

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЦАВОЛИК ТАРАС ГРИГОРОВИЧ



УДК 004.75

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ  
МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ МОДУЛЯРНИХ КОРИГУЮЧИХ КОДІВ

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Тернопільському національному економічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент  
**Яцків Василь Васильович**,  
Тернопільський національний економічний  
університет,  
завідувач кафедри кібербезпеки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Мухін Вадим Євгенійович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри математичних методів  
системного аналізу;

кандидат технічних наук  
**Грига Володимир Михайлович**,  
Прикарпатський національний університет  
імені Василя Стефаника,  
доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки.

Захист відбудеться «30» серпня 2018 р. о 16<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.082.02 у Тернопільському національному економічному університеті за адресою: 46009, м. Тернопіль, вул. Львівська, 11а (корпус 11, зал засідань вченої ради).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного економічного університету за адресою: 46009, м. Тернопіль, вул. Бережанська, 4.

Автореферат розісланий «27» липня 2018 р.

Г. в. о вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради



Мельник А. М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) є одним з найбільш перспективних напрямків розвитку розподілених обчислювальних систем для моніторингу та управління ресурсами і процесами. Безпроводні сенсорні мережі широко використовуються в системах екологічного, технічного та медичного моніторингу.

Для забезпечення необхідного рівня надійності передачі даних у БСМ, на відміну від безпроводних комп'ютерних мереж, необхідно враховувати обмеження, які накладаються низькими обчислювальними ресурсами вузлів та використанням автономного живлення. Крім того, додаткові ускладнення викликає режим ретрансляції пакетів, який використовується у більшості застосувань БСМ. Оскільки в БСМ часто використовують методи зменшення надлишковості трафіку, шляхом стиснення даних, фільтрації корельованих даних, виключення надлишкових даних сенсорів, відповідно зростають вимоги до надійності передачі кожного пакету. Отже, для ефективної роботи БСМ необхідно забезпечити високу надійність і енергоефективність передачі даних при різних режимах роботи мережі.

Основним механізмом підвищення надійності передачі даних у БСМ є використання схем контролю помилок. Їх задачею є забезпечення надійного зв'язку в безпроводному каналі, в якому помилки виникають через перешкоди, завмирання та втрати бітової синхронізації. Це призводить до канальних помилок, які впливають на цілісність пакетів, що формують сенсорні вузли. До збільшення помилок також призводить низька потужність передавачів БСМ, що пов'язано з використанням автономного живлення.

Таким чином, крім методів підвищення надійності на фізичному рівні, які гарантують надійність передачі на рівні бітів, у БСМ також виникає необхідність застосування схем контролю помилок на канальному рівні, щоб забезпечити надійність на рівні передачі пакетів.

Використання в БСМ відомих завадостійких кодів (Ріда – Соломона, Боуза – Чоудхурі – Хоквінгема (БЧХ), згорткові коди та ін.), на відміну від модулярних коригуючих кодів, не дозволяє реалізувати адаптивні схеми виявлення помилок і тим самим підвищити надійність та зменшити надлишковість від застосування коригуючих кодів.

Фахівцями, які зробили значний теоретичний внесок в розвиток системи залишкових класів (СЗК), є І. Я. Акушський, В. А. Торгашев, В. М. Амербаєв, Я. М. Николайчук, М. І. Червяков, В. А. Краснобаєв, В. В. Яцків, А. Омонді (А. Omondi), А. Мохан, (А. Mohan).

Отже, відомі методи завадостійкого кодування та передачі даних у БСМ не забезпечують належного ефективного вирішення зазначеної задачі. Тому розробка і дослідження методів завадостійкого кодування даних, що забезпечують підвищення надійності передачі даних у БСМ, а також створення спеціалізованих пристроїв обробки даних є актуальною науково-прикладною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Розробка основних положень дисертаційного дослідження здійснювалась відповідно до

планів НДР, програм і договорів, що виконувалися у Тернопільському національному економічному університеті:

– НДР на тему «Методи та засоби побудови безпроводних мультимедійних сенсорних мереж на основі модулярної арифметики» (номер державної реєстрації 0112U007886);

– НДР на тему «Теоретичні основи та апаратні засоби підвищення продуктивності роботи безпроводних сенсорних мереж» (номер державної реєстрації 0117U000414).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи – підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах шляхом розробки та дослідження методів і засобів завадостійкого кодування даних на основі модулярної арифметики.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) проаналізувати сучасний стан та шляхи удосконалення методів підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;
- 2) розробити метод виправлення помилок на основі модулярних коригуючих кодів;
- 3) розробити метод формування перевірочних символів у коригуючих кодах системи залишкових класів;
- 4) удосконалити коригуючі коди системи залишкових класів при їх реалізації на програмованих логічних інтегральних схемах;
- 5) розробити адаптивний протокол передачі даних на основі модулярних коригуючих кодів;
- 6) побудувати моделі та реалізувати на програмованих логічних інтегральних схемах пристрої завадостійкого кодування/декодування даних на основі розроблених методів;
- 7) провести дослідження ефективності запропонованих рішень у безпроводних сенсорних мережах.

**Об'єкт дослідження** – процеси обробки і передачі даних у безпроводних сенсорних мережах.

**Предмет дослідження** – методи та засоби завадостійкого кодування та передачі даних у безпроводних сенсорних мережах на основі модулярної арифметики.

**Методи дослідження.** При розв'язку задач у дисертаційній роботі використовувались: теорія інформації та кодування, методи теорії чисел, методи синтезу і аналізу цифрових схем при розробці пристроїв у системі залишкових класів, методи завадостійкого кодування при розробці модулярних коригуючих кодів.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

- 1) Вперше розроблено метод виправлення помилок на основі модулярних коригуючих кодів з одним перевірочним символом, який, на відміну від відомих, базується на послідовному розв'язку діофантових рівнянь з двома невідомими, що дозволило збільшити кодову відстань модулярного коригуючого коду та підвищити швидкість коду.

2) Вперше розроблено метод формування перевірочних символів у коригуючих кодах системи залишкових класів, у якому, на відміну від відомих, перетворення повідомлення в систему залишкових класів відбувається за рахунок поділу повідомлення на частини та вибору необхідної величини модулів, що дозволило підвищити швидкодію кодування і зменшити апаратні затрати на реалізацію пристроїв кодування.

3) Удосконалено коригуючі коди системи залишкових класів шляхом вибору спеціальної системи модулів, яка забезпечує зменшення апаратної складності та підвищує швидкодію реалізації кодерів/декодерів на програмованих логічних інтегральних схемах.

4) Отримав подальший розвиток двовимірний метод виправлення помилок, який базується на новому методі виправлення помилок на основі модулярних коригуючих кодів, що дозволило реалізувати виправлення пакетів помилок більшої довжини.

#### **Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці:**

1) кодера обчислення перевірочних символів на основі запропонованого методу формування перевірочних символів у коригуючих кодах системи залишкових класів;

2) декодера виправлення помилок у двох інформаційних символах на основі модулярних коригуючих кодів з одним перевірочним символом;

3) декодер виправлення помилок на основі коригуючих кодів системи залишкових класів з спеціальною системою модулів;

4) адаптивний алгоритм та протокол передачі даних у безпроводних сенсорних мережах з використанням коригуючих кодів системи залишкових класів.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено: у ТОВ «Протекшин-Груп»; ТОВ «Інтелдім» для підвищення надійності передачі даних з безпроводних сенсорів; при виконанні науково-дослідних робіт, які виконувались у Тернопільському національному економічному університеті; у навчальному процесі кафедр кібербезпеки та комп'ютерної інженерії Тернопільського національного економічного університету при проведенні лекційних та лабораторних робіт з курсів «Теорія інформації та кодування», «Проектування в середовищі Інтернет – речей», «Програмування комп'ютерних систем на програмованих логічних інтегральних схемах», а також при підготовці магістерських робіт зі спеціальностей «Комп'ютерна інженерія» та «Комп'ютерні науки».

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, які містяться в дисертації, отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [1, 10, 16] – запропоновано метод та розроблено алгоритм виправлення помилок на основі модулярних коригуючих кодів; [2, 7, 12] – метод формування коригуючих кодів у системі залишкових класів та реалізація кодера на ПЛІС; [13, 15] – коригуючі коди в системі залишкових класів зі спеціальною системою модулів; [3, 4, 9] – алгоритм та дослідження виправлення помилок у двовимірних коригуючих кодах; [6, 14] – метод виправлення пакетів помилок на основі модулярного коригуючого коду; [8] – структура декодера виправлення

помилки на основі модулярних коригуючих кодів; [11] – моделювання схем контролю помилок з використанням модулярних коригуючих кодів; [17] – запропоновано адаптивний метод контролю помилок у безпроводних сенсорних мережах.

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи обговорювались і доповідались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, зокрема на: 8-th IEEE Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: IDAACS'2015 (Warszawa, Poland, 2015); 3 rd IDAACS Symposium Wireless Systems within the IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS-SWS 2016 (Offenburg, Germany, 2016); 36th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology: ELNANO (Kyiv, Ukraine, 2016); 14 th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM – 2017 (Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine 2017); 1 rd IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON – 2017 (Kyiv, Ukraine, 2017); 14 th International Conference Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET – 2018 (Lviv-Slavske (Zakarpattya), Ukraine, 2018); IV, V Всеукраїнській школі-семінарі молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (ТНЕУ, м. Тернопіль, 2014, 2015); V Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (ОНАЗ, м. Одеса, 2015); V Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (ТНТУ, Тернопіль, 2017); Міжнародній науково - практичній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження» (Івано-Франківськ, 2017).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 18 наукових праць, у тому числі: 7 статей у провідних фахових виданнях (одна з них – одноосібна), з них: 1 – у періодичному іноземному виданні, 5 – у фахових виданнях України, які внесені до міжнародних наукометричних баз, 1 патент України на корисну модель та 11 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій. 7 наукових праць індексовано в наукометричних базах *Web of Science* та *Scopus*.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Загальний обсяг роботи становить 156 сторінок, у тому числі: 131 сторінка основного тексту, 51 рисунок, 22 таблиці та 4 додатка. Список літератури нараховує 116 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів. Показано зв'язок дисертації з науково-дослідними роботами, окреслено особистий внесок здобувача в одержаних результатах, подано відомості про їх публікацію, апробацію та впровадження.

**У першому розділі** проведено аналіз стану розробки безпроводних сенсорних мереж. Показано, що останні досягнення в області безпроводного зв'язку і цифрової

електроніки сприяли появі недорогих, малопотужних, багатофункціональних сенсорних вузлів, здатних вимірювати, обробляти та передавати інформацію щодо стану контрольованого середовища в центри обробки інформації.

Проаналізовано методи та алгоритми, які використовуються для підвищення надійності передачі даних у БСМ. Встановлено, що сучасні методи, не забезпечують необхідну надійність передачі даних або мають високу надлишковість. У БСМ втрати пакетів відбуваються у результаті перешкод в каналі зв'язку, помилок передачі, черг пакетів, зіткнення пакетів, відмов вузлів (через виснаження енергії) або з інших непередбачуваних причин. Крім того, через малу відстань передачі (100 - 400 м), дані проходять велику кількість ретрансляцій, що в свою чергу, призводить до збільшення кількості можливих помилок, які можуть стати причиною втрати пакетів.

**Другий розділ** присвячений розробці методів підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах на основі коригуючих кодів системи залишкових класів та модулярних коригуючих кодів.

Розроблено метод виправлення помилок у двох інформаційних символах з використанням одного перевірного модуля.

У модулярних коригуючих кодах значення перевірного символу обчислюється за формулою

$$x_{k+1} = |(v_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + \dots + v_i \cdot x_i + \dots + v_k \cdot x_k)|_P, \quad (1)$$

де  $x_i$  – інформаційні символи,  $v_i$  – коефіцієнти взаємно прості з  $P$ ,  $|\bullet|_P$  – операція отримання залишку по модулю  $P$ .

Декодер по прийнятих даних  $(x'_1, x'_2, \dots, x'_i, \dots, x'_k)$  обчислює значення перевірного символу:

$$x'_{k+1} = |(v_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + \dots + v_i \cdot x'_i + \dots + v_k \cdot x_k)|_P. \quad (2)$$

Для виявлення помилки обчислюємо синдром  $\delta$ , який є різницею між отриманим перевірочним символом і перевірочним символом, обчисленим на приймальній стороні (в декодері):

$$\delta = |x'_{k+1} - x_{k+1}|_P. \quad (3)$$

Рівняння (3) можна записати у вигляді:

$$\delta = |v_1 \cdot (x'_1 - x_1) + v_2 \cdot (x'_2 - x_2) + \dots + v_i \cdot (x'_i - x_i) + \dots + v_k \cdot (x'_k - x_k)|_P. \quad (4)$$

Якщо синдром  $\delta = 0$ , то помилки немає, оскільки при відсутності помилки  $x'_i = x_i$ , отже,  $x'_{k+1} = x_{k+1}$ . Якщо  $\delta \neq 0$  – наявна помилка, відповідно  $x'_i \neq x_i$  і, як наслідок,  $x'_{k+1} \neq x_{k+1}$ .

Для виправлення помилок в одному інформаційному символі необхідно і достатньо, щоб значення синдрому  $\delta$  було унікальне для всіх можливих варіантів помилки. Дана умова забезпечується вибором взаємно простих коефіцієнтів  $v_i$ .

Для виправлення помилок у двох інформаційних символах припускаємо, що помилки відбулися в двох символах, оскільки при відсутності помилки  $x'_i - x_i = 0$ . В такому разі рівняння (4) набуде вигляду:

$$|v_i \cdot (x'_i - x_i) + v_{i+1} \cdot (x'_{i+1} - x_{i+1})|_P = \delta. \quad (5)$$

Виконавши перетворення рівняння (5) отримаємо:

$$|v_i \cdot x_i + v_{i+1} \cdot x_{i+1}|_P = |v_i \cdot x'_i + v_{i+1} \cdot x'_{i+1} - \delta|_P. \quad (6)$$

Позначимо праву частину рівняння (6) через  $c$ , отримаємо діофантове рівняння з двома невідомими:

$$v_i \cdot x_i + v_{i+1} \cdot x_{i+1} = |c|_P. \quad (7)$$

За допомогою розширеного алгоритму Евкліда знаходимо один із розв'язків рівняння (7), а за заданими коефіцієнтами  $v_i, v_{i+1}$  виявляємо їх найбільший спільний дільник  $g = \gcd(v_i, v_{i+1})$ , і коефіцієнти  $x_g, x_{g+1}$ , при яких  $v_i \cdot x_g + v_{i+1} \cdot x_{g+1} = g$ .

Оскільки коефіцієнти  $v_i, v_{i+1}$  взаємно прості числа, то  $g = \gcd(v_i, v_{i+1}) = 1$ . Отже,  $c$  ділиться на  $g$ , відповідно діофантове рівняння (7) має розв'язок, і одним із таких розв'язків є числа:

$$\begin{cases} x_{0i} = x_g \cdot c \\ x_{0i+1} = x_{g+1} \cdot c \end{cases}$$

Усі розв'язки рівняння (7) обчислюємо за формулою:

$$\begin{cases} x_i = |x_{0i} - k \cdot v_{i+1}|_P, \\ x_{i+1} = |x_{0i+1} + k \cdot v_i|_P, \end{cases} \quad \text{при } k \in P. \quad (8)$$

Беручи до уваги обмеження  $0 \leq x_i < 2^m$ , яке накладається на  $x_i$ , тільки один з розв'язків рівняння (8) буде відповідати заданому діапазону подання даних.

Таким чином, знайдені розв'язки рівняння (5) будуть правильними значеннями інформаційних символів. Для виявлення можливих помилок необхідно перевірити всі пари інформаційних символів, і при наявності помилок, їх виправити.

Розглянемо коригуючий код, який складається з восьми інформаційних і одного перевірного символу. Розрядність інформаційних символів – 4 біти. Нехай повідомлення має вигляд:  $X = (5, 8, 10, 3, 7, 14, 12, 1)$ , перевірочний модуль  $P = 1021$ , взаємно прості коефіцієнти:  $v_1 = 13, v_2 = 17, v_3 = 19, v_4 = 23, v_5 = 29, v_6 = 31, v_7 = 37, v_8 = 43$ .

Множина розв'язків рівняння (5) при заданих значеннях наведена на рисунку 1 (крива *Error: x2, x3*), з якого видно, що тільки один розв'язок ( $x_2 = 8, x_3 = 10$ ) відповідає діапазону подання інформаційних символів. Якщо тільки в одному з двох вибраних символів  $x_2, x_3$  є помилка, то серед множини розв'язків не буде правильного значення, тобто такого, що відповідає діапазону подання інформаційних символів (див. рис.1, крива *Error: x2, x4*).



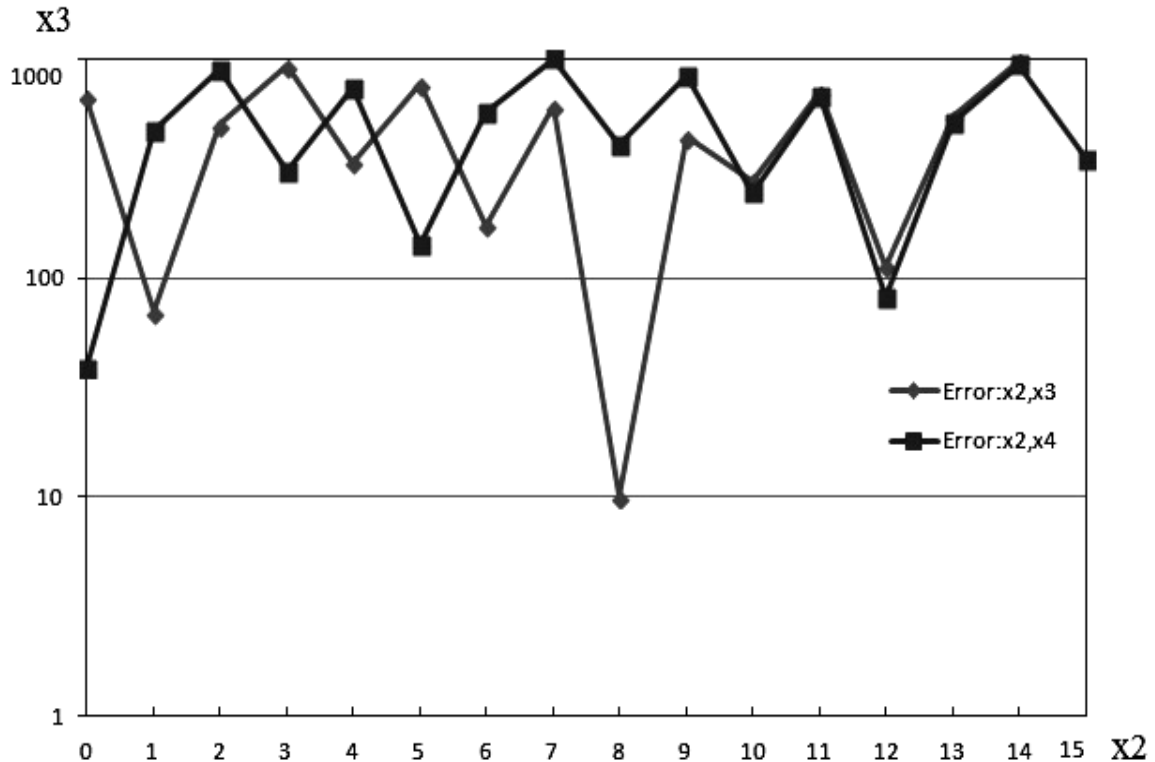


Рисунок 1 – Множина розв'язків діофантового рівняння

Швидкість коду при заданих параметрах  $R = \frac{k}{n}$ , тобто  $R = 0.76$  при  $k = 32$  біт,  $n = 32 + \lceil \log_2 1021 \rceil = 42$ . При використанні відомого методу з двома перевірочними символами  $n = 32 + 2 \cdot \lceil \log_2 1021 \rceil = 52$ , відповідно  $R = 0.62$ .

Отже, розроблений метод забезпечує виправлення помилок у двох інформаційних символах з використанням одного перевірочного символу і тим самим дозволяє збільшити швидкість коду приблизно на 20%, відповідно – зменшити надлишковість при використанні коригуючих кодів.

Розроблено метод формування коригуючих кодів системи залишкових класів. Суть методу полягає в наступному: послідовність бітів, що призначена для передачі, розділяється на  $k$  частин по  $m$  біт:

$$(a_1^1 a_2^1 \dots a_i^1 \dots a_m^1, a_1^2 a_2^2 \dots a_i^2 \dots a_m^2, \dots, a_1^j a_2^j \dots a_i^j \dots a_m^j, \dots, a_1^k a_2^k \dots a_i^k \dots a_m^k), \quad (9)$$

де  $a^i$  – розряд даних в двійковому коді,  $m = 4, 8$ .

Кожній частині двійкового коду ставляться у відповідність прості числа (модулі)  $p_i$  ( $p_1 < p_2 < \dots < p_i < \dots < p_n$ ), де  $k$  – кількість інформаційних модулів,  $n$  – загальна кількість модулів,  $r = n - k$  – перевірочні модулі. Значення модулів вибираємо з умови  $p_i > 2^m$ .

Оскільки значення тетрад або байтів у позиційному поданні менше за відповідні модулі  $p_i$  згідно з умовою вибору модулів, то їх можна вважати залишками. У результаті вказаного перетворення повідомлення набуде вигляду:

$$(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k), \quad (10)$$

де  $x_i$  – частини повідомлення, які одночасно є залишками по вибраних модулях  $p_i$ ,

$$x_i = \sum_{i=1}^m a_i \cdot 2^i.$$

Для обчислення перевірочних символів повідомлення (10) перетворимо в позиційну систему числення

$$X = \sum_{i=1}^k (x_i \cdot M_i \cdot \delta_i) \bmod P_K,$$

де  $M_i = \frac{P_K}{p_i}$ ,  $\delta_i = M_i^{-1} \bmod p_i$ .

Перевірочні символи обчислюються за формулою:

$$x_{k+i} = X \bmod p_{k+i}, \quad i = \overline{1, (n-k)}, \quad (11)$$

де  $X$  – повідомлення в позиційній системі числення.

У результаті отримуємо кодове слово, яке складається з інформаційних і перевірочних символів та має вигляд:

$$(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_n).$$

На рисунках 2 і 3 наведено результати досліджень апаратних затрат (кількість логічних елементів) та часу обчислення перевірочних символів при різній розрядності вхідних даних для коригуючих кодів СЗК та для запропонованого методу з одним та двома перевірочними модулями.

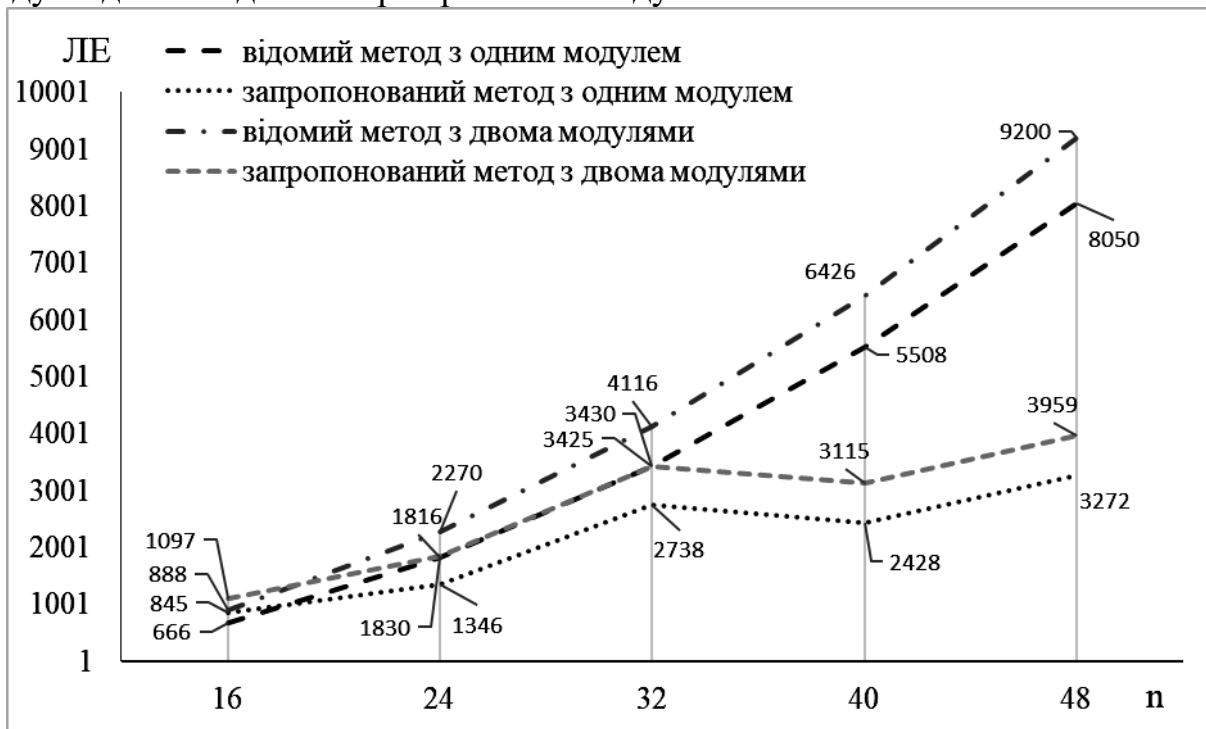


Рисунок 2 – Залежність апаратних затрат від розрядності вхідних даних

Дослідження проводились при наступних вхідних параметрах: розрядність вхідних даних від 16 до 48 біт; кількість інформаційних модулів – 4; кількість перевірочних модулів – 1 або 2.

Робота кодера описана на мові програмування апаратних засобів Verilog-HDL та синтезована в мікросхемах Cyclone IV з використанням програмного забезпечення Quartus фірми Intel (Altera).

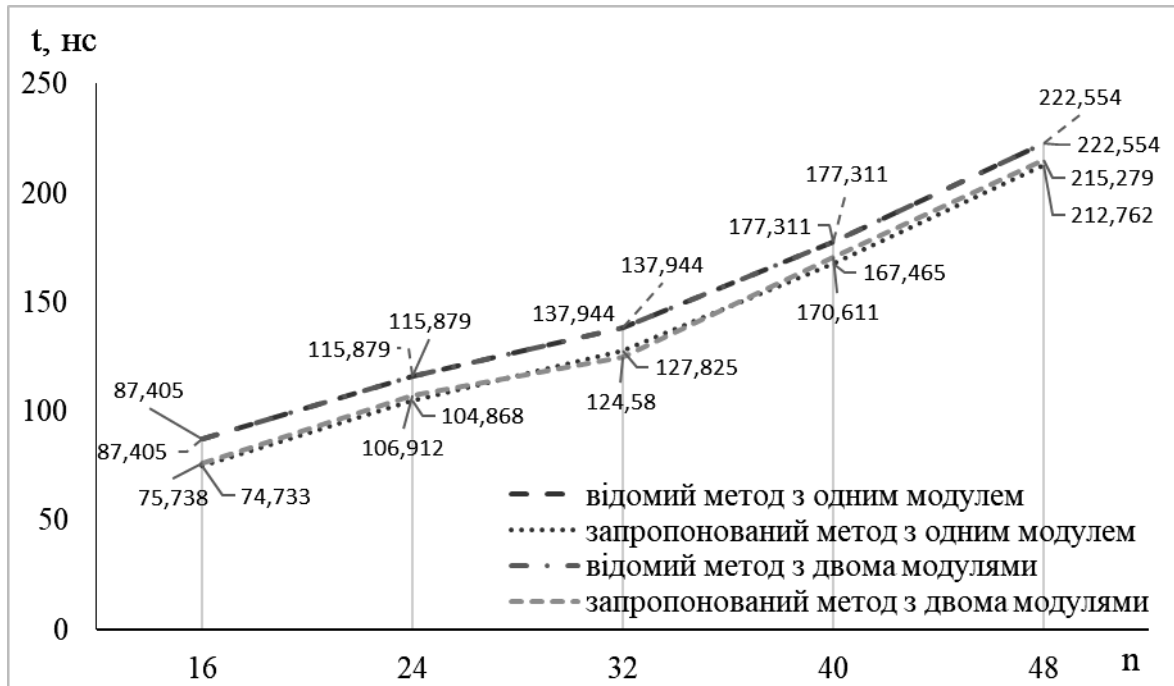


Рисунок 3 – Залежність часу обчислення перевірочних символів від розрядності вхідних даних

Як видно із рисунку 2 запропонований метод формування коригуючих кодів СЗК забезпечує зменшення апаратних затрат на 20% залежно від розрядності повідомлення та підвищення швидкодії (див. рис. 3) за рахунок відсутності процедури перетворення вхідного повідомлення в СЗК.

Удосконалено коригуючі коди системи залишкових класів шляхом вибору спеціальної системи модулів. Автором запропоновано використання розширеної системи модулів:  $2^n$ ,  $2^n + 1$ ,  $2^{n+1} - 1$ ,  $2^{n+2} - 1$ ,  $2^{n+2} + 1$ ,  $2^{n+3} - 1$ , яка зберігає переваги спеціальної системи модулів і при цьому забезпечує необхідну їх кількість.

Проведені експериментальні дослідження операції обчислення залишку з використанням довільної та спеціальної системи модулів засвідчили, що використання системи спеціальних модулів забезпечує зменшення апаратних затрат у 2,8 рази та збільшення швидкодії виконання перетворення на 29 % (табл.1.)

Пристрої виявлення та виправлення помилок з використанням спеціальної системи модулів для методів обчислення проекції та синдрому реалізовані на ПЛІС фірми Altera із застосуванням мови опису апаратних засобів Verilog (табл. 2). Моделювання та верифікацію роботи декодерів здійснено в середовищі Quartus фірми Altera.

Таблиця 1 – Обчислення залишків з використанням довільної та спеціальної системи модулів

Тип модулів	Кількість логічних елементів, шт	Час виконання перетворення, нс
Довільні	3766	45.614
Спеціальні	1325	32.513

Таблиця 2 – Експериментальні результати дослідження апаратної та часової складності пристроїв виправлення помилок

Параметр	Метод обчислення проєкції		Метод обчислення синдрому	
	Довільні модулі	Спеціальні модулі	Довільні модулі	Спеціальні модулі
Кількість логічних елементів, шт	25833	19284 (26%)	49135	44398 (10%)
Затримка встановлення сигналу, мс	89,646	80,936 (18%)	68,142	61,802 (9%)

Як видно із результатів експериментальних досліджень (див. табл. 1 і 2) реалізація декодерів на ПЛІС забезпечує зменшення апаратних затрат приблизно на 26%, що становить 6,5 тис. логічних елементів для методу проєкцій та приблизно 10 % для методу обчислення синдрому. Використання спеціальної системи модулів підвищує швидкодію роботи декодера приблизно на 18 % для методу обчислення проєкцій та на 9 % для методу обчислення синдрому.

Отримав подальший розвиток двовимірний метод контролю помилок на основі модулярних коригуючих кодів, в якому перевірочні символи обчислюються за формулами:

$$f_{jk}(x) = \left( \sum_{i=1}^k x_{ij} v_i \right) \bmod P \quad (13)$$

$$f_{li}(x) = \left( \sum_{j=1}^l x_{ji} v_j \right) \bmod P, \quad (14)$$

де  $x_{ij}$  – інформаційні символи,  $v_i, v_j$  – взаємно прості,  $P$  – модуль (просте число).

Процес кодування полягає в наступному: дані по  $k$  символів надходять у кодер  $\gamma_1$ , де здійснюється обчислення перевірочних символів по рядках за формулою (13) (рис. 5). З виходу кодера  $\gamma_1$  кодові слова надходять у буфер. З буфера кодові слова зчитуються по стовпцях і поступають у кодер  $\gamma_2$ , де відбувається обчислення перевірочних символів по стовпцях згідно (14).

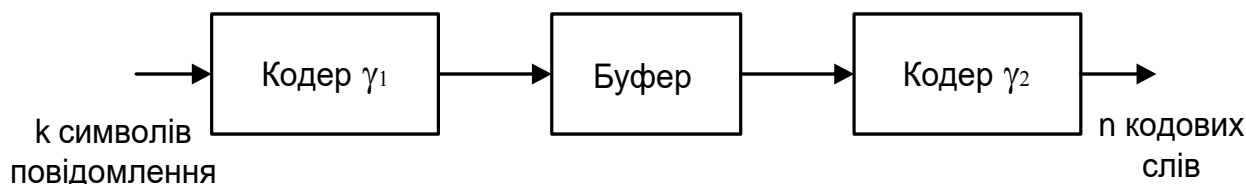


Рисунок 5 – Структурна схема кодера

Виявлення помилок відбувається на основі аналізу синдрому, який обчислюється як різниця перевірочних символів обчислених у кодері та декодері.

Обчислення синдрому по рядках:

$$\delta_i = \begin{pmatrix} (f'_{1k}(x) - f_{1k}(x)) \bmod P \\ (f'_{2k}(x) - f_{2k}(x)) \bmod P \\ \dots \\ (f'_{jk}(x) - f_{jk}(x)) \bmod P \\ \dots \\ (f'_{lk}(x) - f_{lk}(x)) \bmod P \end{pmatrix},$$

Обчислення синдрому по стовпцях:

$$\delta_i = \begin{pmatrix} (f'_{i1}(x) - f_{i1}(x)) \bmod P \\ (f'_{i2}(x) - f_{i2}(x)) \bmod P \\ \dots \\ (f'_{il}(x) - f_{il}(x)) \bmod P \\ \dots \\ (f'_{ik}(x) - f_{ik}(x)) \bmod P \end{pmatrix},$$

де  $f'_{jk}(x), f_{li}(x)$  – перевірочні символи, обчислені в декодері за прийнятими даними.

При  $\delta_i = 0, \delta_j = 0$  – помилки немає, якщо  $\delta_i \neq 0, \delta_j \neq 0$  – наявна помилка.

Позиція спотвореного символу визначається за значенням синдромів, які на перетині рядка і стовпця не дорівнюють нулю.

Якщо синдроми  $\delta_i \neq 0$  і  $\delta_j \neq 0$  у двох і більше рядках або стовпцях, то це означає, що помилки були в двох і більше символах. При цьому, якщо синдром  $\delta_j \neq 0$  у двох стовпцях, – спотворені два символи в рядку.

Розроблений двовимірний код на основі модулярних коригуючих кодів з одним перевірочним символом дозволяє виправляти пакети помилок максимальної довжини  $b = 3k - 2$  символів, при розміщенні спотворених символів у двох рядках і одному стовпці або в двох стовпцях і одному рядку.

Відносна надлишковість двовимірного коду дорівнює:  $I_1 = (1 - R_1)100\% = 38\%$ ,  $R_1 = 0.62$  при розрядності символів  $m_1 = 4$  та  $I_2 = (1 - R_2)100\% = 33\%$ ,  $R_2 = 0.67$  при розрядності символів  $m_2 = 8$ .

**У третьому розділі** розроблено алгоритми виявлення та виправлення помилок на основі модулярних коригуючих кодів та структури кодерів/декодерів.

Алгоритм виявлення та виправлення двох помилок на основі модулярних коригуючих кодів складається з наступних кроків:

- 1) обчислення перевірочного символу  $x'_{k+1}$  за прийнятими даними;
- 2) обчислення синдрому  $\delta$ ;
- 3) якщо  $\delta = 0$  – помилки немає;
- 4) інакше обчислення виразу  $f_j = |v_i * e_j|_P$ ;
- 5) порівняння значення синдрому  $\delta$  і  $f_j$ ;
- 6) якщо  $\delta = f_j$  – помилка виявлена;
- 7) виправлення помилки за формулою  $x_i = |x'_i \pm e_j|$ ;
- 8) якщо  $\delta \neq f_j$  – помилка наявна в більше ніж одному символі;
- 9) припускаємо, що помилки є в двох символах  $x_i, x_j, i \neq j$ ;
- 10) за розширеним алгоритмом Евкліда знаходимо всі розв'язки;

12) перевіряємо, чи є серед множини розв'язків такі, що знаходяться в діапазоні інформаційних символів. Якщо так, то помилки виявлені, а знайдені розв'язки є правильними значеннями інформаційних символів;

13) якщо ні, вибираємо наступну пару символів  $x_i, x_j$ ;

14) повторювати пункти 10-13 доти, поки не будуть перевірені всі комбінації інформаційних символів.

Розроблено структуру декодера виявлення та виправлення двох помилок з використанням одного перевірного символу на основі модулярних коригуючих кодів (рис. 6). Визначення кількості помилок реалізовано в «блоці порівняння», в якому відбувається порівняння значення синдрому з попередньо обчисленими коефіцієнтами  $f_i$ . Якщо  $f_i = \delta$  – помилка наявна в одному символі, в іншому випадку – помилка в двох і більше символах (див. рис. 6).

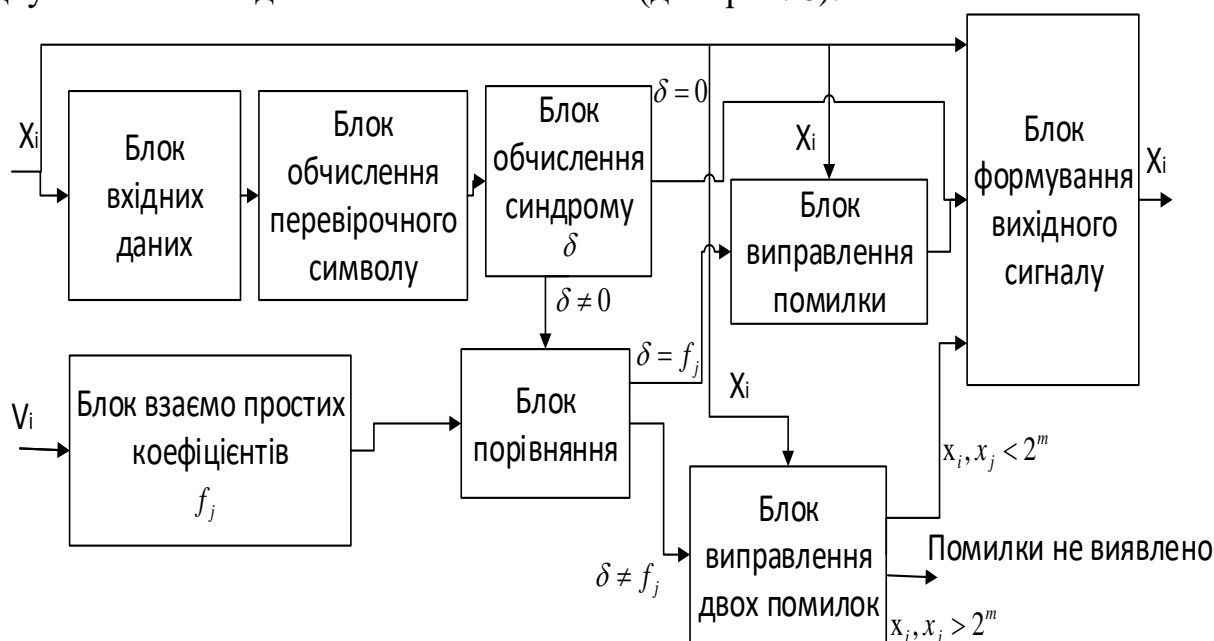


Рисунок 6 – Структурна схема декодера

Якщо при виправленні двох помилок не знайдені значення  $x_i, x_j$ , які належать робочому діапазону, тобто менші ніж  $2^m$ , то це означає, що помилки є більше як у двох символах. У такому випадку помилки не будуть виправлені, і є необхідність у відправленні запиту на повторну передачу пакета. Роботу декодера описано на мові Verilog.

У четвертому розділі розроблено структури та реалізовано на ПЛІС кодери/декодери завадостійкого кодування даних на основі коригуючих кодів системи залишкових класів та модулярних коригуючих кодів.

Розроблено структуру та реалізовано на ПЛІС пристрій формування коригуючих кодів СЗК (рис. 7).

Процес кодування складається з трьох етапів: 1) розділення вхідного повідомлення на  $k$  частин по 4 або 8 біт; 2) переведення повідомлення в позиційну систему числення у заданій системі модулів; 3) обчислення перевірочних символів.

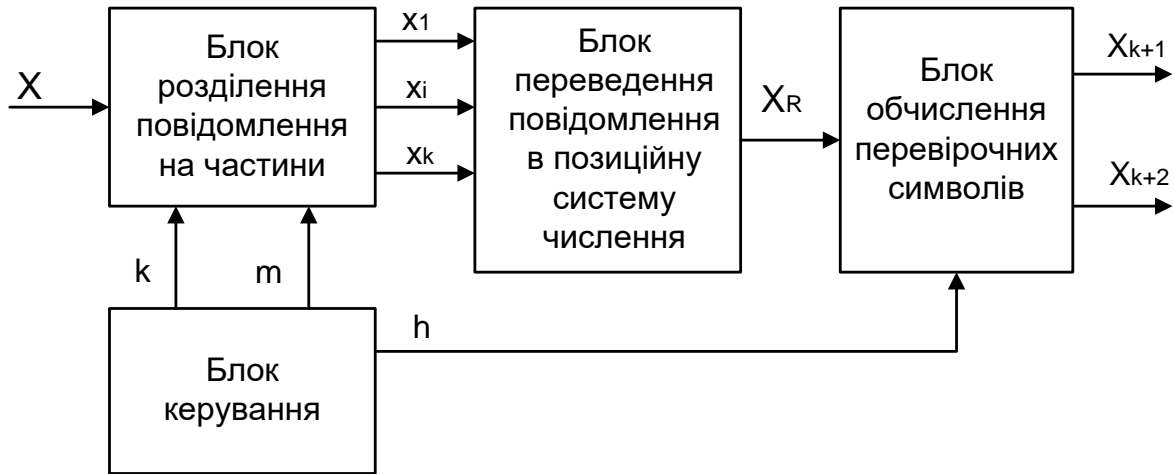


Рисунок 7 – Узагальнена структура кодера

Процес розділення вхідного повідомлення полягає в присвоєнні змінним  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k$   $m$  - біт повідомлення  $X$ , де  $k$  – кількість інформаційних модулів.

Роботу кодера описано на мові Verilog. При синтезі кодера на ПЛІС в якості інформаційних модулів вибрано прості числа  $p_1=257, p_2=263, p_3=269, p_4=271$ , а також перевірочні модулі  $p_5=277, p_6=281$ . Обчислено базисні числа  $V_1 = 3201796979, V_2 = 393435903, V_3 = 3113917370, V_4 = 3145482367$ , а також робочий діапазон  $P = 4927316309$ .

На виходах кодера  $x_{k+1}[8:0], x_{k+2}[8:0]$  формуються перевірочні символи залежно від вхідного значення  $X_R$  ( $h$  – вказує на кількість перевірочних модулів 1 або 2) та кількості перевірочних модулів.

Моделювання та синтез кодера виконано в середовищі Quartus II. Кодер реалізовано на ПЛІС фірми «Altera», серія Cyclone IV GX, мікросхема EP4CGX22CF19C7 (рис. 8).

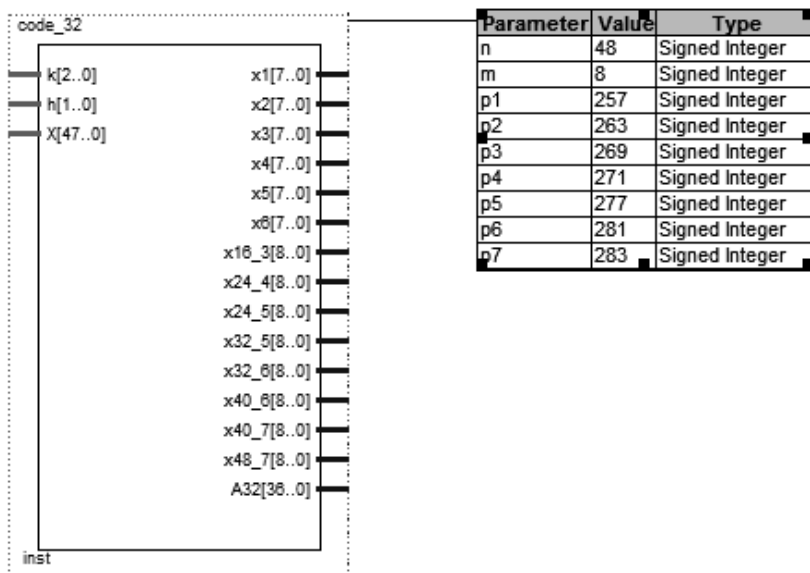


Рисунок 8 – Інтерфейс кодера

Для перевірки правильності роботи кодера вхідне повідомлення  $X$  та вихідні значення  $x_1, x_2, x_3, x_4$  на часовій діаграмі подано в двійковій системі числення. Значення  $A_{32}$  отримано по залишках ( $x_1, x_2, x_3, x_4$ ), а перевірочні символи  $x_5$  і  $x_6$  подано в десятковій системі числення (див. рис. 9):

$$x_5 = A_{32}(\text{mod } p_5) = 2260348044(\text{mod } 277) = 67;$$

$$x_6 = A_{32}(\text{mod } p_6) = 2260348044(\text{mod } 281) = 61.$$

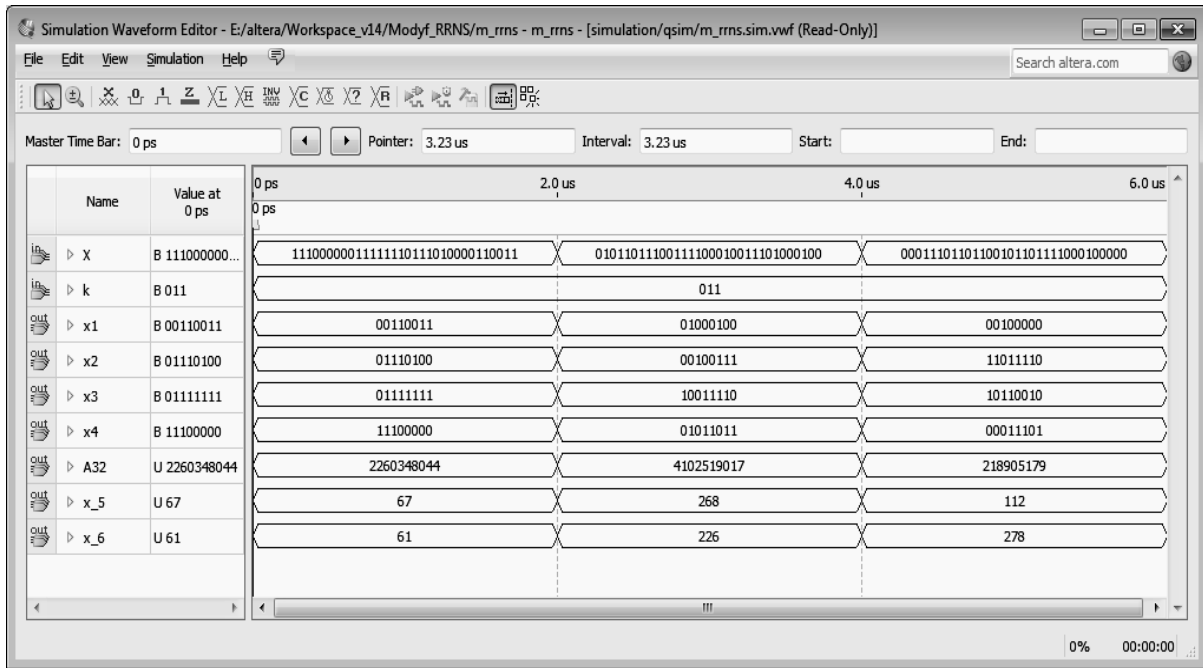


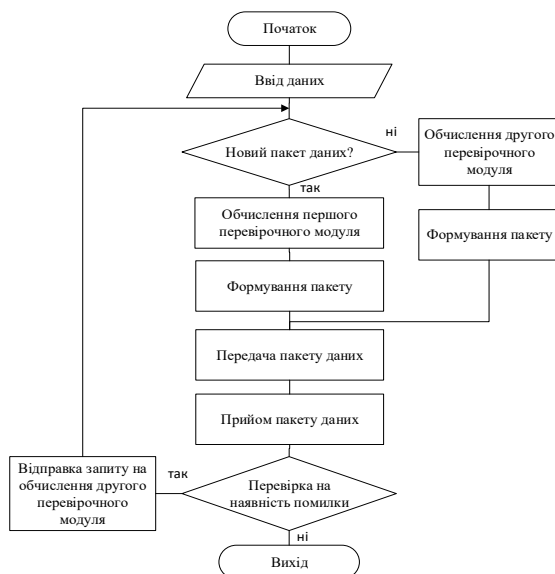
Рисунок 9 – Результати роботи кодера при розрядності вхідних даних n=32

Апаратні затрати (кількість логічних елементів) та максимальна затримка сигналу при реалізації кодера на ПЛІС для різної розрядності вхідних даних наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Параметри синтезу кодера

Розрядність повідомлення	16	24	32	40	48
Використано/всього логічних елементів	1,113 / 21,280 ( 5 % )	1,846 / 21,280 ( 9 % )	2,472 / 21,280 ( 12 % )	3,127 / 21,280 ( 15 % )	3,745 / 21,280 ( 18 % )
Час затримки, нс	71.663	101.822	118.132	148.625	187.592

Розроблено адаптивний алгоритм та протокол передачі даних у безпроводних сенсорних мережах (рис. 10).



Суть запропонованого адаптивного протоколу передачі даних полягає в тому, що пакет даних відправляється з додаванням одного перевірного символу, який забезпечує виявлення помилок. Якщо помилку виявлено, то надсилається запит на передачу додаткового перевірного символу.

Рисунок 10 – Адаптивний алгоритм передачі даних



Протокол з використанням коригуючих кодів СЗК складається з: преамбули (1 байт); адреси отримувача; контрольного поля; блок даних (від 0 до 32 байтів); перевірного символу (розрядність від 1 до 2 байтів) (рис.11).

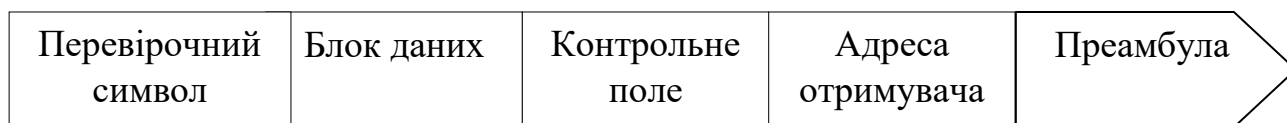


Рисунок 11 – Удосконалена структура протоколу передачі даних

При виявленні помилки приймач відправляє запит на передачу наступного перевірного символу (рис. 12).

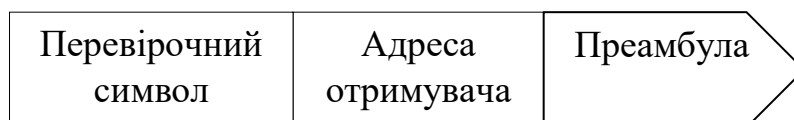


Рисунок 12 – Структура пакету передачі додаткового перевірного символу

Наявність двох перевірок символів дозволяє виправляти помилки. Експериментально встановлено, що використання адаптивного протоколу передачі даних у БСМ дозволяє зменшити час на повторну передачу спотворених пакетів у середньому на 80 %.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах шляхом розробки методів та засобів завадостійкого кодування даних на основі модулярної арифметики. Отримано наступні наукові результати.

1. Проведено аналіз методів та алгоритмів, які використовуються для підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах. Встановлено, що відомі методи, не забезпечують необхідну надійність передачі даних або мають високу надлишковість.

2. Удосконалено коригуючі коди в системі залишкових класів за рахунок вибору спеціальної системи модулів. Проведені дослідження операції обчислення залишку з використанням довільної та спеціальної системи модулів засвідчили, що застосування системи спеціальних модулів забезпечує зменшення апаратних затрат у 2,8 рази та збільшення швидкодії виконання перетворення на 29 %.

3. Запропоновано метод формування перевірок символів у коригуючих кодах системи залишкових класів, який забезпечує зменшення апаратних затрат в середньому на 26 % залежно від розрядності повідомлення та підвищення швидкодії за рахунок відсутності процедури перетворення повідомлення з позиційної системи в систему залишкових класів і зворотного перетворення.

4. Розроблено метод виправлення помилок на основі модулярних коригуючих кодів, який забезпечує виправлення помилок у двох інформаційних символах з використанням одного перевірного символу, що дозволяє збільшити швидкість коду приблизно на 20 %, а надлишковість модулярного коригуючого коду, відповідно, зменшити.

5. Розроблено двовимірний метод контролю помилок на основі модулярних коригуючих кодів, який забезпечує ефективне виправлення пакетів помилок у безпроводних каналах зв'язку, характеризується високою коригуючою здатністю та низькою складністю реалізації алгоритму декодування і, відповідно, може бути застосований для підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах.

6. Розроблено пристрій виправлення помилок на основі коригуючих кодів системи залишкових класів зі спеціальною системою модулів на основі методів обчислення проєкцій числа та обчислення синдрому. Проведені дослідження показали, що при реалізації на ПЛІС декодера виправлення помилок на основі спеціальної системи модулів забезпечує зменшення апаратних затрат приблизно на 26%, що становить 6,5 тис. логічних елементів для методу проєкцій та приблизно 10 % для методу обчислення синдрому. Використання спеціальної системи модулів підвищує швидкість роботи декодера приблизно на 18 % для методу обчислення проєкцій та на 9 % для методу обчислення синдрому.

7. Реалізовано на ПЛІС кодер обчислення для визначення перевірочних символів у коригуючих кодах системи залишкових класів. Експериментально встановлено, що реалізація кодера на основі запропонованого методу формування коригуючих кодів СЗК порівняно з відомими методами забезпечує зменшення апаратних затрат на 26% і залежить від розрядності повідомлення.

8. Розроблено адаптивний алгоритм та протокол передачі даних у безпроводних сенсорних мережах на основі коригуючих кодів системи залишкових класів. Проведені експериментальні дослідження показали, що адаптивний алгоритм передачі даних забезпечує зменшення часу на повторну передачу спотворених пакетів у середньому на 80 %.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті в закордонних журналах та наукових фахових виданнях*

1. Цаволик Т. Г., Яцків В. В. Метод исправления ошибок на основе модулярных корректирующих кодов // Физика, математика, информатика. Вестник Брестского государственного технического университета. Брест, 2015. № 5 (850). С. 36-38. *Автором запропоновано метод виявлення і виправлення помилок на основі модулярних коригуючих кодів.*

2. Цаволик Т. Г., Яцків В. В. Метод формування корегувальних кодів у системі залишкових класів // Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27 (3). С. 191–194. *Автором запропоновано метод формування перевірочних символів в корегуючих кодах системи залишкових класів.*

3. Яцків В. В., Цаволик Т. Г. Двовимірні коректуючі коди на основі модулярної арифметики // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2015. № 4 (227). С. 144 – 148. *Автором удосконалено метод виявлення та виправлення помилок на основі двовимірних модулярних корегуючих кодів.*

4. Sieck, V. Yatskiv, A. Sachenko, T. Tsavolyk. Two-Dimensional Error Control Based on Modular Corrective Codes. International Journal of Computing, 2015. Vol. 14,

Issue 4. P. 208-213. *Автором проведено порівняння апаратної складності алгоритму кодування даних, при реалізації кодерів на ПЛІС.*

5. Цаволик Т. Г. Корегуючі коди в системі залишкових класів зі спеціальними модулями // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Технічні науки. 2016. № 3. С. 100 – 104.

6. Цаволик Т. Г. Яцків В. В. Виправлення пакетів помилок на основі модулярного коригуючого коду // Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Вип. 28(2). С. 155–158. *Автором запропоновано метод виявлення пакетів помилок на основі модулярних коригуючих кодів.*

7. Патент України на корисну модель № 117493, МПК (2006) H04J 13/00 H04W 84/18 (2009.01). Спосіб формування корегуючих кодів в системі залишкових класів / В. В. Яцків, Т. Г. Цаволик, Н. Г. Яцків. – № u201700839; заявл. 30.01.2017; опубл. 26.06.2017. – Бюл. № 12/2017. *Автором запропоновано спосіб формування коригуючих кодів в системі залишкових класів.*

#### ***Опубліковані праці апробаційного характеру:***

8. Yatskiv V. Tsavolyk T., Hu Zhengbing. Multiple Error Detection and Correction Based on Modular Arithmetic Correcting Codes. Proceedings of the 8-th 2015 IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS'2015, (Warsaw, Poland, September 24-26, 2015). Warsaw. 2015. Volume 2. P. 850-854 (включено до наукометричних баз Web of science та Scopus). *Автором проведено дослідження методу виправлення багатократних помилок.*

9. Yatskiv V., Tsavolyk T. Two-Dimensional Corrective Codes Based on Modular Arithmetic. Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Conference the Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronics CADSM' 2015. (Lviv-Polyana, Ukraine, February 24-27, 2015). Lviv-Polyana. 2015. P. 291-294. (включено до наукометричної бази Scopus). *Автором розроблено алгоритм виявлення та виправлення помилок в двовимірних кодах.*

10. Yatskiv V. Tsavolyk T., Sachenko A. Error Correction Technique Based on Modular Correcting Codes. Conference Proceedings IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), (Kyiv, Ukraine, April 19-21, 2016). Kyiv. 2016. P.362-364. (включено до наукометричної бази Scopus). *Автором розроблено алгоритм та структуру кодера виправлення помилок.*

11. Sachenko A., Yatskiv V., Tsavolyk T. Modeling the Wireless Sensor Networks Using the Error Control Scheme. Proceedings of the 3 rd IDAACS Symposium Wireless Systems within the IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS-SWS (Offenburg, Germany, September 26–27, 2016), Offenburg. 2016. P.122-126. (включено до наукометричної бази Scopus). *Автором проведено дослідження схем контролю помилок в БСМ.*

12. Yatskiv V., Tsavolyk T., Yatskiv N. The Correcting Codes Formation Method Based on the Residue Number System. Conference Proceedings of 14 th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM-2017) (Polyana-Svalyava, Ukraine, February 21-25, 2017).

Polyana-Svalyava. 2017. P. 237-240. (включено до наукометричної бази Scopus). *Автором розроблено структуру кодера та проведено його дослідження.*

13. Yatskiv V., Tsavolyk T. Improvement of Data Transmission Reliability in Wireless Sensor Networks on the Basis of Residue Number System Correcting Codes Using the Special Module System. Conference Proceedings, IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, (Kyiv, Ukraine, May 29 – June 2, 2017). Kyiv. 2017. P. 890 – 893. (включено до наукометричної бази Scopus). *Автором проведено дослідження апаратної складності спеціальної системи модулів.*

14. Yatskiv V., Tsavolyk T., Yatskiv N. Burst error-correcting codes based on modular correcting codes. Conference Proceedings of 14 th International Conference Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2018) (Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24 2018). Lviv. 2018. P. 389-392. (включено до наукометричної бази Scopus). *Автором розроблено алгоритм виправлення пакетів помилок на основі модулярних коригуючих кодів.*

15. Цаволик Т. Г. Коректуючі коди системи залишкових класів зі спеціальною системою модулів. Матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (м. Тернопіль, 22-23 травня 2015 р.). Тернопіль: ТНЕУ. 2015. С. 61-62.

16. Яцків В. В., Цаволик Т. Г. Метод завадостійкого кодування даних на основі модулярних коректуючих кодів. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (м. Одеса, 29-30 жовтня 2015 р.). Одеса, ОНАЗ. 2015. С. 111-114. *Автором розроблено алгоритм виправлення двох помилок на основі модулярних коригуючих кодів.*

17. Яцків В. В., Цаволик Т. Г., Стасюк І. І. Адаптивний метод контролю помилок в безпроводних сенсорних мережах. Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Івано-Франківськ, 5-7 квітня 2017 р.) Івано-Франківськ: Симфонія форте. 2017. С. 30. *Автором розроблено адаптивний алгоритм передачі даних.*

## АНОТАЦІЇ

**Цаволик Т. Г. Методи та засоби передачі даних в безпроводних сенсорних мережах на основі модулярних коригуючих кодів.** – Рукопис.

*Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. – Тернопільський національний економічний університет, Тернопіль, 2018.*

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної задачі підвищення надійності передачі даних в безпроводних сенсорних мережах шляхом розвитку методів та засобів завадостійкого кодування даних на основі модулярної арифметики.

У дисертації розроблено методи підвищення надійності передачі даних в безпроводних сенсорних мережах на основі модулярної арифметики та системи залишкових класів. Розроблено метод виправлення помилок на основі модулярних

коригуючих кодів з одним перевірочним символом, який базується на послідовному розв'язку діофантових рівнянь з двома невідомими, що дозволило здійснити виправлення помилок у двох символах. Розроблено метод формування перевірочних символів у коригуючих кодах системи залишкових класів, в якому перетворення повідомлення в систему залишкових класів відбувається за рахунок поділу повідомлення на частини та вибору необхідної величини модулів. Удосконалено коригуючі коди системи залишкових класів шляхом вибору спеціальної системи модулів, яка забезпечує зменшення апаратної складності та підвищує швидкодію реалізації кодерів/декодерів на програмованих логічних інтегральних схемах. Отримав подальший розвиток метод виправлення пакетів помилок, який базується на двовимірній схемі та модулярних коригуючих кодах.

*Ключові слова: безпроводні сенсорні мережі, кодування, декодування, модулярні коригуючі коди, система залишкових класів, модулярна арифметика.*

**Цаволик Т. Г. Методы и средства передачи данных в беспроводных сенсорных сетях на основе модулярных корректирующих кодов. – Рукопись.**

*Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - Компьютерные системы и компоненты. - Тернопольский национальный экономический университет, Тернополь, 2018.*

Диссертация посвящена актуальной научно-технической задаче повышения надежности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях путем развития методов и средств помехоустойчивого кодирования данных на основе модулярной арифметики.

Проанализированы подходы к повышению надежности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях, в которых потеря пакета данных происходит из-за высокого уровня помех в канале связи, отказов узлов из-за истощения аккумулятора, ошибок передачи или других непредвиденных обстоятельств.

В диссертации разработаны методы повышения надежности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях на основе модулярной арифметики и системы остаточных классов.

Разработан метод исправления ошибок на основе модулярных корректирующих кодов с одним проверочным символом, который базируется на последовательном решении диофантовых уравнений с двумя неизвестными, что позволило реализовать исправления ошибок в двух символах. Данный метод обнаружения и исправления ошибок позволяет увеличить скорость кода примерно на 20% и уменьшить избыточность модулярного корректирующего кода.

Разработан метод формирования проверочных символов в корректирующих кодах системы остаточных классов, в котором преобразование сообщения в систему остаточных классов происходит за счет разделения сообщения на части и выбора необходимой величины модулей. Предложенный метод обеспечивает уменьшение аппаратных затрат в среднем на 20% и зависит от разрядности входящих сообщений, повышает быстродействие за счет того, что данное сообщение не нужно переводить с позиционной системы счисления в систему остаточных классов и выполнять обратное преобразование.

Усовершенствовано корректирующие коды системы остаточных классов путем выбора специальной системы модулей, которая обеспечивает уменьшение аппаратной сложности и повышает быстродействие реализации кодеров/декодеров на программируемых логических интегральных схемах.

Получил дальнейшее развитие метод исправления пакетов ошибок, основанный на двумерной схеме и модулярных корректирующих кодах. Двумерный код состоит из таблицы, где есть строки и столбцы. Процесс кодирования выглядит следующим образом: данные приходят во внутренней кодер, где осуществляется вычисление проверочного символа для данной строки, затем попадают в буфер. С буфера кодовые слова считываются и переходят во внешний кодер, в котором производится вычисление проверочного символа по столбцам. Выявление ошибки происходит на основе анализа синдрома, где вычисляется синдром по строкам, а затем по столбцам. Если в таблице синдром по строкам и столбцами равен нулю, то ошибки нет, иначе ошибка присутствует в строках и столбцах.

*Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, кодирование, декодирование, модулярные корректирующие коды, система остаточных классов, модулярная арифметика.*

**Tsavolyk T.G. Methods and Means of Data Transmission in Wireless Sensor Networks Based on Modular Corrective Codes. – Manuscript.**

*Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in specialty 05.13.05 – Computer System and Components. Ternopil National Economic University, 2018.*

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and technical problem of increasing the reliability of data transmission in wireless sensor networks, through the development of methods and means and noise immunity coding on the basis of modular arithmetic.

In the dissertation develop methods of increasing the reliability of data transmission in wireless sensor networks based on modular arithmetic and system of residual classes are developed in the dissertation. An error correction method is developed on the basis of modular correction codes with one check symbol based on sequential solving of Diophantine equations with two unknowns, which allowed to correct errors in two characters. The method of forming check symbols in the correction codes of the system of residual classes is developed, in which the conversion of the message into the system of residual classes occurs due to the division of messages into parts and the choice of the required value of modules. Corrective codes of the system of residual classes have been improved by choosing a special system of modules that reduces hardware complexity and enhances the speed of implementation of encoders/decoders on programmable logic integrated circuits. We have further developed the method of correction of error packages, which is based on the two-dimensional scheme of modular correction codes.

*Keywords: wireless sensor networks, coding, decoding, modular correction codes, residual number system, modular arithmetic.*

Підписано до друку 25.07.2018 р.  
Формат 60x90/16. Гарнітура Times.  
Папір офсетний. Друк на дублікаторі.  
Умов. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0.  
Зам. № А026-18. Тираж 100 прим.

Видавець та виготовлювач  
Тернопільський національний економічний університет  
вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, 46009  
*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців ДК № 3467 від 23.04.2009 р.*  
Видавничо-поліграфічний центр «Економічна думка ТНЕУ»  
вул. Бережанська, 2, м. Тернопіль, 46009  
тел. (0352) 47-58-72  
E-mail: [edition@tneu.edu.ua](mailto:edition@tneu.edu.ua)