
МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.67

Т. Б. МАРТИНЮК, О. Ю. ВОЙНАЛОВИЧ

КЛАСИФІКАЦІЙНА МОДЕЛЬ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО КОДУВАННЯ

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021,
Вінниця, Україна, e-mail:sashavoinalovich@gmail.com*

Анотація. У сучасних комп'ютерних застосуваннях ефективне оброблення цифрової інформації вимагає оптимального кодування цифрових даних, особливо з огляду на швидкість та завадостійкість оброблення та передачі кодуваної інформації. Дану роботу присвячено класифікаційному аналізу відомих методів кодування з акцентом на їх завадостійкість. Завадостійкі коди грають ключову роль у забезпеченні надійності та ефективності передачі інформації, а також забезпечують її цілісність у критичних системах оброблення, аналізу та розпізнавання об'єктів. Запропоновано розширений варіант класифікаційної моделі методів кодування, в якій задіяно базові ознаки кодів за алгебраїчною теорією кодування. Цю класифікацію доповнено серед одиничних кодів одиничним парним кодом, серед багатозначних кодів – кодом Фібоначчі, серед циклічних кодів – модифікованим кодом Елайєса. Крім того, наведено перелік сучасних циклічних кодів. З точки зору завадостійкості розглянуто два циклічних кода: модифікований код Елайєса та одиничний позиційний код. Виконано порівняння коректувальних властивостей коду Елайєса, модифікованого коду Елайєса з кодом Хеммінга. В результаті показано, що модифікований код Елайєса дозволяє виправляти потрібні помилки в рядках корегуючої матриці, та виявляти потрібні помилки в стовпцях корегуючої матриці. Зроблено порівняльний аналіз двох одиничних кодів, позиційного та нормального з кодом Хеммінга. Отже одиничний позиційний код як і код Хеммінга здатен не тільки виявляти, але й виправляти одиничні помилки. Ця функціональна потужність одиничного позиційного коду міститься у способі кодування його комбінацій на відмінну від коду Хеммінга, в якому передбачено контрольні символи.

Ключові слова: класифікація, кодування, завадостійкість, коректувальна властивість.

Abstract. In modern computer applications, efficient processing of digital information requires optimal coding of digital data, especially considering the speed and immunity of processing and transmission of coded information. This work is devoted to the classification analysis of known coding methods with an emphasis on their immunity. Jam-resistant codes play a key role in ensuring the reliability and efficiency of information transmission, as well as ensuring its integrity in critical object processing, analysis and recognition systems. An extended version of the classification model of coding methods is proposed, which uses the basic characteristics of codes according to the algebraic theory of coding. This classification is supplemented among single codes by a single even code, among multi-valued codes by the Fibonacci code, among cyclical codes by a modified Eliaz code. In addition, a list of modern cyclic codes is given. From the point of view of immunity, two cyclic codes are considered: a modified Eliaz code and a single positional code. A comparison of the corrective properties of the Eliaz code, the modified Eliaz code and the Hamming code was performed. As a result, it is shown that the modified Eliaz code allows correcting triple errors in the rows of the correction matrix and detecting triple errors in the columns of the correction matrix. A comparative analysis of two unit codes, positional and normal with the Hamming code, was made. Therefore, the single positional code, like the Hamming code, is capable not only of detecting, but also of correcting single errors. This functional power of the unit positional code is contained in the way of encoding its combinations in contrast to the Hamming code, in which control symbols are provided.

Key words: classification, coding, immunity, corrective property.

DOI: 10.31649/1681-7893-2024-47-1-42-49

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВСТУП

Для ефективного оброблення цифрової інформації у всіх сучасних комп'ютерних застосуваннях важливу роль відіграє оптимальне кодування цифрових даних [1-3]. Оптимальність кодування даних передбачає не тільки мінімум апаратних витрат на збереження, передачу та оброблення значних масивів даних, що впливає, в першу чергу, на швидкість оброблення, але й потребує забезпечення завадостійкості закодованої інформації [3-5].

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМАТИКИ

Завадостійкість кодування цифрових даних містить не тільки необхідність виявлення помилок у кодових комбінаціях, але й можливість їх виправлення, бажано в процесі оброблення даних, що потребує надання їм корегувальних властивостей [6,7]. Особливо гостро ця задача постає при швидкісній передачі, аналого-цифровому перетворенні значних масивів цифрової інформації [7-10] а також у процесі автономного керування мобільних роботів як інтелектуальних систем керування [11,12].

Аналізу особливостей кодування даних з розширеними завадостійкими властивостями присвячено праці таких видатних українських вчених, як Лужецький В.А., Азаров О.Д., Борисенко О.А., Жураковський Ю.П., Полторак В.П., Петришин Л.Б., Семеренко В.П., Черняк О.І. та інші.

Метою даної роботи є класифікаційний аналіз відомих методів кодування даних з акцентом на їх завадостійкість.

ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ ЯК ВЛАСТИВІСТЬ ЦИФРОВИХ КОДІВ

Завадостійкість в контексті завадостійких кодів означає здатність програмного забезпечення та обчислювальних системи продовжувати працювати нормально навіть у випадку збоїв або непередбачуваних умов пов'язаних з кодуванням цифрових даних [13].

Завадостійкість, у свою чергу, містить поняття контролездатності та корегувальної властивості коду. Причому, контролездатність вказує на здатність коду виявляти наявні помилки. Це означає, що код має можливість виявити факт того, що дані були спотворені (наприклад, через шум чи інші завади). Контролездатність дозволяє виявити помилки, але не виправити їх, з іншого боку, корегувальна властивість вказує на здатність коду виправляти помилки. Код з корегувальною властивістю може виявити та виправити спотворені дані, щоб відновити інформацію [14].

Алгебраїчні методи кодування трактують завадостійкість кодів таким чином: завадостійкими називають коди, що дозволяють виявляти і (або) виправляти помилки в прийнятому повідомленні. Разом з тим, здатність коду до виявлення і виправлення помилок базується на введенні надмірності інформації у кодоване повідомлення. Надмірні символи формуються за певними правилами і називаються перевірочними або контрольними. Збільшення кількості таких символів у кодовій комбінації підвищує завадостійкість коду, але призводить до зниження швидкості передачі інформації [4, 6].

Властивість завадостійкості є важливою через ряд причин [15]:

1. Надійність передачі даних - помилки можуть виникати через шум, перешкоди в каналах зв'язку або внаслідок дефектів у пристроях зберігання. Завадостійкі коди дозволяють забезпечити надійну передачу і збереження інформації навіть у випадку таких помилок.

2. Ефективність передачі даних - корекція помилок на рівні коду дозволяє скоротити потрібну пропускну здатність каналу зв'язку або обсяг пам'яті для збереження даних, оскільки не виникає необхідності повторно передавати або зберігати інформацію через виявлені помилки.

3. Забезпечення цілісності даних - у багатьох застосуваннях, таких як зберігання даних у пам'яті комп'ютера або передача інформації по мережі, важливо забезпечити цілісність даних. Завадостійкі коди забезпечують виявлення та виправлення будь-яких змін або пошкоджень даних, що можуть виникнути через різноманітні фактори.

4. Застосування у критичних системах - у деяких системах, таких як космічні апарати, медична техніка, автономне керування мобільними роботами або фінансові транзакції, неприпустимою є навіть найменша помилка. Завадостійкі коди грають критичну роль у забезпеченні надійності таких систем.

Основними характеристиками завадостійких кодів є [15]:

довжина коду n , підстава коду m , загальна кількість кодових комбінацій N , кількість дозволених кодових комбінацій N_p , надлишковість коду K_n і мінімальна кодова відстань d_{min} .

Розглянемо більш детально ці характеристики.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Отже довжину коду n складає кількість розрядів (символів) у кодовій комбінації. Підстава коду m – це кількість значень ознак, використовуваних в кодових комбінаціях, що відрізняються між собою. Наприклад, у двійковому коді $m=2$ (символи 0 і 1).

Потужність коду N_p – це кількість дозволених кодових комбінацій, що дорівнює кількості початкових інформаційних і використовуваних для передачі повідомлень. Загальна кількість кодових комбінацій N_0 – це кількість всіх можливих комбінацій, що дорівнює m^n (для двійкових кодів $N=2^n$).

Кількість інформаційних символів k – це кількість символів (розрядів) кодової комбінації, призначених для передачі власне повідомлення, наприклад, $N_p=2^k$. Кількість перевірочних символів r – це кількість символів (розрядів) кодової комбінації, необхідних для корекції помилок, що характеризує абсолютну надмірність коду. У теорії кодування [15] під надмірністю коду R розуміють відносну надмірність, що дорівнює відношенню кількості перевірочних символів до довжини коду, тобто:

$$R = r/n, \quad (1)$$

Відомо велику кількість кодів, систематизація і класифікація яких через їх численні ознаки є досить складною. Тому при класифікації, як правило використовують структурні характеристики (ознаки) кодів.

КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ КОДУВАННЯ ЦИФРОВИХ ДАНИХ

На рис.1 наведено один з варіантів класифікаційної моделі відомих кодів [16]. У наведеній класифікаційній моделі серед відомих одиничних кодів вказано одиничний парний код, а серед багатозначних кодів вказано код Фібоначчі. Як базові ознаки у класифікації (рис.1) наведено такі [6]: кількість імпульсних ознак, багатопозиційність, однозначність/багатозначність, надлишковість/ненадлишковість, рівномірність нерівномірність, блоковість, неперервність, подільність/неподільність, самодоповняльність, систематичність/несистематичність.

З точки зору завадостійкості кодів інтерес представляють циклічні коди. На рис.2 наведено перелік відомих циклічних кодів [6], до яких введено модифікований код Елайсса.

Крім того, серед сучасних завадостійких циклічних кодів варто навести такі [17]: коди низької щільності перевірки парності (Low-Density Parity-Check, LDPC), турбо-коди, полярні коди, модифікований код Елайсса [7].

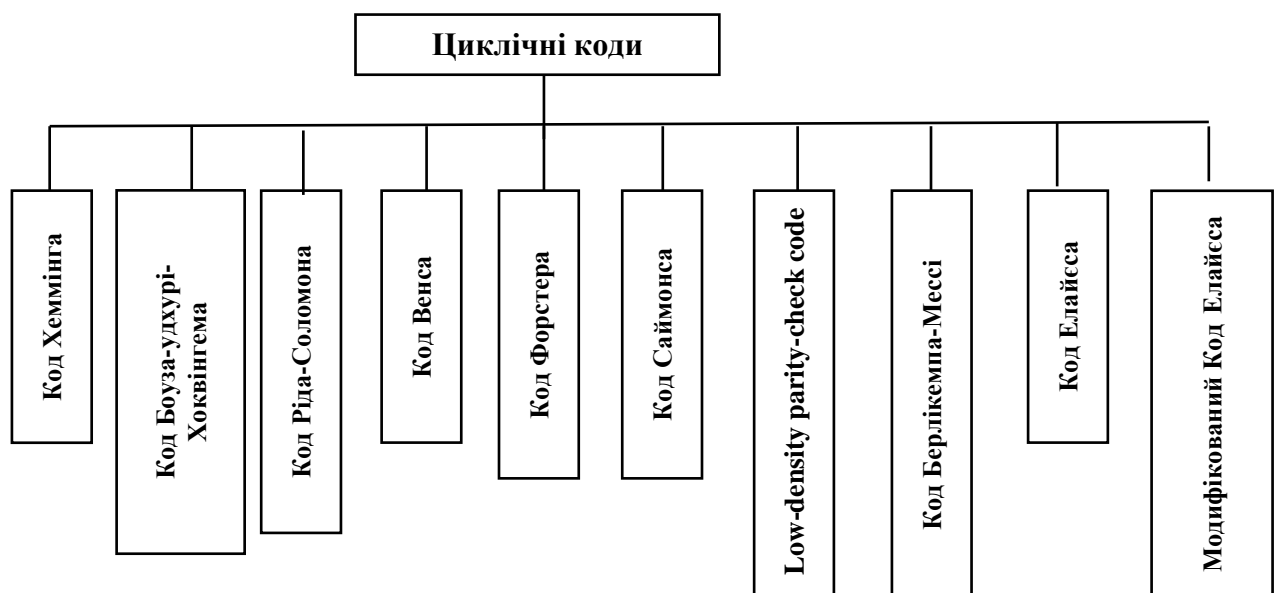


Рисунок 2 – Відомі циклічні коди

В даній роботі з точки зору завадостійкості розглянемо два циклічні коди: модифікований код Елайсса та одиничний позиційний код.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ
ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

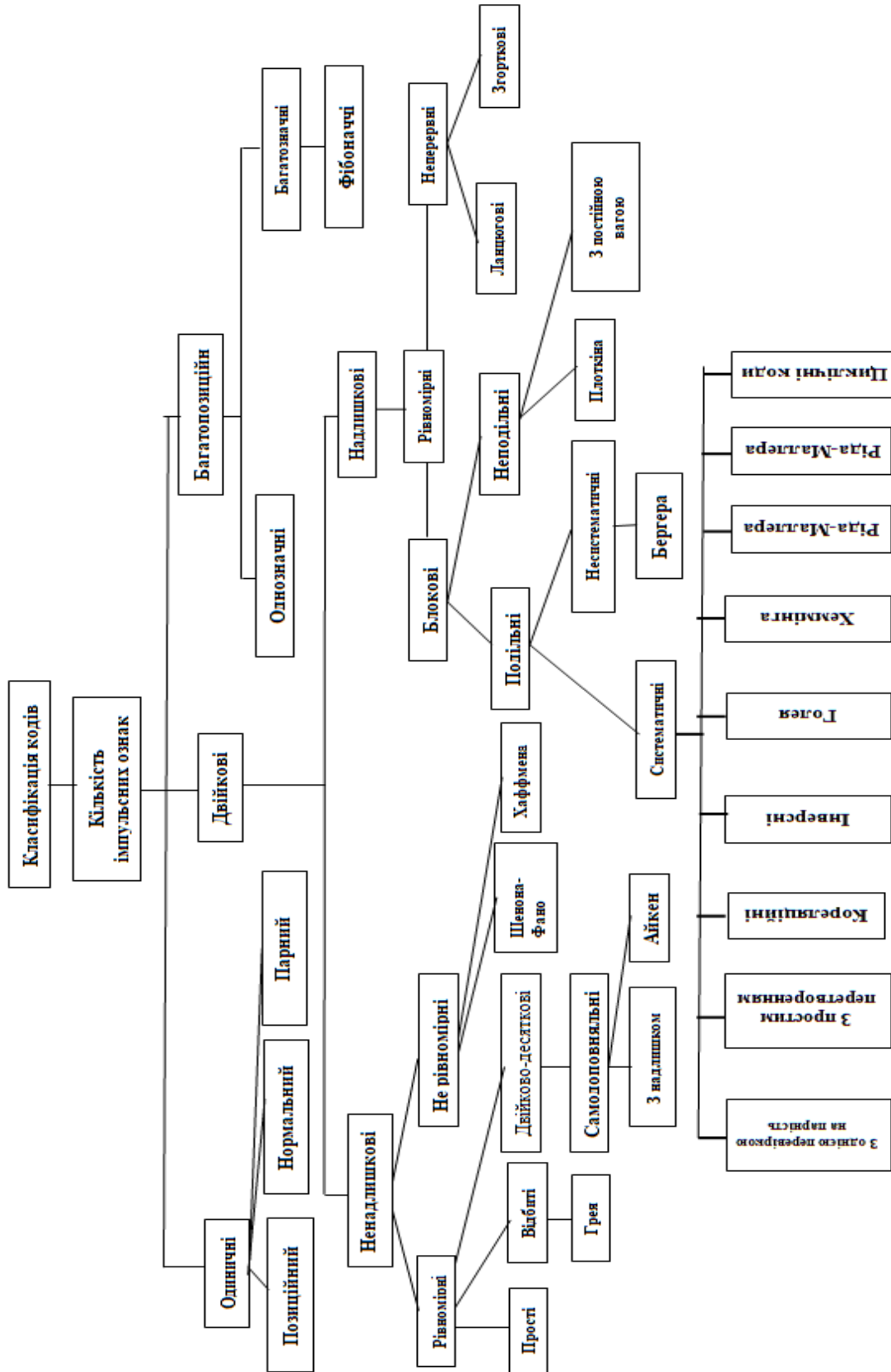


Рисунок 1 – Класифікаційна модель відомих кодів

КОД ЕЛАЙЄСА ТА МОДИФІКОВАНИЙ КОД ЕЛАЙЄСА

Найперший ітеративний циклічний код запропонував Елайєс [18]. В цьому коді $(n \times m)$ -розрядне кодове слово записується у вигляді $(n \times m)$ -матриці, в якій використовуються перевірочні рівняння по парності по рядках та по стовпцям. Декодування починають відразу, не чекаючи надходження всього блока інформації. Так перевірка по парності кодового слова в послідовному форматі дозволяє лише виявити помилки непарної кратності, тоді як перевірки по парності в матричному форматі дозволяють вже виправити одиночні помилки і виявити помилки подвійної та непарної кратності [7].

На практиці існують багато застосувань, коли потрібно швидко декодування для виправлення помилок малої кратності. Цю задачу можна розв'язати за допомогою модифікації коду Елайєса. Такий код відрізняється від класичного коду Елайєса заміною однією з перевірок парності на контрольну суму CRC (Cyclic redundancy check) [19]. Доцільно замінити на CRC ту перевірку, яка містить більше елементів. Як відомо, CRC самостійно виявляє всі одиночні помилки та всі інші помилки з ймовірністю

$$P=2^{-S} \quad (2)$$

де P – ймовірність виявлення помилки, S – ступінь контрольного полінома, який використовується для обчислення контрольної суми [19].

Отже, поєднання CRC і коду Елайєса дозволяє підвищити корегувальну здатність нового коду, який є модифікованим кодом Елаєса [20]. Для наочності корегуючі властивості кодів Елайєса у порівнянні з відомим кодом Хеммінга представлено у табл. 1.

Таблиця 1 – Корегуюча властивість кодів Елайєса

Типи помилок	Класичний код Елайєса	Модифікований код Елайєса	Код Хеммінга
Одиночні помилки	виправляються	виправляються	виправляються
Подвійні помилки в рядках	виявляються	виправляються	виявляються
Подвійні помилки в стовпцях	виявляються	виявляються	-
Потрійні помилки в рядках	виявляються	виправляються	-
Потрійні помилки в стовпцях	виявляються	виявляються	-

Отже, модифікований код Елайєса у порівнянні з відомим класичним кодом Елайєса та кодом Хеммінга дозволяє виправляти потрійні помилки в рядках корегуючої матриці та виявляти потрійні помилки в стовпцях корегуючої матриці, що є його перевагою, оскільки це підвищує надійність та завадостійкість у таких задачах, як обробка сигналів у критичних системах [15].

ОДИНИЧНІ КОДИ

На рис. 1 у класифікаційній моделі наведено три типи відомих одиничних кодів, а саме одиничний позиційний код, одиничний нормальний код [16] та одиничний парний код. Для одиничних кодів кодові комбінації a_1, a_2, \dots, a_n , де n – розрядність подання кодового слова [21] має вигляд:

- для одиничного позиційного коду:

$$\begin{aligned} a_1 &= 100\dots 0, \\ a_2 &= 010\dots 0, \\ &\dots \\ a_n &= 000\dots 1; \end{aligned} \quad (3)$$

- для одиничного нормального коду:

$$\begin{aligned} a_1 &= 100\dots 0, \\ a_2 &= 110\dots 0, \\ &\dots \\ a_n &= 111\dots 1; \end{aligned} \quad (4)$$

- для одиничного парного коду:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1100\dots 00, \\ a_2 &= 0110\dots 00, \\ &\dots \end{aligned} \quad (5)$$

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

$$n_n = 0000...11;$$

Серед наведених трьох кодів еквідистантним, тобто здатним виявляти одиночні помилки, є тільки одиничний позиційний код, оскільки відстань Хеммінга між будь-якими двома його кодовими комбінаціями дорівнює 2 [21].

Крім того, одиничний позиційний код належить до циклічних кодів, оскільки для будь-якої його кодової комбінації виконується циклічна перестановка на відмінну від одиничного нормального коду, оскільки внаслідок циклічної перестановки його кодового слова отримують код, який не належить даному коду. Обидва коди є рівноважними та рівномірними, оскільки всі їхні кодові слова мають однакову довжину. Крім того вони є неподільними та несистематичними, оскільки в будь-якому кодовому слові не виділяють окремо перевіірочні символи, хоча надлишковість даних кодів є значною [6, 16].

У табл. 2 наведено порівняльний аналіз одиничних кодів: позиційного та нормального з кодом Хеммінга за такими характеристиками як блокова довжина, кодова попарна відстань, перевіірочна матриця, контролеспроможність [21].

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз одиничних кодів

Характеристики	Одиничний позиційний код	Одиничний нормальний код	Код Хеммінга
Блокова довжина n	Одинична позиція інформаційна	Одиничні позиції інформаційні	$n=2^r-1$ r – перевіірочні позиції $k=n-r$ k – інформаційні позиції
Кодова попарна відстань	$d=2; d=const$	$d_{min}=1$	$d_{min}>2$
Перевіірочна матриця	Відсутня, код нелінійний	Відсутня, код нелінійних	Існує, код лінійний
Контролеспроможність	Виявляються і виправляються одиночні помилки	Не виявляються навіть одиночні помилки	Виправляються одиночні помилки і виявляються подвійні

З даної таблиці видно що одиничний позиційний код здатен виявляти та виправляти одиночні помилки у послідовності кодових комбінацій, що запобігає виникненню процесу «гонитви сигналів» при спрацюванні пристроїв керування, що, у свою чергу, забезпечує завадостійкість в автономних блоках керування мобільних роботів [11,12].

ВИСНОВКИ

1. Аналіз відомих корегуючих кодів показав, що завадостійкість є критичною властивістю для багатьох сучасних систем зберігання, передачі та оброблення кодованих даних. Високі вимоги до надійності та швидкості передачі даних у таких областях як бездротові комунікації, зберігання даних, цифрове телебачення та автономне керування мобільних роботів приводять до постійного вдосконалення корегуючих кодів.
2. Запропоновано розширений варіант класифікаційної моделі відомих кодів за базовими ознаками алгебраїчної теорії кодування, який доповнено серед одиничних кодів одиничним парним кодом, серед багатозначних кодів кодом Фібоначчі та серед циклічних кодів модифікованим кодом Елайеса.
3. Розглянуто корегуючі властивості модифікованого коду Елайеса та наведено порівняльну характеристику з кодом Хеммінга, що показало здатність модифікованого коду Елайеса виявляти та виправляти потрібні помилки у корегуючій матриці, що забезпечує надійність у процесі обробки сигналів, наприклад, при передачі даних у критичних системах.
4. Розглянуто одиничний позиційний та одиничний нормальний коди, наведено порівняльну характеристику їх корегуючих властивостей з кодом Хеммінга, що показало здатність одиничного позиційного коду виявляти та виправляти одиночні помилки, що знайде ефективне застосування в автономних блоках керування мобільними роботами, забезпечуючи їх завадостійкість проти «гонитви сигналів».

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

5. Отже, розвиток корегуючих властивостей завадостійких кодів спрямовано на пошук нових методів підвищення надійності, ефективності та швидкості передачі даних, щоб відповідати зростаючим вимогам сучасних обчислювальних засобів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жураковський Ю.П., та Полторак В.П., *Теорія інформації та кодування*. Київ, Україна: Вища школа, 2001.
2. Азаров О.Д., Гарнага В.А., Клятченко Я.М., та Тарасенко В.П., *Комп'ютерна схемотехніка*. Підручник. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2018.
3. Adams S.S., *Introduction to Algebraic Theory*. 2008, 67p.[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://mirmillion.free.fr/Efrei.pdf>.
4. Neubauer A., Freudenberger J.and.Kuhn V., *Coding Theory: Algorithms, Architectures and Applications*. Chichester, England: Willy-interscience, 2007.
5. Бабич М.П., та Жуков А.І., *Комп'ютерна схемотехніка*. Навч.посібник. Київ, Україна: «МК-Пресс», 2004.
6. Berlekamp E., *Algebraic Coding Theory*. New York: McGraw-Hill, 1968.
7. Семеренко В.П., *Теорія циклічних кодів на основі автоматних моделей*. Монографія. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.
8. Лужецький В.А., *Високонадійні математичні Фібоначчі-процесори*. Монографія. Вінниця, Україна: "УНІВЕРСУМ - Вінниця", 2000.
9. Азаров О.Д., *Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення*. Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2004.
10. Азаров О.Д., *Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі систем числення з ваговою надлишковістю*. Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2010.
11. Грозмані Я, Майдан П., Макаришкін Д., Соколан К., та Радельчук Г., "Моделювання автоматичної системи керування автономним мобільним роботом", *Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, вип.4, с.240-244. 2023.
12. Цмоць І.Г., Теслюк В.М., Опотяк Ю.В., Парцей Р.В. та Зінько Р.В "Базова архітектура мобільної робототехнічної платформи з інтелектуальною системою управління рухом і захистом передачі даних", *Український журнал інформаційних технологій*, т. 3, № 2, с. 74–80. 2021.
13. Metzner J. J. "On Correcting Bursts (and Random Errors) in Vector Symbol (n, k) Cyclic Codes", *Trans. Inform. Theory*, Vol. 54, No 4. 2008.
14. Semerenko V. P. , "Estimation of the correcting capability of cyclic codes based on their automation models", *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, с.16-24. 2015.
15. Costello D. J., Hagenauer J., Imai H, and Wicker S.B., "Applications of error-control coding". *Transactions on Information Theory*, с.2531 – 2560. 1998.
16. Кожем'яко В.П., Мартинюк Т.Б., Дмитрук В.В., та Власійчук В.В., "Класифікація одиничних кодів", *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №1 (11), с. 36-42. 2006.
17. Слюсар В.І., "Синтез LDPC та полярних кодів на основі матриць", *Розвиток науки, освіти та бізнесу*, с.64-79. 2020.
18. Березюк Н.Т., *Кодування інформації*. Харків, Україна: Вища школа, 1978.
19. Семеренко В. П. "Теорія і практика CRC кодів: нові результати на основі автоматних моделей" *Східно-Європейський журнал передових технологій*, с.38-47. 2015.
20. Войналович О., "Модифікація ітеративних методів декодування завадостійких кодів", на *XII міжнарод. наук.-практ. конф. Інтернет-Освіта-Наука*, Вінниця, 2020, с. 107-108.
21. Мартинюк Т., Кожем'яко А., Бортник Г. та Войналович О. "Аналіз особливостей аналого-цифрового перетворення «тривалість-код»", *Вісник Хмельницького національного університету*, т.1, №1, с. 135-138. 2023.

REFERENCES

1. Zhurakovskiy Y.P. and Poltorak V.P., *Theory of information and coding*. Kyiv, Ukraine: Higher School, 2001.
2. Azarov O.D., Garnaga V.A., Klyatchenko Y.M., and Tarasenko V.P., *Computer circuit engineering*. Textbook. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2018.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

3. Adams S.S., Introduction to Algebraic Theory. 2008, p. 67 [Electronic resource]. – Access mode: <http://mirmillion.free.fr/Efrei.pdf>.
4. Neubauer A., Freudenberger J. and Kuhn V, Coding Theory: Algorithms, Architectures and Applications. Chichester, England: Willy-interscience, 2007.
5. Babich M.P. and Zhukov A.I., Computer circuit engineering. Training manual. Kyiv, Ukraine: MK-Press, 2004.
6. Berlekamp E., Algebraic Coding Theory. New York: McGraw-Hill, 1968.
7. Semerenko V.P., Theory of cyclic codes based on automatic models. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2015.
8. Luzhetsky V.A., Highly reliable mathematical Fibonacci processors. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: "UNIVERSUM - Vinnytsia", 2000.
9. Azarov O.D., Fundamentals of the theory of analog-digital conversion based on redundant positional counting systems. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: UNIVERSUM, 2004.
10. O.D. Azarov, Bit-by-bit analog-to-digital conversion based on counting systems with weight redundancy. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: UNIVERSUM, 2010.
11. Ya. Grozmani, P. Maidan, D. Makaryshkin, K. Sokolan, and G. Radelchuk, "Modeling of the automatic control system of an autonomous mobile robot", Measuring and computing technology in technological processes, issue 4, p. 240-244 . 2023.
12. Tsmots I.G., Teslyuk V.M., Opotyak Y.V., Partsei R.V. and. R.V. Zinko "Basic architecture of a mobile robotics platform with an intelligent motion control system and data transmission protection", Ukrainian Journal of Information Technologies, vol. 3, no. 2, p. 74–80. 2021.
13. Metzner J. J. "On Correcting Bursts (and Random Errors) in Vector Symbol (n, k) Cyclic Codes", Trans. Inform. Theory, Vol. 54, No. 4. 2008.
14. Semerenko V. P., "Estimation of the correcting capability of cyclic codes based on their automation models", Eastern European Journal of Enterprise Technologies, c.16-24. 2015.
15. Costello D.J., Hagenauer J., Imai H., and Wicker S.B., "Applications of error-control coding". Transactions on Information Theory, c.2531 – 2560. 1998.
16. Kozhemyako V.P., Martynyuk T.B., Dmytruk V.V., and Vlasichuk V.V., "Classification of unit codes", Optical-electronic information and energy technologies, No. 1 (11), p. . 36-42. 2006.
17. V.I. Slyusar, "Synthesis of LDPC and polar codes based on matrices", Development of science, education and business, p.64-79. 2020.
18. N.T. Berezyuk, Coding of information. Kharkiv, Ukraine: Higher School, 1978.
19. Semerenko V.P. "Theory and practice of CRC codes: new results based on automatic models" Eastern European Journal of Advanced Technologies, c.38-47. 2015.
20. Voinalovich O., "Modification of iterative methods of decoding interference-resistant codes", at the XII International. science and practice conf. Internet-Education-Science, Vinnytsia, 2020, p. 107-108.
21. Martyniuk T., Kozhemyako A., Bortnyk G. and Voinalovich O. "Analysis of the characteristics of analog-digital conversion "duration-code", Bulletin of the Khmelnytskyi National University, vol. 1, No. 1, p. 135-138. 2023.

Надійшла до редакції 15.05.2024 року

МАРТИНЮК ТЕТЯНА БОРИСІВНА – д.т.н., професор кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com](mailto:martyniuk.t.b@gmail.com)

ВОЙНАЛОВИЧ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ – аспірант факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [e-mail: sashavoinalovich@gmail.com](mailto:sashavoinalovich@gmail.com)

T.B.MARTYNIUK, O.Yu. VOINALOVYCH

CLASSIFICATION MODEL OF DIGITAL CODING METHODS

Vinnytsia National Technical University