибокого сну.

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

#### І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У даній роботі вирішено актуальну задачу підвищення точності вимірювання та зниження енергоспоживання вузлів безпроводних сенсорних мереж на базі частотних первинних перетворювачів.

З аналізу випливає, що для застосування в автономних пристроях метод зворотного рахунку має фундаментальні переваги перед методом прямого рахунку, оскільки менше залежить від частоти сенсора.

Запропоновано та математично обґрунтовано регресійний алгоритм обробки часових міток. Шляхом імітаційного моделювання підтверджено, що застосування лінійної регресії дозволяє ефективно компенсувати апаратний фазовий джитер та зменшити дисперсію результату в кілька разів порівняно з базовими методами.

Показано, що перенесення математичної обробки на рівень сенсорного вузла (Edge Computing) дозволяє суттєво зменшити обсяг переданого радіотрафіку, що оптимізує енергетичний баланс пристрою та робить запропонований метод ідеальним для інтеграції частотних сенсорів у сучасні платформи Sensor-Cloud.

Перспективи подальших досліджень полягають у апаратній верифікації запропонованих алгоритмів на реальній платформі мікроконтролера (зокрема, на базі STM32 або ESP32) із підключенням реального частотного сенсора, а також у дослідженні адаптивних стратегій вибору розміру вибірки  $N$  залежно від поточного рівня шуму та вимог до точності вимірювання в умовах динамічного середовища БСМ.

#### Література

1. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Осадчук Я. О. Дослідження автогенераторних параметричних оптичних сенсорів. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Том 33 (72), № 3. С. 106–114. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/17>
2. Stankovic J. A. Research directions for the internet of things. IEEE Internet of Things Journal. 2014. Vol. 1, No. 1. P. 3–9.
3. Hang L., Jin W., Yoon H., Hong Y. G., Kim D. H. Design and Implementation of a Sensor-Cloud Platform for Physical Sensor Management on CoT Environments. Electronics. 2018. Vol. 7, No. 140. P. 1–25.
4. Gurewitz O., Shifrin M., Dvir E. Data Gathering Techniques in WSN: A Cross-Layer View. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 7. P. 2650. <https://doi.org/10.3390/s22072650>
5. Nwankwo E., David M., Onwuka E. N. Integration of MQTT-SN and CoAP protocol for enhanced data communications and resource management in WSNs. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2024. Vol. 13, No. 3. P. 1613–1620. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i3.5158>
6. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge computing: Vision and challenges. IEEE Internet of Things journal. 2016. Vol. 3, No. 5. P. 637–646.
7. Heinzelman W. R., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, HI, USA, 2000. P. 1–10. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926982>
8. Yick J., Mukherjee B., Ghosal D. Wireless sensor network survey. Computer networks. 2008. Vol. 52, No. 12. P. 2292–2330.

#### References

1. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Osadchuk Ya. O. Doslidzhennia avtoheneratorykh parametrychnykh optychnykh sensoriv [Research of self-oscillating parametric optical sensors]. Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky. 2022. Tom 33 (72), № 3. S. 106–114. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/17>
2. Stankovic J. A. Research directions for the internet of things. IEEE Internet of Things Journal. 2014. Vol. 1, No. 1. P. 3–9.
3. Hang L., Jin W., Yoon H., Hong Y. G., Kim D. H. Design and Implementation of a Sensor-Cloud Platform for Physical Sensor Management on CoT Environments. Electronics. 2018. Vol. 7, No. 140. P. 1–25.
4. Gurewitz O., Shifrin M., Dvir E. Data Gathering Techniques in WSN: A Cross-Layer View. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 7. P. 2650. <https://doi.org/10.3390/s22072650>
5. Nwankwo E., David M., Onwuka E. N. Integration of MQTT-SN and CoAP protocol for enhanced data communications and resource management in WSNs. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2024. Vol. 13, No. 3. P. 1613–1620. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i3.5158>
6. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge computing: Vision and challenges. IEEE Internet of Things journal. 2016. Vol. 3, No. 5. P. 637–646.
7. Heinzelman W. R., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, HI, USA, 2000. P. 1–10. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926982>
8. Yick J., Mukherjee B., Ghosal D. Wireless sensor network survey. Computer networks. 2008. Vol. 52, No. 12. P. 2292–2330.