

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЯРЕЩЕНКО ВЛАДИСЛАВ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.391

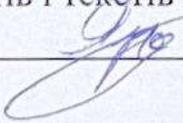
ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ПОБУДОВИ КОДІВ ОДИНИЧНОЇ ВІДСТАНІ ДЛЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ
СИСТЕМ**

172 – Телекомунікації та радіотехніка
17 – Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


В.В. Ярещенко

Науковий керівник
ІНДИК Сергій Володимирович
кандидат технічних наук, доцент
КОСЕНКО Віктор Васильович
доктор технічних наук, професор

Харків 2026

АНОТАЦІЯ

Ярещенко В.В. Методи побудови кодів одиничної відстані для енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» – Український державний університет залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, Харків, 2026.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення науково-практичної задачі підвищення ефективності обробки інформації в телекомунікаційних системах.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем із застосуванням збалансованих кодів одиничної відстані.

Для досягнення мети в дисертаційній роботі вирішувались наступні завдання:

- проаналізувати існуючі методи підвищення ефективності та достовірності обробки інформації в телекомунікаційних системах,
- розробити метод побудови кодів одиничної відстані на основі моделей графів,
- розробити метод ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані,
- розробити метод конструктивного перерахування кодів одиничної відстані,
- розробити програмно-апаратні засоби для автоматизації дослідження й побудови кодів,
- провести порівняльне дослідження ефективності розроблених методів побудови кодів одиничної відстані.

Об'єкт дослідження – процеси кодування інформації в телекомунікаційних системах.

Предмет дослідження – методи й програмно-апаратні засоби побудови

кодів одиначної відстані з покращеними властивостями збалансованості.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи. У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання, що полягає у підвищенні ефективності обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем із застосуванням збалансованих кодів одиначної відстані. За результатами дослідження отримано такі наукові результати:

- вперше розроблено метод ієрархічної класифікації кодів одиначної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності відносно заданої для кожного ієрархічного рівня групи перетворень та визначаються типові представники для кожного класу еквівалентності. Застосування методу ієрархічної класифікації дозволяє спростити аналіз множин кодів, досліджуючи властивості типових представників окремих класів еквівалентності.

- вперше розроблено метод конструктивного перерахування кодів одиначної відстані, заснований на визначенні інваріантів та генерації системи різних типових представників, що дозволяє формувати та аналізувати коди одиначної відстані з заданими властивостями збалансованості без повного перебору варіантів, спрощуючи задачу вибору оптимального кодування.

- отримав подальшого розвитку метод побудови кодів одиначної відстані, що базується на моделі гіперкуба та пошуку гамільтонового шляху в гіперкубі, який дозволяє формувати множини кодів одиначної відстані заданої довжини.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає:

1) у розробленні алгоритму та програмної реалізації методу ієрархічної класифікації кодів одиначної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності, зменшуючи кількість варіантів, що аналізуються, на 97-99% за рахунок використання тільки типових представників та спрощуючи відбір кодів із заданими властивостями;

2) розробленні алгоритму та програмної реалізації методу конструктивного перерахування кодів одиначної відстані на основі визначення інваріантів та формування системи типових представників, який дозволяє формувати коди, що мають покращене значення збалансованості у порівнянні з

класичним кодом Грея у 2,5-6 разів залежно від розрядності коду;

3) розробленні алгоритму та програмної реалізації методу побудови кодів одиничної відстані на основі графових моделей гіперкуба, який дозволяє формувати всі можливі коди одиничної відстані довжини n .

Основна частина дисертації складається зі вступу, чотирьох розділів, розбитих на підрозділи, висновків, списку використаної літератури, додатків.

Перший розділ дисертації присвячено розгляду стану проблеми підвищення ефективності та достовірності обробки інформації в телекомунікаційних системах за рахунок використання кодів Грея. Проведений аналіз показав, що коди такого виду широко застосовуються на практиці завдяки властивості одиничної відстані між суміжними кодовими словами. Однак, такі коди характеризуються низькою збалансованістю, що обмежує їх використання. У зв'язку з цим актуальною є задача розробки альтернативних методів побудови кодів одиничної відстані з покращеними властивостями.

У другому розділі розглянуто комбінаторне кодування систем цифрової обробки інформації. Виявлено, що попри існування альтернативних кодів Грея, відсутній загальний систематичний підхід до їх побудови та аналізу. Розроблено метод побудови кодів одиничної відстані, що базується на моделі n -вимірного гіперкуба та алгоритмі пошуку гамільтонового шляху в графі. Запропонований метод дозволяє формувати множини кодів одиничної відстані, проводити порівняльний аналіз та відбирати варіанти з характеристиками, що відповідають заданим критеріям.

Досліджено властивості кодів з одиничною відстанню. Визначені властивості множини кодових слів, структура коду, характеристики коду, канонічна форма. На множині кодів введені еквівалентні перетворення.

Для подальшого дослідження коди одиничної відстані розбиваються на класи еквівалентності щодо заданої групи перетворень та досліджуються властивості представників класів.

Розроблено метод ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності відносно заданої для

кожного ієрархічного рівня групи перетворень та визначаються типові представники для кожного класу еквівалентності. Застосування методу ієрархічної класифікації дозволяє спростити аналіз множин кодів, досліджуючи властивості типових представників окремих класів еквівалентності.

У третьому розділі розглянуто метод перерахування кодів одиничної відстані, при якому виникає необхідність розробки конструктивних засобів опису класів комбінаторних множин, що мають необхідні властивості. Показано, що для побудови комбінаторних множин зі складною структурою доцільним є застосування методів теорії перерахування.

Розроблено метод конструктивного перерахування кодів одиничної відстані, заснований на визначенні інваріантів та генерації системи різних типових представників, що дозволяє формувати та аналізувати коди одиничної відстані з заданими властивостями збалансованості без повного перебору варіантів, спрощуючи задачу вибору оптимального кодування. Наведено приклади типових представників для кодів одиничної відстані.

В четвертому розділі проведено порівняння властивостей кодів отриманих в результаті використання запропонованих методів з кодами, що є найбільш поширеними в телекомунікаційних системах. Виявлено, що застосування запропонованих методів для побудови кодів одиничної відстані дозволяє покращити значення збалансованості порівняно з відомими кодами. Зокрема, для коду довжиною $n = 3$ значення показника збалансованості покращується у 2,5 рази, для коду довжиною $n = 4$ – у 6 разів відносно відомих кодів.

Запропонований метод ієрархічної класифікації дозволяє суттєво зменшити кількість варіантів кодових послідовностей, що потребують аналізу, при цьому зберігаючи основні властивості кодів одиничної відстані. Для коду довжиною $n = 3$ обсяг кодів, що розглядаються, зменшується на 97,9%; при $n = 4$, розмір множини кодових послідовностей зменшується на 99,7%. Подальше узагальнення до рівня структурних класів зменшує кількість аналізованих варіантів до 18, забезпечуючи скорочення на 99,9%.

Розроблено комп'ютерні програми «Інструмент генерації кодів одиничної відстані», «Програма формування кодів із заданими властивостями», «System of distinct representatives», «Програма визначення еквівалентності кодів», які є інструментом для розробника інформаційних систем. Програми зареєстровані в Державній організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

Запропоновано апаратні засоби для автоматизації дослідження й розробки кодів із заданими властивостями «Перетворювач кодів», «Формувач збалансованих кодів», «Генератор еквівалентних кодів», «Аналізатор кодів». На розроблені апаратні засоби отримані патент України на корисну модель.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертації впроваджені в практику підприємств і організацій: Державне підприємство «Південний державний проєктно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості», підприємство ПП «Софтвеа Експерт», Український державний університет залізничного транспорту та Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Ключові слова: телекомунікаційні системи, класифікація, кодування, коди одиничних відстаней, код Грея, збалансований код Грея, кодування з низьким енергоспоживанням, енергоефективне кодування, двійково-десятковий код, перетворювачі кодів, комутаційна активність, розсіювання потужності, енергонезалежна пам'ять, абсолютні енкодери, еквівалентність, перерахування.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ

Публікації здобувача за темою дисертації, в яких опубліковані основні наукові результати:

1. Yareshchenko V. Coding to reduce the energy of data movement / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. праць. – Полтава : ПНТУ, 2023. – Т. 1 (71). – С. 159–162. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.159>.

2. Yareshchenko V. Unit-distance codes enumeration / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Advanced Information Systems. – 2024. – Vol. 8, No. 4. – P. 41–48. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.06>.

3. Ярещенко В. Метод кодування з низьким енергоспоживанням у системах передачі даних / В. Ярещенко, В. Косенко // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2024. – Т. 3 (29). – С. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.121>.

4. Yareschenko V. Method of generating energy efficient codes / V. Yareschenko, V. Kosenko // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2025. – Т. 1 (79). – С. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.213-217>.

Патенти України на корисну модель:

5. Патент України на корисну модель № 153728, МПК Н 03 М 7/16. Перетворювач кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 01178, опубл. 16.08.2023, бюл. № 33. – 3 с.

6. Патент України на корисну модель № 155281, МПК Н 03 М 7/16. Формувач збалансованих кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 03583, опубл. 8.02.2024, бюл. № 2. – 3 с.

7. Патент України на корисну модель № 155449, МПК Н 03 М 7/04. Генератор еквівалентних кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 04388, опубл. 28.02.2024, бюл. № 9. – 3 с.

8. Патент України на корисну модель № 155648, МПК Н 03 М 13/01. Аналізатор кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 04863, опубл. 20.03.2024, бюл. № 12. – 3 с.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір:

9. Комп'ютерна програма «Інструмент генерації кодів одичної відстані» / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 122830. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 11.01.2024 р.

10. Комп'ютерна програма «Програма формування кодів із заданими властивостями» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 128425. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 24.07.2024 р.

11. Комп'ютерна програма «System of distinct representatives» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 129600. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 3.09.2024 р.

12. Комп'ютерна програма «Програма визначення еквівалентності кодів» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 129601. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 3.09.2024 р.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

13. Ярещенко В. В. Кодування для зменшення енергії руху даних / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: зб. наук. праць з матеріалами XIII Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку – Харків – Жиліна, 26–27 квітня 2023 р.). – Харків, 2023. – Т. 1. – С. 49.

14. Ярещенко В. В. Метод формування та оцінки енергоефективних кодів / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні

комплекси (ІРТК-2023): зб. наук. праць з матеріалами XVI Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 23–24 травня 2023 р.). – Київ: НАУ, 2023. – С. 352–354.

15. Косенко В. В. Коди одиничної відстані / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко // Проблеми інформатизації: зб. наук. праць з матеріалами XI-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку – Харків – Бельсько-Бяла, 16–17 листопада 2023 р.). – Харків: Impress, 2023. – Т. 1. – С. 67.

16. Ярещенко В. В. Кодування з низьким енергоспоживанням / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: зб. наук. праць з матеріалами IX Всеукр. наук.-практ. конф. (Полтава, 10 листопада 2023 р.). – Полтава: НУПІ, 2023. – С. 67–68. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/12046>.

17. Ярещенко В. В. Граф-орієнтований алгоритм формування енергоефективних кодів / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: зб. наук. праць з матеріалами XIII Міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 23–24 травня 2024 р.). – Чернігів, 2024. – Т. 2. – С. 254.

18. Ярещенко В. В. Інваріантний підхід до класифікації двійкових кодів / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Зб. наук. праць з матеріалами 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 14–23 травня 2024 р.). – Полтава: НУПІ, 2024. – Т. 1. – С. 70–71. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/15765>.

19. Yareshchenko V. Equivalence of combinatorial configurations / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами: зб. наук. праць з матеріалами Міжнар. наук.-практ. конф. (Коблево, 9–13 вересня 2024 р.). – Харків: ХНУРЕ, 2024. – С. 46–48. DOI: <https://doi.org/10.30837/ISRRM.2024.09>.

20. Ярещенко В. В. Каталоги кодів з одиничною відстанню / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи: зб. наук. праць з матеріалами III Міжнар. наук. конф. (Ужгород, 4 жовтня 2024 р.). – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. – С. 141–146.

21. Ярещенко В. В. Типові структури кодів одиничної відстані / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Наукові відкриття та фундаментальні наукові дослідження: світовий досвід: зб. наук. праць з матеріалами V Міжнар. наук. конф. (Полтава, 8 листопада 2024 р.). – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. – С. 270–274.

22. Kosenko V. V. A system of typical representatives of binary-decimal codes with a unit distance / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko // Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society : Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference (Dnipro, November 7–8, 2024). – Dnipro : FOP Marenichenko V.V., 2024. – P. 20–22.

23. Yareshchenko V. V. Software tools for codes with specified properties research and development / V. V. Yareshchenko, V. V. Kosenko // Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference (Dnipro, November 14–15, 2024). – Dnipro : FOP Marenichenko V.V., 2024. – P. 50–51.

24. Yareshchenko V. Alternative Gray codes / V. Yareshchenko // Проблеми інформатизації: зб. наук. праць з матеріалами. XI-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку – Харків – Жиліна, 21–22 листопада 2024 р.). – Харків, 2024. – Т. 2. – С. 38.

ABSTRACT

Yareshchenko V. V. Methods of constructing unit-distance codes for energy-efficient equipment of telecommunications systems. – Qualifying scientific paper on the rights of the manuscript.

The dissertation submitted in fulfilment of the candidate of technical sciences degree on specialty 172 “Telecommunications and Radio Engineering” – Ukrainian State University of Railway Transport of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2026.

The dissertation aims to solve the scientific and practical problem of improving the efficiency of information processing in telecommunications systems.

The aim of the dissertation is to improve the efficiency of information processing in energy-efficient telecommunications system equipment using balanced single-distance codes.

To achieve the aim, the following tasks were solved in the dissertation:

- analyze existing methods for improving the efficiency and reliability of information processing in telecommunications systems,
- develop a method for constructing unit-distance codes based on graph models,
- develop a method for hierarchical classification of unit-distance codes,
- develop a method for constructive enumeration of unit-distance codes,
- develop software and hardware tools for automating the analysis and construction of codes,
- conduct a comparative assessment of the effectiveness of the developed methods for constructing unit-distance codes.

The object of the dissertation is the processes of information encoding in telecommunication systems.

The subject of the dissertation is methods and software and hardware tools of constructing unit-distance codes with improved balance characteristics.

The scientific novelty of the dissertation results. The dissertation solves a scientific and applied problem, which is to improve the efficiency of information

processing in energy-efficient equipment of telecommunications system using balanced unit-distance codes. The research yielded the following scientific results:

- for the first time, a method of hierarchical classification of unit-distance codes has been developed, in which a set of objects is divided into equivalence classes relative to a group of transformations specified for each hierarchical level, and typical representatives are determined for each equivalence class. The use of the hierarchical classification method simplifies the analysis of code sets by examining the properties of typical representatives of individual equivalence classes.

- for the first time, a method for constructive enumeration of unit-distance codes has been developed, based on the determination of invariants and the generation of a system of different typical representatives, which allows the construction and analysis of unit-distance codes with specified balance characteristics without a full search of variants, simplifying the task of selecting the optimal encoding.

- the method of constructing unit-distance codes based on the hypercube model and the search for a Hamiltonian path in the hypercube, which allows the formation of sets of unit-distance codes of a given length, has been further developed.

The practical significance of the obtained research results is:

1) development of an algorithm and software implementation of the method of hierarchical classification of unit-distance codes, in which a set of objects is divided into equivalence classes, reducing the number of variants analyzed by 97-99% by using only typical representatives and simplifying the selection of codes with specified properties;

2) development of an algorithm and software implementation of the method for constructive enumeration of unit-distance codes based on the determination of invariants and the generation of a system of typical representatives, which allows the construction and analysis of codes that have an improved balance characteristics compared to the classic Gray code by 2.5-6 times depending on the code bit length;

3) development of an algorithm and software implementation of the method for constructing unit-distance codes based on graph models of a hypercube, which allows to construct all possible unit-distance codes of length n .

The main part of the dissertation consists of an introduction, four chapters divided into subsections, conclusions, a list of references, and appendices.

The first chapter is dedicated to the study of the problem of improving the efficiency and reliability of information processing in telecommunication systems by using Gray codes. The analysis conducted that codes of this type are widely used in practice due to the property of unit-distance between adjacent code words. However, such codes are characterized by low balance, which limits their use. In this regard, it is essential to develop alternative methods for constructing unit-distance codes with improved characteristics.

The second chapter covers combinatorial coding of digital information processing systems. It has been found that despite the existence of alternative Gray codes, there is no general systematic approach to their construction and analysis. A method for constructing unit-distance codes based on an n -dimensional hypercube model and a Hamilton path search algorithm in a graph has been developed. The proposed method allows forming sets of unit-distance codes, performing comparative analysis, and selecting variants with characteristics that satisfy the given criteria.

The properties of unit-distance codes are investigated. The properties of the set of code words, the code structure, the code characteristics, and the canonical form are determined. Equivalent transformations are introduced on the set of codes.

For further study, unit-distance codes are divided into equivalence classes with relative to a group of transformations, and the properties of class representatives are studied.

A method of hierarchical classification of unit-distance codes is proposed, in which a set of objects is divided into equivalence classes relative to a group of transformations specified for each hierarchical level, and typical representatives are determined for each equivalence class. The use of this method of hierarchical classification simplifies the analysis of code sets by examining the properties of typical representatives of individual equivalence classes.

The third chapter considers the method of enumerating unit-distance codes, which necessitates the development of constructive means of describing classes of

combinatorial sets with the required properties. It has been shown that the methods of enumeration theory are applicable for constructing combinatorial sets with complex structures.

The method of constructive enumeration of unit-distance codes has been developed, based on the determination of invariants and the generation of a system of different typical representatives, which allows the construction and analysis of unit-distance codes with specified balance characteristics without a full search of variants, simplifying the task of selecting the optimal coding. Examples of typical representatives for unit-distance codes are provided.

The fourth chapter conducts a comparative analysis of the properties of codes obtained using the proposed methods with the codes that are widely used in telecommunications systems. It was found that the use of the proposed methods for constructing unit-distance codes improves the balance characteristics compared to known codes. In particular, for a code with a length of $n = 3$, the balance value improves by 2.5 times, and for a code with a length of $n = 4$, it improves by 6 times compared to known codes.

The proposed method of hierarchical classification allows to significantly reduce the number of code sets that need to be analyzed, while preserving the main characteristics of unit-distance codes. For a code length of $n = 3$, the number of codes considered is reduced by 97.9%; for $n = 4$, the size of the set of code sequences is reduced by 99.7%. Further generalization to the level of structural classes reduces the number of variants analyzed to 18, providing a decrease of 99.9%.

The computer programs “Tool for generating unit distance codes”, “Program for generating codes with specified properties”, “System of distinct representatives”, “Program for determining the equivalence of codes” were developed, which are tools for information system developers. The programs are registered with the State Organization “Ukrainian National Office of Intellectual Property and Innovations”.

The following tools have been recommended for automating the research and development of codes with specified properties: “Code Converter”, “Balanced Code Generator”, “Equivalent Code Generator”, “Code Analyzer”. A utility model patent of

Ukraine was obtained for the developed hardware.

The results of the theoretical and experimental research of the dissertation have been implemented in the practice of enterprises and organizations: at the State Enterprise “Southern State Design and Research Institute of Aviation Industry,” at the “Software Expert” enterprise, at the Ukrainian State University of Railway Transport and the National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”.

Keywords: telecommunication systems, classification, coding, unit distance codes, Gray code, balanced Gray code, low power coding, energy efficient coding, binary-decimal code, code converters, switching activity, power dissipation, non-volatile memory, absolute encoders, equivalence, enumeration.

LIST OF THE PUBLICATIONS ON THE SUBJECT

Publications of the applicant on the topic of the dissertation, in which the main scientific results are published:

1. Yareshchenko V. CODING TO REDUCE THE ENERGY OF DATA MOVEMENT / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Control, Navigation and Communication Systems. Poltava: PNTU, 2023. – VOL. 1 (71). – P. 159-162. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.159>.

2. Yareshchenko V., Kosenko V. UNIT-DISTANCE CODES ENUMERATION // Advanced Information Systems. Kharkiv: KhPI, 2024. – VOL. 8 (4). – P. 41–48. – doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.06>.

3. Vladyslav, Y., Kosenko, V. LOW-POWER CODING METHOD IN DATA TRANSMISSION SYSTEMS // Innovative technologies and scientific solutions for industries. Kharkiv, 2024. – VOL. 3 (29). – P. 121–129. – doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.121>.

4. Yareshchenko V. METHOD OF GENERATING ENERGY EFFICIENT CODES / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Control, Navigation and Communication Systems. Poltava: PNTU, 2025. – VOL. 1 (79). – P. 213–217. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.213-217>.

Utility model patents:

5. Ukraine Utility Model Patent No. 153728, IPC H 03 M 7/16. Code converter / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko. – No. u 2023 01178; publ. 16.08.2023, Bul. No. 33. – 3 p.

6. Ukraine Utility Model Patent No. 155281, IPC H 03 M 7/16. Balanced code shaper / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko. – No. u 2023 03583; publ. 08.02.2024, Bul. No. 2. – 3 p.

7. Ukraine Utility Model Patent No. 155449, IPC H 03 M 7/04. Equivalent code generator / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko. – No. u 2023 04388; publ. 28.02.2024, Bul. No. 9. – 3 p.

8. Ukraine Utility Model Patent No. 155648, IPC H 03 M 13/01. Code analyzer / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko. – No. u 2023 04863; publ. 20.03.2024, Bul. No. 12. – 3 p.

Certificates of copyright registration for a work:

9. Computer program “Program for Unit-distance codes generation” / V. V. Yareshchenko, V. V. Kosenko. Copyright registration certificate No. 122830. – Registered at State Org. “Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations”, 11.01.2024.

10. Computer program “Program for generating codes with specified properties” / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko. Copyright registration certificate No. 128425. – Registered at State Org. “Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations”, 24.07.2024.

11. Computer program “System of distinct representatives” / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko. Copyright registration certificate No. 129600. – Registered at State Org. “Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations”, 03.09.2024.

12. Computer program “Program for determining code equivalence” / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko. Copyright registration certificate No. 129601. – Registered at State Org. “Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations”, 03.09.2024.

Published works of an approbatory nature:

13. Yareshchenko V.V., Kosenko V.V. Coding to reduce the energy of data movement. Thirteenth International Scientific and Technical Conference “Modern Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Means”. Baku – Kharkiv – Zilina, April 26–27, 2023. Vol. 1, p. 49.

14. Yareshchenko V.V., Kosenko V.V. Method of formation and evaluation of energy-efficient codes. Integrated Intellectual Robotic Complexes (IIRTC-2023): Sixteenth International Scientific and Practical Conference – Collection of Scientific Papers. May 23-24, 2023, Kyiv, Ukraine. Kyiv: NAU, 2023. pp. 352-354.

15. Kosenko V. V., Yareshchenko V. V. Unit-distance codes. Problems of Informatization: Abstracts of the 11th International Scientific and Technical Conference, November 16-17, 2023, Baku, Kharkiv, Bielsko-Biala. Vol. 1. Kharkiv: Impress, 2023. p. 67.

16. Yareshchenko V.V., Kosenko V.V. Low power consumption coding. Electronic and Mechatronic Systems: Theory, Innovations, Practice: Collection of Scientific Papers of the 9th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, November 10, 2023. Poltava: National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 2023. pp. 67–68. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/12046>

17. Yareshchenko V.V., Kosenko V.V. Graph-oriented algorithm for generating energy-efficient codes. Complex Quality Assurance of Technological Processes and Systems: Abstracts of the 13th International Scientific and Practical Conference, May 23-24, 2024, Chernihiv. Vol. 2. 2024. p. 254.

18. Yareshchenko V.V., Kosenko V.V. Invariant approach to binary codes classification. Abstracts of the 76th Scientific Conference of Professors, Teachers, Scientific Workers, Postgraduates and Students of the University (Poltava, May 14 – May 23, 2024). Poltava: National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 2024. Vol. 1. pp. 70–71. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/15765>

19. Yareshchenko V.V., Kosenko V.V. Equivalence of combinatorial configurations. International Scientific and Practical Conference “Information Systems in Project and Program Management”, Koblevo, September 9–13, 2024. Collection of

Scientific Papers. Kharkiv: NURE, 2024. pp. 46-48. DOI: <https://doi.org/10.30837/ISRRM.2024.09>

20. Yareshchenko V.V., Kosenko V.V. Catalogs of unit-distance codes. Development of Sciences in the Conditions of New Reality: Problems and Prospects: Collection of Scientific Papers with Materials of the III International Scientific Conference, Uzhhorod, October 4, 2024. Vinnytsia: LLC “UKRLOGOS Group”, 2024. pp. 141-146.

21. Yareshchenko V.V., Kosenko V.V. Typical structures of unit-distance codes. Scientific Discoveries and Fundamental Scientific Research: World Experience: Collection of Scientific Papers with Materials of the V International Scientific Conference, Poltava, November 8, 2024. Vinnytsia: LLC “UKRLOGOS Group”, 2024. pp. 270-274.

22. Kosenko V.V., Yareshchenko V.V. A system of typical representatives of binary-decimal codes with a unit distance. Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference, November 7-8, 2024. Dnipro, Ukraine: FOP Marenichenko V.V. pp. 20-22.

23. Yareshchenko V.V., Kosenko V.V. Software tools for codes with specified properties research and development. Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference, November 14-15, 2024. Dnipro, Ukraine: FOP Marenichenko V.V. pp. 50-51.

24. Yareshchenko V.V. Alternative Gray codes. Problems of Informatization: Abstracts of the 11th International Scientific and Technical Conference (November 21–22, 2024). Vol. 2. Baku – Kharkiv – Zilina, 2024. p. 38.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	28
1.1 Коди одиничної відстані та їх застосування.....	28
1.2. Дослідження у галузі кодування інформації: огляд технологій та патентні дослідження	29
1.3. Покращене кодування з низьким енергоспоживанням для послідовних з'єднань мережі на чіпі	37
1.4. Висновки за розділом 1	40
РОЗДІЛ 2 КОМБІНАТОРНЕ КОДУВАННЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ	42
2.1. Альтернативні коди Грея.....	42
2.2 Графові моделі кодів одиничної відстані	44
2.3 Властивості кодів з одиничною відстанню	54
2.4. Еквівалентні перетворення кодів.....	56
2.5. Ієрархічна класифікація кодів одиничної відстані	67
2.6. Висновки за розділом 2	74
РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТИВНЕ ПЕРЕРАХУВАННЯ КОДІВ ОДИНИЧНОЇ ВІДСТАНІ.....	76
3.1 Метод формування системи різних типових представників	76
3.2 Система типових представників для класів PN-еквівалентності.....	83
3.3 Система типових представників структур кодів одиничної відстані	86
3.4 Система типових представників двійково-десяткових кодів із одиничною відстанню	89
3.5 Висновки за розділом 3	94
РОЗДІЛ 4 ОЦЬЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ І АНАЛІЗУ КОДІВ ОДИНИЧНОЇ ВІДСТАНІ.....	97

4.1 Порівняльна характеристика властивостей відомих кодів з розробленими кодами.....	97
4.2 Комп'ютерна програма «Інструмент генерації кодів одиначної відстані» .	101
4.3 Комп'ютерна програма «Програма визначення еквівалентності кодів»	104
4.4 Комп'ютерна програма «System of distinct representatives».....	105
4.5 Комп'ютерна програма «Програма формування кодів із заданими властивостями»	108
4.6 Апаратні засоби для аналізу та перетворення кодів	110
4.7 Формувач збалансованих кодів	113
4.8 Генератор еквівалентних кодів.....	117
4.9 Аналізатор кодів	122
4.10 Висновки за розділом 4	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	127
ВИСНОВКИ.....	145
ДОДАТОК А.....	148
ДОДАТОК Б.....	154
ДОДАТОК В	159
ДОДАТОК Г.....	167
ДОДАТОК Д.....	172
ДОДАТОК Е	175
ДОДАТОК Ж	180

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Розвиток і впровадження інформаційних технологій є необхідною умовою науково-технічного прогресу суспільства. В телекомунікаційних системах будь-якого призначення, постійно зростає цінність та обсяг інформації, що обробляється. Тому велике значення мають швидкість, інформаційна надійність та енергоспоживання при обробці даних, які визначають ефективність обладнання телекомунікаційних систем.

Процеси обробки інформації в сучасних телекомунікаційних системах супроводжуються помилками, внаслідок різноманітних завад, що знижує достовірність передачі інформації. Одним із способів, що дозволяють підвищити достовірність обробки інформації в телекомунікаційному обладнанні, є застосування кодів, що виявляють і виправляють помилки, наприклад коди Грея.

Сучасні багатоядерні мікропроцесори та системи на кристалі (SoC) використовують мережі на кристалі (NoC) для обміну даними між ядрами та контролерами пам'яті. У таких мережах канали передачі та маршрутизатори споживають значну кількість енергії, причому найбільша частка енергоспоживання всієї мережі пов'язана з активністю перемикання бітів на лініях зв'язку. Одним із підходів до зменшення цих витрат є використання енергоефективних схем кодування, спрямованих на мінімізацію кількості змін бітів при переході між кодовими словами. Класичний код Грея забезпечує зміну тільки одного біту при переході між послідовними словами, однак перемикання зосереджені переважно в окремих розрядах. Це призводить до локалізації перемикань в окремих лініях зв'язку та їх підвищеного енергоспоживання, зростання пікових навантажень і локального перегріву пристрою.

Нові перспективні технології енергонезалежної пам'яті з довільним доступом (NVRAM) поєднують переваги сучасної динамічної пам'яті з довільним доступом (DRAM) (швидкість, побайтна адресація) з перевагами накопичувачів (висока щільність та ємність, збереження даних без живлення). Однак вони характеризуються обмеженим ресурсом перезаписів та

асиметричним енергоспоживанням: операції запису споживають значно більше енергії, ніж операції зчитування. Для керування зносом застосовуються алгоритми вирівнювання навантаження, які поділяють пам'ять на сторінки та ведуть підрахунок кількості операцій запису для кожної сторінки. Сучасні моделі зберігають лічильники записів сторінок в основному блоці пам'яті. Висока частота оновлення цих лічильників призводить до ситуації, коли зміни даних багаторазово відбуваються у межах одного малого діапазону бітів, переважно навколо молодших розрядів. Це спричиняє локальні енергетичні та теплові перевантаження, зменшує загальний ресурс пристрою та негативно впливає на його надійність.

Одним з підходів до вирішення зазначених проблем є застосування збалансованих кодів, що забезпечують мінімальну різницю у кількості перемикань між розрядами кодової послідовності. Збалансовані коди одиничної відстані зберігають властивість однобітових переходів між послідовними кодовими словами, характерну для класичних кодів Грея, при цьому забезпечуючи рівномірний розподіл загальної кількості перемикань між окремими розрядами у повному кодовому циклі. Це дозволяє знижувати пікову комутаційну активність на лініях зв'язку та уникати локальних енергетичних і теплових перевантажень, підвищуючи ефективність і надійність енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем. Розвитку даного напрямку присвячені роботи G. Bhat, C. Savage, A. Kulandai, J. Rose, C. Colbourn.

У зв'язку з цим, актуальною науковою задачею є розробка нових та удосконалення існуючих моделей та методів, пов'язаних із побудовою та класифікацією кодів одиничної відстані, які мають покращені показники збалансованості та дозволяють мінімізувати пікову комутаційну активність, запобігати локальним перевантаженням та підвищувати загальну ефективність обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем із застосуванням збалансованих кодів одиничної відстані.

Для досягнення мети в дисертаційній роботі вирішувались наступні завдання:

- проаналізувати існуючі методи підвищення ефективності та достовірності обробки інформації в телекомунікаційних системах,
- розробити метод побудови кодів одиничної відстані на основі моделей графів,
- розробити метод ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані,
- розробити метод конструктивного перерахування кодів одиничної відстані,
- розробити програмно-апаратні засоби для автоматизації дослідження й побудови кодів,
- провести порівняльне дослідження ефективності розроблених методів побудови кодів одиничної відстані.

Об'єкт дослідження – процеси кодування інформації в телекомунікаційних системах.

Предмет дослідження – методи й програмно-апаратні засоби побудови кодів одиничної відстані з покращеними властивостями збалансованості.

Методи дослідження. Результати дослідження отримані за допомогою теорії комбінаторного аналізу, теорії графів, теорії множин, теорії перерахування, булевої алгебри, системотехніки й програмування. Для побудови графових моделей кодів одиничної відстані використовується теорія графів і теорія множин. Для ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані використовується теорія комбінаторного аналізу й теорія множин. Для конструктивного перерахування кодів одиничної відстані використовуються теорія перерахування, теорія комбінаторного аналізу й теорія множин. При побудові програмно-апаратних засобів для автоматизації процесу аналізу й формування кодів із заданими властивостями використовуються методи

системотехніки й програмування. Для проведення експериментального підтвердження отриманих теоретичних результатів використовувались методи імітаційного моделювання та математичної статистики.

Наукова новизна положень, розроблених особисто здобувачем обумовлена новим підходом до вирішення важливого науково-прикладного завдання, що полягає у підвищенні ефективності обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем із застосуванням збалансованих кодів одиничної відстані.

1) **Вперше розроблено** метод ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності відносно заданої для кожного ієрархічного рівня групи перетворень та визначаються типові представники для кожного класу еквівалентності. Застосування методу ієрархічної класифікації дозволяє спростити аналіз множин кодів, досліджуючи властивості типових представників окремих класів еквівалентності.

2) **Вперше розроблено** метод конструктивного перерахування кодів одиничної відстані, заснований на визначенні інваріантів та генерації системи різних типових представників, що дозволяє формувати та аналізувати коди одиничної відстані з заданими властивостями збалансованості без повного перебору варіантів, спрощуючи задачу вибору оптимального кодування.

3) **Отримав подальшого розвитку** метод побудови кодів одиничної відстані, що базується на моделі гіперкуба та пошуку гамільтонового шляху в гіперкубі, який дозволяє формувати множини кодів одиничної відстані заданої довжини.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджується: коректністю постановки завдань досліджень і теоретичних положень, на яких ґрунтується їхнє рішення з урахуванням загальноприйнятих або обґрунтованих припущень, результатами комп'ютерного моделювання та впровадження запропонованих структур, засобів і методів у науково-дослідний та навчальний процеси.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає:

1) у розробленні алгоритму та програмної реалізації методу ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності, зменшуючи кількість варіантів, що аналізуються, на 97-99% за рахунок використання тільки типових представників та спрощуючи відбір кодів із заданими властивостями.

2) розробленні алгоритму та програмної реалізації методу конструктивного перерахування кодів одиничної відстані на основі визначення інваріантів та формування системи типових представників, який дозволяє формувати коди, що мають покращене значення збалансованості у порівнянні з класичним кодом Грея у 2,5-6 разів залежно від розрядності коду.

3) розробленні алгоритму та програмної реалізації методу побудови кодів одиничної відстані на основі графових моделей гіперкуба, який дозволяє формувати всі можливі коди одиничної відстані довжини n .

Розроблено комп'ютерні програми «Інструмент генерації кодів одиничної відстані», «Програма формування кодів із заданими властивостями», «System of distinct representatives», «Програма визначення еквівалентності кодів. Програми зареєстровані в Державній організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»: свідоцтва № 122830, 128425, 129600, 129601.

Запропоновано апаратні засоби для автоматизації дослідження й розробки кодів із заданими властивостями «Перетворювач кодів», «Формувач збалансованих кодів», «Генератор еквівалентних кодів», «Аналізатор кодів». На розроблені апаратні засоби отримано патенти України на корисну модель № 153728, 155281, 155449, 155648.

Отриманні в роботі результати знайшли практичне впровадження та використання: у Державному підприємстві «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості», на підприємстві ПП «Софтвеа Експерт», а також в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту та

Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Додаток В).

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації, наведені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. В основних роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належать наступні положення: [1] – метод побудови кодів одиначної відстані за допомогою графових моделей; [2] – метод конструктивного перерахування кодів одиначної відстані; [3] – метод ієрархічної класифікації кодів одиначної відстані; [4] – метод формування системи типових представників для різних класів еквівалентності; [5] – структура перетворювача кодів; [6] – структура формувача збалансованих кодів; [7] – структура генератора еквівалентних кодів; [8] – структура аналізатора кодів; [9] – процедура генерації кодів одиначної відстані; [10] – процедура формування кодів із заданими властивостями; [11] – процедура формування системи різних представників; [12] – процедура визначення еквівалентності кодів; [13] – методи аналізу кодів з низьким енергоспоживанням; [14] – інваріантний підхід до класифікації двійкових кодів.

Апробація результатів дисертації. Наведені в дисертаційній роботі наукові і практичні результати доповідалися і обговорювалися на конференціях:

- тринадцята міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління», Баку – Харків – Жиліна, 26–27 квітня 2023 р., дистанційна.

- шістнадцята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2023)», Київ, 23–24 травня 2023 р., дистанційна.

- міжнародна науково-практична конференція «Проблеми інформатизації», Баку – Харків – Бельсько-Бяла, 16–17 листопада 2023 р., дистанційна.

- X Всеукраїнська міжнародна науково-практична конференція НУШП, Полтава, 10 листопада 2023 р., очна.

- XIII міжнародна науково-практична конференція, Чернігів, 23–24 травня 2024 р., дистанційна.

- 76-а наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів НУПІ, Полтава, 14–23 травня 2024 р., очна.

- тридцять четверта Всеукраїнська конференція «Нові технології в машинобудуванні», Харків, 4–7 вересня 2024 р., дистанційна.

- міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами», Коблево, 9–13 вересня 2024 р., дистанційна.

- III Міжнародна наукова конференція «Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи», Ужгород, 4 жовтня, 2024 р., дистанційна.

- V Міжнародна наукова конференція «Наукові відкриття та фундаментальні наукові дослідження: світовий досвід», м. Полтава, 8 листопада, 2024 р., дистанційна.

- 2nd International Scientific and Practical Internet Conference «Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society», Dnipro, November 7–8, 2024, дистанційна.

- 4th International Scientific and Practical Internet Conference «Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development», Dnipro, November 14–15, 2024, дистанційна.

- одинадцята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації», Баку – Харків – Жиліна, 21–22 листопада 2024 р., дистанційна.

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 24 наукових публікаціях, з них 4 статті у наукових фахових виданнях України (2 – у виданні, включеному в міжнародну наукометричну базу Scopus), 4 патента України на корисну модель, 4 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерні програми), 12 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить анотації, вступ, чотири розділи, висновки та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 184 сторінок, у тому числі 54 таблиці, 33 рисунки, списки використаних джерел з 170 найменувань на 18 сторінках, 7 додатків на 36 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Коди одиничної відстані та їх застосування

Прогрес систем зброї під час другої світової війни підкреслив необхідність швидкої та точної передачі даних на віддалені пристрої. Системи керування вогнем були розроблені для автоматичного високошвидкісного наведення гармат, для чого були потрібні засоби для передачі радіолокаційних даних позиції на віддалену позицію для наведення та стрільби. Основним рішенням був аналоговий підхід із використанням синхронних пристроїв. Незважаючи на те, що аналогова техніка була актуальною для того часу, вона має властиві неточності через відхилення від лінійних характеристик входу-виводу. Однак розвиток у цій галузі призвів до подальшої розробки швидких, точних і компактних цифрових датчиків [1, 2].

Коди одиничної відстані досліджені у роботах [3, 4]. Код Грея та циклічний двійковий код є типовими однокроковими або кодами одиничної відстані. Кодери, що формують такі послідовності вимагають найпростішого логічного керування без схем трансляції чи декодування. Неоднозначність є відомою проблемою цифрових кодерів, що є наслідком механічних обмежень апаратного забезпечення кодера та структури двійкових систем числення. Для подолання проблеми неоднозначності зазвичай використовуються однокрокові системи або кодові системи одиничної відстані, однак цей підхід вимагає використання зовнішніх схем декодування. Схеми дискретизації та схеми приводу не потрібні в кодерах, які використовують кодування одиничної відстані, що є явною перевагою [5, 6].

Сучасні багатоядерні мікропроцесори та системи на кристалі (SoC) базуються на використанні мереж на кристалі (NoC) для організації обміну даними між обчислювальними ядрами та контролерами пам'яті. У таких

архітектурах канали передачі даних та маршрутизатори стають основними споживачами енергії, причому значна частка енерговитрат обумовлена активністю перемикання бітів на лініях зв'язку. Ефективним підходом до зниження цих витрат є застосування спеціальних методів кодування, зокрема кодів одиначної відстані, спрямованих на мінімізацію кількості перемикань при переході між послідовними кодовими словами [7].

Нові перспективні технології енергонезалежної пам'яті з довільним доступом (NVRAM) поєднують переваги сучасної динамічної пам'яті з довільним доступом (DRAM) (швидкість, побайтна адресація) з перевагами накопичувачів (висока щільність та ємність, збереження даних без живлення). Однак вони характеризуються обмеженим ресурсом перезаписів та асиметричним енергоспоживанням: операції запису споживають значно більше енергії, ніж операції зчитування. Для вирішення проблеми зносу застосовуються алгоритми вирівнювання навантаження (wear-leveling), які використовують лічильники записів для сторінок пам'яті. Використання в таких лічильниках класичного коду Грея дозволяє змінювати лише один біт при переході між значеннями лічильника [8].

1.2. Дослідження у галузі кодування інформації: огляд технологій та патентні дослідження

Однією з фундаментальних проблем у системах цифрового зв'язку та зберігання даних є пошук методів кодування, що дають змогу ефективно передавати або зберігати інформацію в ситуаціях, коли можуть виникнути помилки [9, 10].

На сучасному етапі розвитку електроніки вдосконалення елементної бази та методів виробництва напівпровідників є пріоритетним напрямом наукових досліджень. Щорічне зростання кількості наукових публікацій та патентних заявок у цій сфері свідчить про високу динаміку розвитку галузі. Патенти забезпечують інтеграцію наукових досягнень в реальні сектори економіки. Вони

реєструються провідними технологічними компаніями та науковими установами з метою захисту інтелектуальної власності, що має значну технологічну та економічну цінність.

Оскільки щорічно реєструється понад мільйон нових винаходів, аналіз патентної документації є важливим етапом наукового пошуку, оскільки дозволяє сформулювати об'єктивне уявлення про поточний стан справ та визначити перспективні напрямки розвитку.

Розширений патентний пошук за ключовими словами "Gray codes in the title" виявив 416 результатів (на січень 2025 року). Патенти розподілено за патентними класами, зазначеними в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Перелік патентних класів

Назва патентного класу	Клас
Генерування імпульсів, оброблення імпульсів	H03K 7/00; H03K 9/00; H03K 11/00
Лічильники імпульсів; дільники частоти	H03K 23/00; H03K 25/00; H03K 27/00; H03K 29/00
Електронна комутація; логічні схеми	H03K 17/00; H03K 19/00
Кодування, декодування	H03M
Перетворювання кодів	H03M 7/00; H03M 9/00
Перетворювання у коди з одиничною відстанню або навпаки, наприклад код Грея	H03M 7/16
Виявлення помилок або їх виправлення	H03M 13/00
Передавання сигналів	H04B
Багатоканальний зв'язок	H04J
Передавання дискретної інформації	H04L
Криптографія; безпека; помилки; захист даних в мережі	H04L 1/00; H04L 9/00
Передавання зображення	H04N

Продовження таблиці 1.1.

Оброблення даних	G06F 7/00, G06F 15/00- G06F 17/00
Введення, виведення; взаємодія функціональних елементів	G06F 3/00; G06F 13/00
Перетворювання; програмна інженерія; програмне керування; виявлення помилок, моніторинг	G06F 5/00; G06F 8/00; G06F 9/00; G06F 11/00
Обчислювальні пристрої, що ґрунтуються на специфічних обчислювальних моделях	G06N
Оброблення або генерація даних зображення в цілому	G06T

Отриманий перелік патентних класів можна використовувати для розв'язання широкого кола дослідницьких питань, що стосуються кодових перетворювачів.

Для аналізу було використано патентні дані з патентних пошукових систем: Європейського патентного відомства (ЄПВ) Espacenet, Google Patents, Відомства США з патентів і товарних знаків (USPTO) та Японського патентного відомства (JPO).

У таблиці 1.2 наведено перелік компаній та установ, що подали найбільшу кількість заявок на патенти.

Таблиця 1.2

Перелік компаній та установ, що подали найбільшу кількість заявок на патенти

Держава	Заявник
Китай	BEIJING DIDI INFINITY TECHNOLOGY & DEV CO LTD HANGZHOU LINX ROBOT INTELLIGENT TECH CO LTD INGENIC SEMICONDUCTOR CO LTD INSPUR GENERAL SOFTWARE CO LTD SUZHOU SHENQIAN YOUSHI INTELLIGENT TECH CO LTD TENCENT TECH SHENZHEN CO LTD UNITED MICROELECTRONICS CENTER CO LTD UNIV ELECTRONIC SCI & TECH CHINA UNIV XIAN TECHNOLOGY

Продовження таблиці 1.2.

США	FUTUREWEI TECHNOLOGIES INC GUO GUOXIAO IBM INTEL CORP OMNIVISION TECH INC SEAGATE TECHNOLOGY LLC WESTERN DIGITAL TECH INC
Тайвань	ACER INC CHANG YI-KAI RHINE ELECTRONIC CO LTD UNIV NAT CHUNG CHENG
Корея	LG INNOTEK CO LTD SAMSUNG ELECTRONICS CO LTD
Японія	SHARP SEMICONDUCTOR INNOVATION CORP SONY CORP

Аналіз показує, що 90% патентних заявок по данній темі подаються винахідниками з наступних країн: Китаю, США, Тайваню, Кореї та Японії.

В Азіатсько-Тихоокеанському регіоні з шести провідних місць за сукупними доходами від поставок напівпровідників чотири посідає "велика четвірка" - Китай, Японія, Південна Корея і Тайвань. Цей же регіон - найбільший у світі ринок: на нього припадає 60 % світових продажів напівпровідників, з них на Китай - понад 30 %.

Тенденції показують безперервне зростання патентної діяльності в розглянутій галузі. Фрагмент результатів пошуку наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Результати пошуку патентів в галузі кодування

1. Quaternary Gray code three-dimensional imaging method and device, electronic equipment and storage medium.					
Inventor: LI JUN WEI SHENG	Applicant: JI HUA LABORATORY	CPC: G01B11/2509 G01B11/2527 G06N3/0455	IPC: G01B11/25 G06N3/0455 G06N3/0464	Publication info: CN118729990 (A) 2024-10-01	Priority date: 2024-08-23

Продовження таблиці 1.3.

2. Gray code binarization method and system and electronic equipment					
Inventor: CHEN QUAN DING DING	Applicant: HANGZHOU LINX ROBOT INTELLIGENT TECH CO LTD	CPC: G06T2207/20 081 G06T2207/20 084 G06T5/60	IPC: G06T5/60 G06T5/90 G06T7/11	Publication info: CN118570241 (A) 2024-08-30 CN118570241 (B) 2024-12-06	Priority date: 2024-07-26
3. Gray code binarization threshold adaptive method based on absolute phase evaluation					
Inventor: JIN JING ZHENG HAOJIE	Applicant: HARBIN INST TECHNOLOGY	CPC: G01N2021/88 83 G01N2021/88 87 G01N21/8851	IPC: G01N21/88 G06N3/126	Publication info: CN118858289 (A) 2024-10-29	Priority date: 2024-07-04
4. Low-power-consumption nonvolatile memory circuit based on Gray code counter					
Inventor: CHANG LIANG GUO ZILONG	Applicant: UNIV ELECTRONIC SCI & TECH CHINA	CPC: G11C11/265 Y02D10/00	IPC: G11C11/26	Publication info: CN118173141 (A) 2024-06-11 CN118173141 (B) 2024-07-19	Priority date: 2024-05-14
5. Gray code signal processing method and device for rod position detector, medium and product					
Inventor: WANG LI SUN WU	Applicant: CHINA NUCLEAR CONTROL SYSTEM ENG CO LTD	CPC: G01F23/22 G21C17/10 Y02E30/30	IPC: G01F23/22 G21C17/10	Publication info: CN118398259 (A) 2024-07-26	Priority date: 2024-04-22
6. Gray code counter					
Inventor: XU ZHUO KO HYUN- YOUNG	Applicant: UNITED MICROELECT RONICS CENTER CO LTD	CPC: H03K21/026	IPC: H03K21/02	Publication info: CN118316440 (A) 2024-07-09	Priority date: 2024-04-08

Нижче наведені деякі патенти у галузі кодування інформації в телекомунікаційних системах.

Лічильник коду Грея [11] містить двійковий лічильник і генератор коду Грея, з'єднаний з двійковим лічильником. Двійковий лічильник використовується для прийому тактового сигналу або сигналу, який підлягає підрахунку і виведення двійкового сигналу підрахунку в генератор коду Грея. Пристрій не потребує синхронної обробки блоку, таким чином може значно зменшити споживання електроенергії.

Заявка [12] відноситься до системи розподілу сигналів підрахунку коду Грея. Система розподілу лічильників містить N-розрядний лічильник для прийому першого тактового сигналу лічильника для генерування безлічі бітів даних, включаючи нижній біт даних у нижньому рядку бітів даних і старший біт даних у верхньому рядку бітів даних. Верхні біти даних включають щонайменше один надлишковий біт для забезпечення виправлення помилок для системи розподілу лічильників. Визначена кількість фіксаторів з'єднані з N-бітовим лічильником. Кожна з нижніх бітових ліній даних і кожна з верхніх бітових ліній даних з'єднані щонайменше з одним із фіксаторів. Засувки скомпоновані у декілька груп засувок. Кожна група фіксаторів з'єднана з відповідним сигналом дозволу фіксатора. Кожен фіксатор у кожній групі фіксаторів з'єднаний для фіксації відповідного одного з безлічі бітів даних у відповідь на відповідний сигнал дозволу фіксатора.

Схема лічильника коду Грея [13] містить логічну схему, тригер, вихідний блок, які разом утворюють структуру лічильника. У порівнянні з традиційною схемою лічильника коду Грея у пристрої не потрібно спочатку створювати двійковий лічильник, а потім перетворювати двійковий код у формат коду Грея. Схема характеризується низькою споживаною потужністю та простотою реалізації.

Схема енергонезалежної пам'яті на основі лічильника коду Грея з низьким енергоспоживанням описана у роботі [14]. Винахід використовує код Грея як режим кодування для зберігання даних, Пристрій зменшує енергоспоживання

запису енергонезалежної пам'яті шляхом зменшення зміна числа бітів під час запису, скорочує час запису та подовжує термін служби енергонезалежної пам'яті.

Лічильник коду Грея [15] містить допоміжний блок і початковий лічильник бітів. Допоміжний блок містить D-тригер нульового порядку; початковий лічильник містить логічний елемент «НЕ», логічний елемент «виключаюче АБО» з двома входами та первинний D-тригер, які електрично з'єднані послідовно від входу до виходу; при цьому вхід двовходового елемента «АБО» електрично з'єднаний із тактовим входом D-тригера нульового порядку. Лічильник реалізує чітку логіку, просту структуру та стабільний вихід.

Імітаційний генератор коду Грея та діагностичний пристрій [16] призначені для контролю положення стрижнів ядерного реактора. До складу пристрою входять блок керування, комутаційні елементи, вузол живлення та перетворювач напруги. Запропонований генератор відрізняється простотою архітектури та зручністю експлуатації завдяки використанню групи перемикачів. Пристрій дозволяє генерувати довільні комбінації коду Грея, імітуючи переміщення штока приводу, а також здійснювати наскрізну перевірку вимірювального каналу для визначення координат стрижня. Це дозволяє обслуговуючому персоналу оперативно локалізувати несправності та підвищити якість ремонтно-відновлювальних робіт.

Уц, З. Е [17] запропонував кодовий диск, кодер коду Грея та метод його кодування. Кодовий диск містить корпус диска, кодер, чотири кодових блока які розташовано на одній стороні корпусу диска у вигляді кільцевого масиву. Кодовий диск має просту конструкцію та легкість у виготовленні.

Метод обробки сигналу коду Грея та обладнання для вимірювання положення стрижня на атомних електростанціях наведено у роботі [18]. Спосіб включає наступні етапи: проведення збору сигналу напруги постійного струму, що відповідає вихідному сигналу коду Грея і генерування послідовності значень коду Грея відповідно до порогових значень напруги, що відповідають значенням коду, за допомогою цифрового методу постобробки.

Система генерує набір вихідних сигналів змінної напруги, що відповідають каналам коду Грея (А, В, С, D та Е). Алгоритм ідентифікації положення аналізує сигнал базового каналу (А) відносно заданого порогового рівня для визначення моменту переміщення керуючого стрижня. На основі отриманих часових параметрів та відомої послідовності зміни станів коду Грея формується оновлений цифровий вихідний сигнал. Запропонований метод дозволяє підвищити точність позиціонування, ефективність налагодження обладнання та загальну стабільність роботи системи.

Lee Н [19] запропонував перетворювач коду Грея в двійковий код. Перетворювач коду включає вхідні регістри, вузли паралельного входу і послідовного виходу, а також блок комутації. Кожна з множини вхідних регістрів налаштований на виведення паралельного вихідного коду Грея шляхом фіксації паралельного вхідного коду Грея у відповідь на сигнал вибірки. Біти двійкового коду послідовно виводяться від молодших значущих бітів двійкового коду до старших бітів двійкового коду при зміні розташування першої групи перемикачів.

Винахід [20] – позиціонер підземних інженерних комунікацій і метод, заснований на коді Грея відноситься до галузі геофізичних досліджень. Пристрій включає в себе пристрій кодованого перетворення, пристрій генерації коду Грея, дільник потужності, перший підсилювач, передавальну антену, приймальну антену, другий підсилювач, регульовану електричну лінію затримки, фотоелектричний блок зчитування сигналу, датчик швидкості, пристрій тригерного керування, модуль GPS, пристрій зберігання сигналів, пристрій відображення.

У винаході [20] використовуються надлишкові коди Грея А та надлишковий код В. Це дозволяє вбудувати додаткову інформацію та отримати результуючий сигнал подвійної амплітуди, що суттєво покращує відношення сигнал/шум у точці вимірювання.

Метод визначення несправності датчика напрямку вітру на основі коду Грея запропоновано у роботі [21]. У метеорологічних службах напрям вітру є

одним із шести типових факторів і є важливим фактором, що впливає на щоденні подорожі, безпеку польотів, застосування енергії вітру тощо. Наразі більшість обладнання для вимірювання напрямку вітру на метеорологічних станціях використовує датчик напрямку вітру типу кодового диска. Винахід забезпечує виявлення несправності датчика напрямку вітру, який характеризується тим, що коди Грея конкретних напрямків і напрямків вітру вимірюються та порівнюються зі стандартними кодами Грея.

Схема перетворення двійкового коду в код Грея [22] включає буферний блок і блок перетворення. Буферний блок генерує n -бітний код даних у відповідь на другий двійковий бітовий сигнал таким чином, щоб код Грея відповідав логічному рівню сигналу біта даних.

Метод кодування та декодування абсолютного положення [23] включає наступні етапи: поділ коду абсолютного положення на N кодових каналів, при цьому перший кодовий канал є абсолютним кодовим каналом, інші $N-1$ кодових каналів є інкрементними кодовими каналами з постійним кроком. Канал абсолютного коду складається з області коду ідентифікації перехресної області бітів парності, області коду Грея, області інтервального коду та області надінтервального коду. Винахід може гарантувати, що код абсолютного положення у будь-якому діапазоні довжини коду буде унікальним.

1.3. Покращене кодування з низьким енергоспоживанням для послідовних з'єднань мережі на чіпі

В умовах стрімкого розвитку наноелектроніки архітектура мережі на кристалі (NoC) стає ключовим рішенням для багатоядерних систем реального часу. Проте зі збільшенням кількості обчислювальних ядер зростає й енергоспоживання NoC.

Основним джерелом розсіювання потужності є лінії зв'язку, що зумовлено високою частотою перемикання бітів під час передачі даних. Оскільки продуктивність каналів NoC суттєво залежить від енергетичних обмежень,

актуальним є дослідження альтернативних методів кодування, спрямованих на зменшення комутаційної активності в каналах передачі даних обладнання телекомунікаційних систем.

Зі збільшенням кількості ядер у багатоядерному чіпі постійно зростає попит на з'єднання з високою пропускнуою здатністю, яке з'єднує ці ядра. Ці вимоги були виконані завдяки впровадженню архітектури «система на кристалі» (SoC), побудованої на базі мережі на кристалі (NoC). NoC замінив шини поперечними перемикачами в з'єднанні багатьох основних мікросхем. Така NoC з'єднує ядра через маршрутизатори на кожному вузлі через мережевий інтерфейс (NI). NoC забезпечує кілька потоків зв'язку для досягнення масштабованості та високої пропускнуої здатності [24, 25, 26].

Архітектура зв'язку в NoC складається з вузлів, об'єднаних мережею маршрутизаторів. Передача даних здійснюється пакетами через фізичні канали зв'язку. Ефективність роботи такої системи безпосередньо залежить від її комутаційних можливостей [27]. Маршрут передачі даних починається у вихідному вузлі обробки та завершується у цільовому вузлі, проходячи через систему міжз'єднань.

Потужність, що розсіюється в локальному каналі зв'язку NoC, є меншою порівняно зі споживанням у каналах між маршрутизаторами. Розсіювання потужності в ланці NoC поділяється на статичне та динамічне. При цьому енергоспоживання з'єднань характеризується переважно динамічною складовою, яка, в свою чергу, виникає внаслідок перезаряджання ємностей. Ця ємність навантаження складається з ємності вхідного вузла, ємності вихідного вузла та власної ємності лінії зв'язку.

Вплив ємності з'єднань стає домінуючим із масштабуванням технології. Активність самоперемикання та взаємна активність перемикання між лініями спричиняють перезаряджання ємностей, що є основною причиною розсіювання потужності в лініях NoC [25].

Загальна потужність, споживана ланками NoC, задається наступним чином [28]:

$$P_{bus} = (\alpha_s C_s + \alpha_l C_l) V^2 f, \quad (1.1)$$

де α_s позначає активність самоперемикання на каналі зв'язку, яка залежить від кількості переходів $0 \rightarrow 1$ у каналі зв'язку в двох послідовних передачах, C_s , це власна ємність або ємність лінії до підкладки, C_l – міжпровідна ємність або ємність зв'язку, α_l це активність перемикання зв'язку, яка залежить від кількості корельованих перемикань між фізично суміжними лініями, V - напруга живлення, f – максимальна робоча зміна тактової частоти.

У міру масштабування технології до нанорозмірного рівня, ємність взаємного впливу та власна ємність ліній зв'язку стають причиною високого розсіювання потужності в багатоядерних NoC [29]. Як наслідок, міжз'єднання споживає більше енергії, ніж маршрутизатори. Канали можуть використовувати як паралельний, так і послідовний зв'язок.

У літературі існує в основному дві класифікації переходів, які використовуються для розробки різних моделей високого рівня та схем кодування.

Відповідно до стандартної моделі, затримка є лінійною функцією ефективної ємності C_{eff} . При цьому на значення ефективної ємності впливають сигнали в досліджуваному провіднику та суміжних із ним лініях. Таким чином, затримка залежить від шаблону перемикання і є функцією вхідних сигналів.

Класифікацію на основі перемикання у двопровідній лінії наведено у роботі [30], де виділено чотири типи взаємопов'язаних переходів для двох паралельних провідників.

Перехід типу I відбувається, коли один із сигналів перемикається, а інший залишається незмінним, наприклад, $\uparrow \bullet$. У переході типу II одна шина перемикається з низького на високий, а інша перемикається з високого на низький (зворотні переходи), наприклад, $\uparrow \downarrow$. У переході типу III обидва сигнали

перемикаються одночасно в одному напрямку, наприклад, $\uparrow\uparrow$. У переході типу IV обидві лінії не перемикаються, тобто $\bullet\bullet$.

Ця класифікація переходів була використана для створення різних технік кодування з низьким енергоспоживанням [28, 31, 32]. Традиційні моделі оцінки енергії та затримок зазвичай базуються на припущенні, що перемикання сигналів у кожному провіднику відбувається одночасно (ідеальне часове вирівнювання). Однак це припущення не завжди вірно [33, 34, 35]. У процесі моделювання енергетичних характеристик та часових затримок слід враховувати різні джерела неузгодженості, включаючи внутрішні та зовнішні. Одним із невід'ємних факторів є внутрішній часовий зсув сигналів під час їх поширення.

Були запропоновані методи мінімізації активності перемикання на основі попередніх знань про вхідний потік (специфічний для програми) [36, 37]. Наприклад, у [38] статистична інформація на рівні слова використовується для створення таблиці кодування, яка мінімізує активність на перемикання. Хоча кодові схеми з низьким енергоспоживанням ефективні для зменшення втрат від самоперемикання, їхня застосовність відносно обмежена з масштабуванням технологій. Це пов'язано з тим, що зі зменшенням розмірів транзисторів ємності взаємного впливу та спричинені ними проблеми із синхронізацією і шумами набувають критичного значення.

1.4. Висновки за розділом 1

1. Аналіз тенденцій розвитку сучасних телекомунікаційних систем, зокрема мереж на кристалі (NoC) та систем з енергонезалежною пам'яттю (NVRAM), показує, що критичними факторами їх ефективності є енергоспоживання та надійність.

2. Результати патентного пошуку свідчать про значний інтерес до технологій кодування, проте більшість рішень спрямовані на окремі реалізації лічильників або перетворювачів. Відсутній загальний систематичний підхід до побудови та аналізу альтернативних кодів одиничної відстані.

3. Встановлено, що значна частка енерговитрат та зносу обладнання обумовлена високою комутаційною активністю на лініях зв'язку та в комірках пам'яті при передачі та зберіганні даних.

4. Виявлено, що класичні коди Грея дозволяють мінімізувати помилки та зменшувати комутаційну активність завдяки властивості одиначної відстані, однак мають суттєвий недолік – низьку збалансованість перемикачів, що призводить до нерівномірного навантаження на розряди.

5. Для досягнення мети в дисертаційній роботі потрібно вирішити наступні завдання:

- розробити метод побудови кодів одиначної відстані на основі моделей графів,
- розробити метод ієрархічної класифікації кодів одиначної відстані,
- розробити метод конструктивного перерахування кодів одиначної відстані,
- розробити програмно-апаратні засоби для автоматизації дослідження й побудови кодів,
- провести порівняльне дослідження ефективності розроблених методів побудови кодів одиначної відстані.

РОЗДІЛ 2

КОМБІНАТОРНЕ КОДУВАННЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ

2.1. Альтернативні коди Грея

Коди Грея широко застосовуються на практиці, але мають низьку збалансованість і, у ряді випадків, не можуть бути використані. У зв'язку із цим ведеться пошук альтернативних варіантів кодування.

Концептуальні основи перетворень Грея розглянуті в роботах А. Белецького [39, 40, 41]. Запропоновано узагальнену структуру кодів Грея, яка включає в себе класичний «лівосторонній» і запропонований «правобічний» коди Грея. У новому класі правобічних перетворень при прямих і зворотних перетвореннях значення молодшого (правого) розряду числа, що перетворюється залишається незмінним. Введення лівого й правого перетворення Грея (як прямого, так і зворотного) разом зі зворотною перестановкою кодів привело до можливості побудови комбінованих або складених кодів Грея. Застосування складених кодів Грея виявилось досить успішним у криптографії, при вирішенні завдань синтезу й аналізу дискретних систем. Автором розглянуті властивості перетворень тільки для трьох розрядів.

У роботі [42] представлені алгоритми генерації відображених і модульних (зміщених) m -ічних кодів Грея. Для обох варіантів представлені функції ранжирування й деранжирування, а також алгоритми для генерації кодових слів між двома заданими векторами. А. Phillips і М. Wick [43] розробили рекурсивний спосіб створення n -бітних двійкових кодів Грея. У статті [44] запропоновані інноваційні підходи до генерації класичного й квантового відображеного двійкового коду Грея. Описано методику, при якій генеруються як довгі, так і короткі коди Грея з бажаними властивостями однакової кількості змін розрядів, розроблено метод побудови n -бітної двійкової відображеної послідовності коду Грея.

Т. Mutze і J. Nummenpalo досліджували код Грея на середніх рівнях, що

являє собою циклічне перерахування всіх рядків бітів довжиною $2n+1$ з n або $n+1$ записами, рівними 1, таким чином, що будь-які два послідовні рядки бітів у списку відрізняються рівно на один біт для будь-якого цілого числа n . Вони також надали ефективний алгоритм для формування коду Грея для середніх довжин [45].

Для мінімізації шумів в зображеннях Y. Zhou, K. Panetta і C. Chen запропонували новий параметричний n -мірний код Грея, так званий (n, k, p) -код Грея, що містить у собі відомі коди, такі як двійково-відображений код і (n, k) -коди Грея [46]. (n, k, p) -код Грея змінюється в залежності від значень бази n і параметра відстані p . Це новий тип небулевого коду Грея, коли його база більше двох. X. Wang, Y. Su і H. Zhang запропонували використовувати (n, k, p) -код Грея при кодуванні кольорових зображень [47]. Експериментальні результати показали, що алгоритм показує високу продуктивність при кодуванні зображень. Його можна використати для захисту конфіденційності в біометрії, медичних системах візуалізації й системах відеоспостереження. M. Tahiri, H. Karmouni і A. Bencherqui використали (n, k, p) -код Грея при розробці гібридного алгоритму оптимізації й дробових перетворень [48].

У статті [49] розглядається проблема побудови кодів Грея з використанням математичних методів. Були проаналізовані методи побудови кодів Грея з використанням гамільтонових графів, а також ітераційного методу. Розглянуто проблему генерації кодів Грея будь-якої заданої довжини. G. Meenakshi і S. Gupta у роботі [50] запропонували алгоритм генерації (n, r) коду Грея. Як приклад розглядаються конструктивні деталі узагальненого двійкового коду Грея для 5 та 6 біт.

Аналіз відомих досліджень показав, що є інші коди, що мають такі самі характеристики, що й коди Грея. Цей клас кодів у літературі називають узагальненими (альтернативними, розширеними) кодами Грея. Більш точно властивості цих кодів відображає назва «коди з одиничною відстанню». Нажаль, досліджуються в основному окремі випадки кодів, а загального підходу до їх дослідження немає [51, 52].

Математичне моделювання багатьох завдань, що мають комбінаторну структуру, потребує використання нових класів комбінаторних множин. Застосування класичних підходів до опису та генерації елементів комбінаторних множин у реальних завданнях призводить до громіздких результатів, які не застосовуються на практиці [53].

Один із способів вирішення задачі на першому етапі заснований на застосуванні концепції композиційних k -образів комбінаторних множин – множин, побудованих на основі базових комбінаторних множин та заданих на них операцій [54].

Сучасним засобом вирішення перелічувальних завдань для дискретних структур, у тому числі і для комбінаторних множин є теорія комбінаторних видів [55].

Як наслідок виникає необхідність розробки конструктивних засобів опису класів комбінаторних множин, що мають необхідні властивості [56].

Процес вирішення завдання побудови комбінаторних множин, що мають складну комбінаторну структуру, можна поділити на два етапи. Перший етап є описом і генерацією елементів комбінаторної множини, що має задані властивості. Другий етап полягає у вирішенні завдання перерахування об'єктів і може бути виконаний методами перелічувальної комбінаторики [57, 58].

2.2 Графові моделі кодів одиничної відстані

Коди Грея відомі як коди одиничної відстані (однокрокові чи монострофічні). Код одиничної відстані - це незважений код, який змінюється лише тільки у одній позиції числа під час переходу від одного числа до іншого в числовій послідовності [59, 60].

Графовою моделлю кодів Грея є граф гіперкуба. У теорії графів графом гіперкуба Q_n називається регулярний граф з 2^n вершинами, $2^{n-1}n$ ребрами і n ребрами, що сходяться в одній вершині [61, 62].

На рис. 2.1 наведено графічне подання булевого простору від

одновимірного до чотиривимірного.

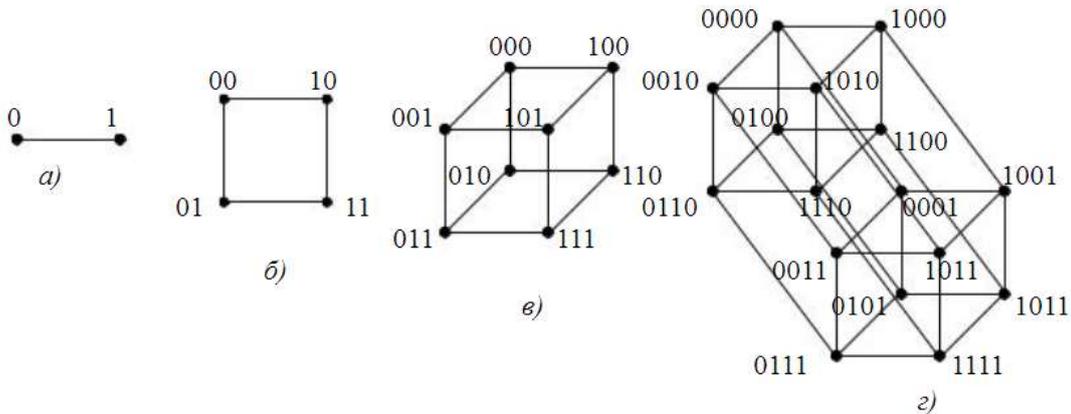


Рис. 2.1. Графічне подання булевого простору: а) одновимірне; б) двовимірне; в) тривимірне; г) чотиривимірне

Регулярний (однорідний) називається граф, в якому ступені всіх вершин якого рівні, тобто кожна вершина має однакову кількість сусідів [63].

Надалі розглядатимемо граф гіперкуба Q_n з позначеними вершинами. Позначена вершина – це пов'язана з вершиною додаткова інформація, яка дозволяє відрізнити її від інших позначених вершин [64, 65].

Для цієї задачі нумерацію вершин починатимемо з номера «0» і кожній вершині поставимо у відповідність n -розрядний двійковий код $a_1a_2\dots a_n$, де a_i дорівнює 0 або 1. Дві вершини (або точки) куба Q_n суміжні, якщо їх двійкові подання відрізняються тільки в одній позиції (в одному розряді). На рис. 2.2 наведено граф гіперкуба Q_3 .

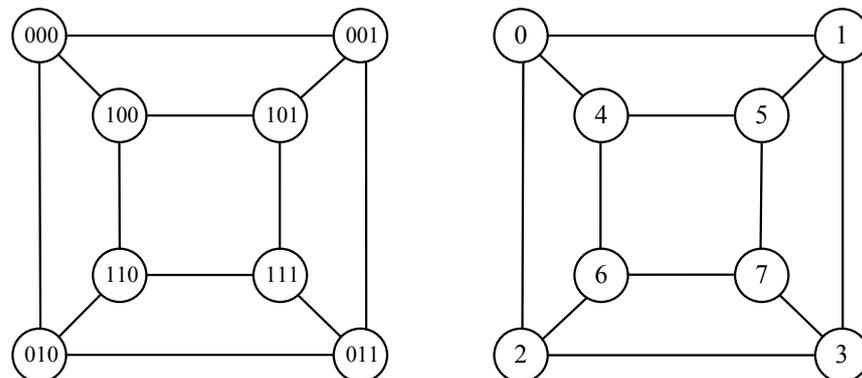


Рис. 2.2. Граф гіперкуба Q_3

Шляхом у графі G називається послідовність вершин і ребер, що чередується, яка починається і закінчується вершиною, і кожне ребро послідовності з'єднує дві вершини, одна з яких безпосередньо передує йому, а інша безпосередньо слідує за ним. Зазначений шлях з'єднує вершини v_0 та v_k і його можна позначити $v_0v_1v_2\dots v_k$. Шлях, у якому всі вершини різні, називається простим. Шлях, в якому $v_0 = v_k$ називається замкнутим (або циклом), і відкритим в іншому випадку. Замкнений шлях називається простим циклом, якщо всі його n вершин різні та $n \geq 3$ [66, 67].

Простий шлях, що проходить через кожну вершину графа один раз називається гамільтоновим шляхом. Гамільтоновий шлях відрізняється від гамільтонова циклу тим, що у шляху початкові і кінцеві точки можуть не збігатися, на відміну від циклу. Гамільтонів цикл є гамільтоновим шляхом. Будь-який гіперкуб Q_n з $n > 1$ має гамільтонів цикл, що проходить через кожну вершину рівно один раз [68, 69].

Гамільтоновість гіперкуба тісно пов'язана з теорією кодів Грея. Точніше, існує бієктивна відповідність між набором n -бітних циклічних кодів Грея і набором гамільтонових циклів у гіперкубі Q_n . Аналогічна властивість має місце для ациклічних n -бітових кодів Грея та гамільтонових шляхів [70, 71].

У термінах теорії графів завдання побудови множини кодів одиничної відстані зводиться до побудови множини гамільтонових шляхів (циклів) у гіперкубі.

Для пошуку гамільтонових циклів були запропоновані різні алгоритми, включаючи алгоритми побудови шляхом розширення ідеального паросполучення гіперкуба [72] та нейронні підходи [73].

У статті [74] розглядається завдання класифікації гамільтонових циклів у бінарному гіперкубі з використанням реберного представлення. У статті [75] наведено огляд конструкцій та класифікацій кодів Грея. Конструкції поділяються на три основні групи: рекурсивні, торичні та потокові. Досліджено деякі властивості коду Грея: спектр напрямків ребер, граfi 2-підслів у перехідній послідовності, локальна однорідність.

Відомі методи дослідження гамільтонових шляхів у графі Q_n не враховують специфіки кодів одиничної відстані, тому для побудови множини гамільтонових шляхів у графі Q_n було розроблено алгоритм, при описі якого у даному підрозділі використовуються такі позначення [76]:

U – формований шлях,

$L(U)$ – довжина формованого шляху,

$U(i)$ – номер вершини, що стоїть на позиції i в шляху U ,

$v \rightarrow U$ означає запис вершини v у шлях U ,

$O(v)$ – околиця вершини v – множина вершин, суміжних з вершиною v ,

$A(v) = \{v^a_l, \dots, v^a_e\}$ – множина активних вершин, що входять в околицю вершини v . Вершина називається активною, якщо вона не входить у формований шлях U ,

e – кількість активних вершин,

$B = \{B_1, \dots, B_s\}$ – множина перспективних початкових шляхів (для подальшого їх розгляду),

s – кількість перспективних початкових шляхів,

d – поточний номер початкового шляху,

$B_i \rightarrow B$ означає запис шляху B_i у множину перспективних шляхів B ,

$R = \{U_1, \dots, U_q\}$ – множина сформованих гамільтонових шляхів,

q – кількість сформованих гамільтонових шляхів,

$U \rightarrow R$ означає запис нового сформованого шляху,

t – поточний номер розглянутої вершини.

Алгоритм побудови гамільтонових шляхів у графі Q складається з наступних етапів:

1. $q = 0$.

2. $d = 0, s = 0$.

3. $d = d + 1$.

4. $U = B_d$.

5. $t = L(U)$.

6. Визначити околицю вершини $O(v)$, $v = U(t)$.

7. Визначити множину активних вершин $A(v) = \{v^{a_1}, \dots, v^{a_e}\}$.
 8. Якщо $e = 0$, перейти до етапу 13.
 9. Вершину v^{a_1} записати у шлях що формується: $v^{a_1} \rightarrow U$.
 10. Якщо $e = 1$, перейти до етапу 6.
 11. Сформувати нові перспективні початкові шляхи: $s = s + j, v^{a_j} \rightarrow B_s, B_s \rightarrow B, j = 1, \dots, e - 1$.
 12. Перейти до етапу 6.
 13. Якщо $L(U) = n$, то сформовано новий гамільтонів шлях. Записати його: $q = q + 1; U \rightarrow R$.
 14. Якщо $d = s$, то кінець роботи алгоритму.
 15. Вибрати наступний перспективний початковий шлях: перехід до етапу 3.
- У таблиці 2.1 наведено приклад роботи алгоритму.

Таблиця 2.1.

Приклад роботи алгоритму побудови гамільтонових шляхів

d	U	t	$O(v)$	$A(v)$	v^{a_1}	s	B_s
0	0	0	124	124	1	1	02
						2	04
	01	1	35	35	3	3	015
	013	3	127	27	2	4	0137
	0132	2	036	6	6		
	01326	6	247	47	4	5	013267
	013264	4	056	5	5		
	0132645	5	147	7	7		
01326457	7	—	—	—			

Продовження таблиці 2.1.

1	02	2	135	35	3	6	026
	023	3	127	17	1	7	0237
	0231	1	035	5	5		
	02315	5	147	47	4	8	023157
	023154	4	056	6	6		
	0231546	6	247	7	7		
	02315467	7	–	–	–		
2	04	4	056	56	5	9	046
	045	5	147	17	1	10	0457
	0451	1	035	3	3		
	04513	3	127	27	2	11	045137
	045132	2	035	6	6		
	0451326	6	247	7	7		
	04513267	7	–	–	–		
3	015	5	147	47	4	12	0157
	0154	4	056	6	6		
	01546	6	247	27	2	13	015467
	015462	2	036	3	3		
	0154623	3	127	7	7		
	01546237	7	–	–	–		
4	0137	7	356	56	5	14	01376
	01375	5	147	4	4		
	013754	4	056	6	6		
	0137546	6	247	2	2		
	01375462	2	–	–	–		
5	013267	7	356	5	5		
	0132675	5	147	4	4		
	01326754	4	–	–	–		

Продовження таблиці 2.1.

6	026	6	247	47	4	15	0267
	0264	4	056	5	5		
	02645	5	147	17	1	16	026457
	026451	1	035	3	3		
	0264513	3	127	7	7		
	02645137	7	–	–	–		
	...						

У таблиці 2.2 показано вибір вершин у процесі роботи алгоритму.

Таблиця 2.2.

Вибір вершин у процесі роботи алгоритму побудови гамільтонових шляхів

№	Номер гамільтонового шляху																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	0																			
2	1						2						4							
3	3			5			3			6			5			6				
4	2	7	4	7	1	7	4	7	1	7	2	7	6	5	6	3	5	6	3	5
5	4	7	4	2	7	2	4	7	4	1	7	1	2	7	2	1	7	1		
6	5	5	6	3	3	6	6	6	5	3	3	5	6	6	3	5	5	3		
7	7	4	2	7	2	4	7	4	1	7	1	4	7	2	1	7	1	2		
8																				

За допомогою описаного алгоритму були побудовані всі гамільтонові шляхи для гіперкуба Q_3 . Перелік гамільтонових шляхів наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3.

Перелік гамільтонових шляхів у гіперкубі Q_3

01326457	01326754	01375462	01546237
01546732	01573264	02315467	02315764
02376451	02645137	02645731	02673154
04513267	04513762	04576231	04623157
04623751	04675132	10237546	10237645
10264573	10457326	10457623	10462375
13204576	13204675	13267540	13754026
13754620	13762045	15402376	15402673
15467320	15732046	15732640	15764023
20137546	20137645	20154673	20451376
20467315	20467513	23104576	23104675
23157640	23751046	23764015	23764510
26401375	26401573	26457310	26731045
26731540	26754013	31026457	31026754
31045762	31540267	31576204	31576402
32015467	32015764	32046751	32640157
32675104	32675401	37510264	37510462
37546201	37620154	37620451	37645102
40132675	40157326	40157623	40231576
40267315	40267513	45102376	45102673
45137620	45731026	45762013	45762310
46201375	46201573	46237510	46732015
46751023	46751320	51023764	51046237
51046732	51320467	51376204	51376402
54013267	54013762	54026731	54620137
54673102	54673201	57310264	57310462
57326401	57623104	57640132	57640231

Продовження таблиці 2.3.

6 2 0 1 3 7 5 4	6 2 0 4 5 1 3 7	6 2 0 4 5 7 3 1	6 2 3 1 0 4 5 7
6 2 3 7 5 1 0 4	6 2 3 7 5 4 0 1	6 4 0 1 5 7 3 2	6 4 0 2 3 1 5 7
6 4 0 2 3 7 5 1	6 4 5 1 0 2 3 7	6 4 5 7 3 1 0 2	6 4 5 7 3 2 0 1
6 7 3 1 5 4 0 2	6 7 3 2 0 1 5 4	6 7 3 2 0 4 5 1	6 7 5 1 3 2 0 4
6 7 5 4 0 1 3 2	6 7 5 4 0 2 3 1	7 3 1 0 2 6 4 5	7 3 1 5 4 0 2 6
7 3 1 5 4 6 2 0	7 3 2 0 1 5 4 6	7 3 2 6 4 0 1 5	7 3 2 6 4 5 1 0
7 5 1 0 4 6 2 3	7 5 1 3 2 0 4 6	7 5 1 3 2 6 4 0	7 5 4 0 1 3 2 6
7 5 4 6 2 0 1 3	7 5 4 6 2 3 1 0	7 6 2 0 4 5 1 3	7 6 2 3 1 0 4 5
7 6 2 3 1 5 4 0	7 6 4 0 2 3 1 5	7 6 4 5 1 0 2 3	7 6 4 5 1 3 2 0

Аналіз отриманих кодів одиничної відстані, наведених у таблиці 2.3, показує, що множина кодів складається з ациклічних n -бітних кодів та відповідних їм гамільтонових шляхів та циклічних n -бітних кодів, і відповідних їм гамільтонових циклів в гіперкубі Q_3 .

На рис. 2.3 наведені деякі гамільтонові шляхи в гіперкубі Q_3 для ациклічних кодів [76].

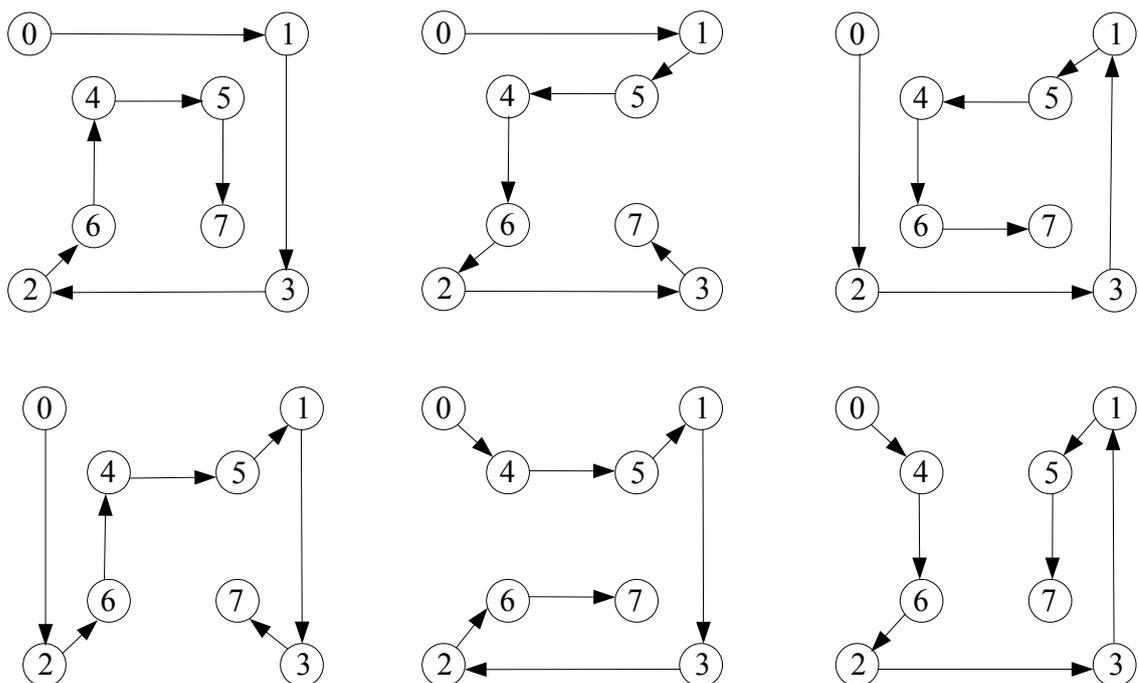


Рис. 2.3. Гамільтонові шляхи в гіперкубі Q_3 для ациклічних кодів

На рис. 2.4 наведені гамільтонові цикли в гіперкубі Q_3 для циклічних кодів [76].

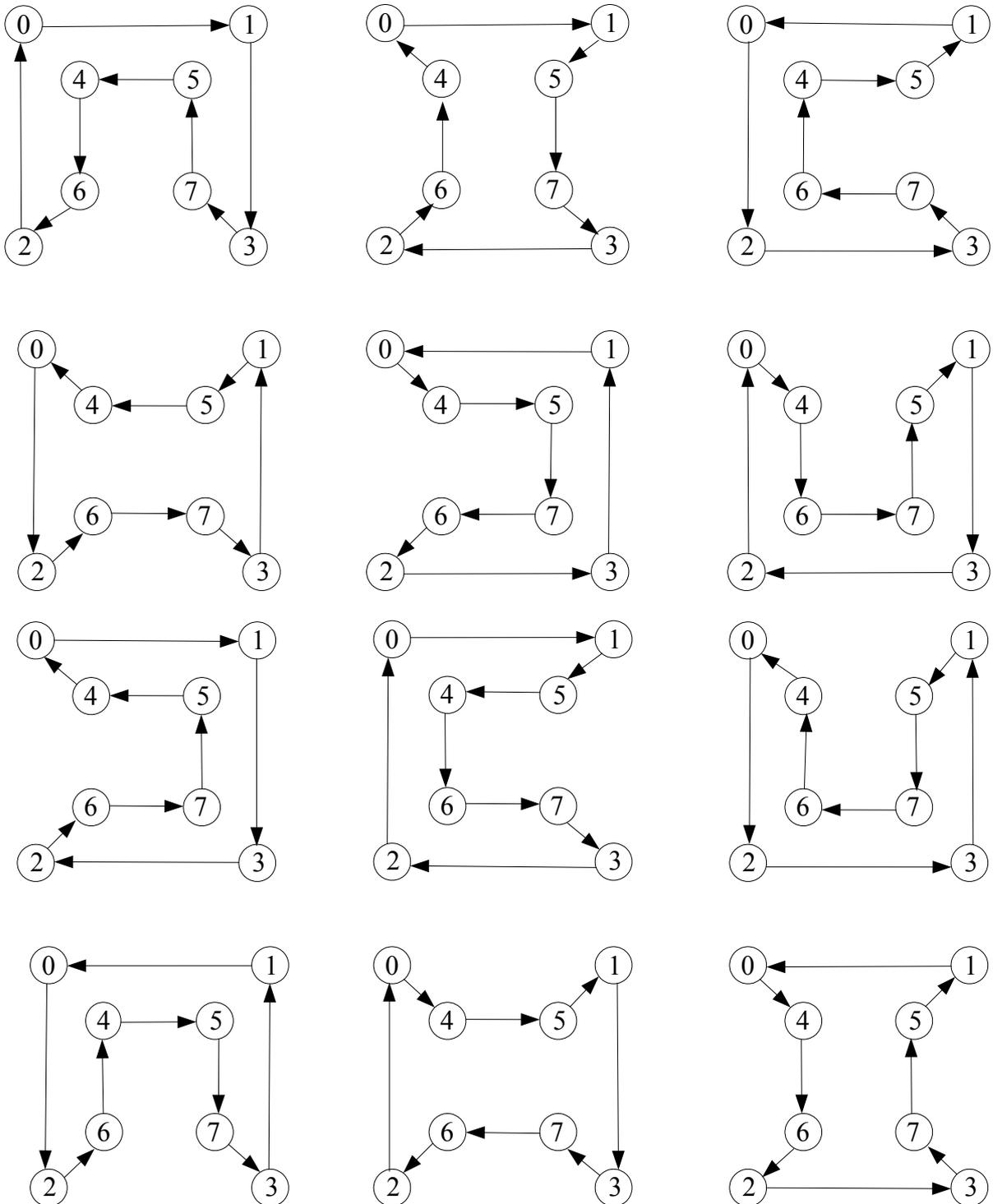


Рис. 2.4. Гамільтонові цикли в гіперкубі Q_3 для циклічних кодів

2.3 Властивості кодів з одиничною відстанню

Проведемо аналіз результатів, отриманих у підрозділі 2.2, з метою визначення властивостей кодів, що досліджуються.

Код – бієктивне (взаємно однозначне) відображення кінцевої впорядкованої множини символів, що належить деякому кінцевому алфавіту Y , на іншу, не обов'язково впорядковану, як правило більш велику множину символів X для кодування, передачі, зберігання або перетворення інформації [77, 78].

Бієктивна функція $f: X \rightarrow Y$ має наступні властивості:

1) Ставить у відповідність різним елементам множини X різні елементи множини Y (ін'єктивність):

$$\forall X^1 \in X, \forall X^2 \in X, X^1 \neq X^2 \Rightarrow f(X^1) \neq f(X^2), \quad (2.1)$$

2) будь-який елемент із Y має свій прообраз (сюр'єктивність):

$$\forall y \in Y, \exists X^* \in X, f(X^*) = y. \quad (2.2)$$

Для кодів бієктивна функція має вигляд $f: Y \rightarrow X$, де Y – кінцева впорядкована множина символів, $Y = \{y^1, y^2, \dots, y^k\}$, X – множина кодових слів, отримана в результаті відображення, $X = \{X^1, X^2, \dots, X^k\}$, k – кількість кодових слів, n – кількість розрядів двійкового коду [59].

Кодове слово X^i складається з n символів (кількість розрядів):

$$X^i = \{x_{i,1}^i, \dots, x_{i,n}^i\}; x_{i,j}^i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n. \quad (2.3)$$

Кількість змін значень i -ї змінної в стовпці позначена h_i та визначається в такий спосіб:

$$h_i = \sum_{j=2}^k (x_{i,j-1} \oplus x_{i,j}), \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.4)$$

Структура коду визначається наступним чином:

$$S(X) = \langle H(X), \leq \rangle. \quad (2.5)$$

У таблиці 2.4 наведене табличне подання коду.

Таблиця 2.4.

Множина кодових слів та їхні характеристики

Y	X				
	x_1	...	x_j	...	x_n
y_1	x^1_1	...	x^1_j	...	x^1_n
y_2	x^2_1	...	x^2_j	...	x^2_n
...
y_i	x^i_1	...	x^i_j	...	x^i_n
...
y_k	x^k_1	...	x^k_j	...	x^k_n
H	h_1	...	h_j	...	h_n

Предметом даного дослідження є коди з одиничною відстанню, у яких кодові слова мають наступні властивості:

- 1) два сусідніх слова відрізняються тільки в одному розряді, тобто:

$$\rho(X^i, X^{i+1}) = 1, \quad i = 1, \dots, k-1, \quad (2.6)$$

де ρ - відстань по Хемінгу між кодовими словами X^i і X^{i+1} ,

- 2) загальна кількість змін значень розрядів у кодових словах дорівнює:

$$\sum_{j=1}^{k-1} \rho(X^j, X^{j+1}) = k-1. \quad (2.7)$$

Код, у якому $\rho(X^1, X^k) = 1$ називається циклічним.

Збалансованість коду C визначається в такий спосіб:

$$C = \sum_{i=1}^n \left| h_i - \frac{\sum_{j=1}^n h_j}{n} \right|. \quad (2.8)$$

Канонічною формою коду $W(X)$ називається його подання у вигляді:

$$W(X) = x^1_1 \dots x^1_n x^2_1 \dots x^2_n \dots x^i_1 \dots x^i_n \dots x^k_1 \dots x^k_n. \quad (2.9)$$

Для компактності двійкова форма подання $W(X)$ може бути перетворена в шістнадцятиричну форму.

2.4. Еквівалентні перетворення кодів

Кількість кодів з одиничною відстанню зі зростанням кількості розрядів значно зростає, що ускладнює їх аналіз. Для вирішення поставленого завдання пропонується наступний підхід. Якщо розгляд множини об'єктів при вирішенні різних комбінаторних завдань зробити важко, то перспективним напрямом є розбиття їх на класи еквівалентності щодо заданої групи перетворень та дослідження властивостей представників класів [79, 80].

У загальному випадку еквівалентність – бінарне відношення на множині, що має властивості рефлексивності, симетричності та транзитивності. Будь-які два класи однієї еквівалентності або перетинаються, або збігаються, тобто будь-яка еквівалентність визначає розбиття множини. І навпаки, будь-яке розбиття множини на класи, що не перетинаються, породжує еквівалентність [81, 82].

Основна мета класифікації – знайти таке розбиття на класи, при якому, з одного боку, еквівалентні перетворення були б легко здійсненні, а з іншого – кількість варіантів була б не дуже велика. У результаті класифікації множина

об'єктів розпадається на попарно непересічні класи [83, 84].

Поняття класу запровадив Дж. Нейман [85, 86]. Згідно з його визначенням Ψ є класом, якщо Ψ є сукупністю всіх предметів, що мають деяку властивість (інваріант), яка залишається незмінною після застосування до об'єктів операцій або перетворень певного типу. У загальному сенсі, інваріант стосовно еквівалентності – це властивість, постійна у кожному класі еквівалентності.

Інваріанти відображають постійні найбільш фундаментальні властивості об'єктів, що вивчаються. При вирішенні багатьох завдань необхідно визначити множину інваріантів, встановити та описати зв'язки між ними, побудувати повний набір інваріантів. Вивчення інваріантів безпосередньо з завданнями класифікації об'єктів, тобто метою будь-якої математичної класифікації є побудова деякої повної системи інваріантів, що розділяє будь-які два нееквівалентні об'єкти з сукупності [87, 88].

В даний час існують різні підходи до визначення інваріанту залежно від того чи задається група перетворень у явному вигляді чи ні [89 – 91].

1. Група перетворень явно не вводиться, а вводиться відношення еквівалентності η , що відповідає вимогам рефлексивності, симетричності та транзитивності. У результаті множина елементів розбивається на еквівалентні по η підмножини.

2. Група перетворень задана на множині елементів \mathcal{D} . У результаті будь-якого перетворення елемента $\phi \in \mathcal{D}$ буде отримано елемент $\phi^* \in \mathcal{D}$.

Оскільки всі об'єкти, що належать одному класу еквівалентності, переходять один в одного в результаті заданої групи перетворень, то для опису класу еквівалентності достатньо визначити типового представника, в якості якого може бути обраний будь-який елемент, що належить класу еквівалентності [91 – 93].

Для однозначного опису типових представників доцільно визначити найпростіший вид, до якого можна привести досліджуваний математичний об'єкт з допомогою аналізованої групи перетворень, тобто побудувати канонічну форму [94].

Канонічна форма математичного об'єкта – це стандартний спосіб представлення цього об'єкта у вигляді математичного виразу, який дозволяє його ідентифікувати унікальним способом. Канонічні форми зазвичай використовуються для того, щоб зробити роботу з класами еквівалентності ефективнішою [95, 96].

У загальному сенсі, для класу об'єктів, котрим визначено відношення еквівалентності, канонічна форма полягає у виборі конкретного об'єкта у кожному класі (типового представника). Представник вибирається однозначно серед об'єктів, що належать даному класу. У деяких додатках представник однозначно вибирається за допомогою детермінованого алгоритму. Множина типових представників класів еквівалентності утворюють систему різних представників.

Таким чином, підхід, що розглядається, зводиться до вирішення комбінаторних завдань, пов'язаних з визначенням існування системи різних представників для сімейства множин, і визначення числа систем різних представників, що задовольняють різним критеріям.

Загальний підхід до визначення типового представника складається з наступних етапів.

1. Вибір будь-якого елемента – представника класу еквівалентності.
2. Виконання множини заданих перетворень об'єкта, тобто породження всіх елементів класу еквівалентності.
3. Визначення канонічної форми елементів, отриманих у результаті кожного перетворення.
4. Визначення типового представника – елемента, що має канонічну форму заданого виду.

Якщо канонічна форма є множина елементів, то вибиратимемо мінімальну канонічну форму. При цьому вважаємо, що множина $A = \{\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_\varphi\}$ менша від множини $\Psi = \{\psi_1, \dots, \psi_i, \dots, \psi_\varphi\}$, якщо існує таке значення i , що $\lambda_t = \psi_t$ для $t = 1, \dots, i - 1$ та $\lambda_i \leq \psi_i$.

Розглянемо застосування цього походу до вивчення кодів з одиничною відстанню.

Серед можливих перетворень двійкових матриць виділено перетворення, при яких зберігається властивість одиничної відстані між сусідніми двійковими словами коду. Це перестановка стовпців (P -перетворення) та інверсія стовпців (N -перетворення). Код X , отриманий в результаті групи перетворень τ , позначається $X(\tau)$.

Визначення 1. Коди X^1 та X^2 називаються P -еквівалентними, якщо $X^1 = X^2(P)$.

Визначення 2. Коди X^1 та X^2 називаються N -еквівалентними, якщо $X^1 = X^2(N)$.

Визначення 3. Коди X^1 та X^2 називаються PN -еквівалентними, якщо $X^1 = X^2(PN)$.

Кількість перетворень визначається наступним чином:

$$L_P = n!, \quad L_N = 2^n. \quad (2.10)$$

P -перетворення будемо описувати у вигляді множини перестановок стовпців вихідного коду $P = \{\pi_1, \dots, \pi_n\}$, а N -перетворення у вигляді множини $N = \{v_1, \dots, v_n\}$, де $v_i = 1$, якщо виконується інверсія i -го стовпця і $v_i = 0$ у протилежному випадку.

У таблиці 2.5 наведено десяткові еквіваленти двійкових кодів (D_B), двійковий позиційний код (X^e), код Грея X^g та приклади PN -перетворень для коду Грея: код $X^e(P)$ для $P = \{2, 3, 4, 1\}$, код $X^e(N)$ для $N = \{1, 0, 1, 0\}$. Для кожного коду вказано кількість змін значень кожного розряду $H = \{h_1, h_2, h_3, h_4\}$ та значення збалансованості коду C [97].

Канонічна форма для кодів X_g , $X_g(P)$, $X_g(N)$ для зазначених перетворень має вигляд:

- 1) $W(X_g) = 01326754cdfeab98$,
- 2) $W(X_g(P)) = 0264cea89bfd5731$,

3) $W(X_2(N)) = ab98cdf67540132$.

Таблиця 2.5.

Коди отримані в результаті еквівалентних перетворень

D_B	X^6				X^2				$X^2(P)$				$X^2(N)$			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1	x_2	x_3	x_4	x_2	x_3	x_4	x_1	x_1	x_2	x_3	x_4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1
2	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
3	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
4	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
5	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
6	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
7	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
8	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
9	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
11	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
12	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
13	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1
14	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
15	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
H	1	3	7	15	1	2	4	8	2	4	8	1	1	2	4	8
C	4,5				2,25				2,25				2,25			

Для визначення типового представника $T(X)$ необхідно виконати всі можливі перетворення коду, для кожного виду перетворень визначити канонічну форму та вибрати мінімальну.

Множина перетворень позначена $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_{L_{PN}}\}$, де L_{PN} – кількість PN -перетворень. Коду X^i відповідає канонічна форма $W(X^i)$. У результаті

перетворення π_j код X^i перетворюється у код X_j^i з канонічною формою $W(X_j^i)$ [97]. Типовим представником коду X^i є код (позначений $T(X^i)$), що має найменшу в лексикографічному сенсі канонічну форму серед кодів, отриманих у результаті множини Π перетворень, тобто [101]:

$$T(X^i) = \min\{W(X_j^i)\}; j = 1, \dots, L_{PN}. \quad (2.11)$$

Оскільки у мінімальної канонічної формі перший символ буде «0», то для зменшення кількості виконуваних перетворень необхідно визначити розряди коду, у яких у першому кодовому слові «1» і зробити інверсію відповідних стовпців [101].

Приклад визначення типового представника вихідного коду (таблиця 2.6) наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.6.

Вихідний код для визначення типового представника

x_1	x_2	x_3	x_4		x_1	x_2	x_3	x_4
1	1	0	1		0	1	0	0
0	1	0	1		1	1	0	0
0	0	0	1		1	0	0	0
0	0	0	0		1	0	0	1
0	0	1	0		1	0	1	1
0	0	1	1		1	0	1	0
0	1	1	1		1	1	1	0
0	1	1	0		1	1	1	1

Оскільки перше кодове слово має вигляд «1101», то виконуємо інверсію для першого, другого і четвертого стовпців.

Таблиця 2.7.

Код отриманий в результаті перетворень

x ₁	x ₂	x ₃	x ₄		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
0	0	0	0		1	0	0	1
1	0	0	0		0	0	0	1
1	1	0	0		0	1	0	1
1	1	0	1		0	1	0	0
1	1	1	1		0	1	1	0
1	1	1	0		0	1	1	1
1	0	1	0		0	0	1	1
1	0	1	1		0	0	1	0

Канонічна форма для перетвореного коду $W_{1234} = 08cdfeab91546732$.

У таблиці 2.8 наведено приклад визначення типового представника для перетвореного коду.

Таблиця 2.8.

Визначення типового представника для перетвореного коду

№	P	W		W_{min}
1	1 2 3 4	08cdfeab91546732	→	08cdfeab91546732
2	1 2 4 3	08cefd9ba2645731		↓
3	1 3 2 4	08abfec91326754	→	08abfec91326754
4	1 3 4 2	089bfdcea2315764	→	089bfdcea2315764
5	1 4 2 3	08aefb9dc4623751		↓
6	1 4 3 2	089dfbaec4513762		↓
7	2 1 3 4	04cdfe675198ab32	→	04cdfe675198ab32
8	2 1 4 3	04cefd5762a89b31		↓
9	2 3 1 4	02abfe673198cd54	→	02abfe673198cd54
10	2 3 4 1	019bfd5732a8ce64	→	019bfd5732a8ce64

Продовження таблиці 2.8.

11	2 4 1 3	02aefb3764c89d51		↓
12	2 4 3 1	019dfb3754c8ae62		↓
13	3 1 2 4	0467fecd5132ab98		↓
14	3 1 4 2	0457fdce62319ba8		↓
15	3 2 1 4	0267feab3154cd98		↓
16	3 2 4 1	0157fd9b3264cea8	→	0157fd9b3264cea8
17	3 4 1 2	0237fbae64519dc8		↓
18	3 4 2 1	0137fb9d5462aec8	→	0137fb9d5462aec8
19	4 1 2 3	046ef75dc8a23b91		↓
20	4 1 3 2	045df76ec8913ba2		↓
21	4 2 1 3	026ef73ba8c45d91		↓
22	4 2 3 1	015df73b98c46ea2		↓
23	4 3 1 2	023bf76ea8915dc4		↓
24	4 3 2 1	013bf75d98a26ec4		↓
			$W_{min} = 0137fb9d5462aec8$	

Типовий представник для коду, що розглядається, позначений $T(X)$ і визначається наступним чином [97]:

$$T(X) = W_{min} = 0137fb9d5462aec8. \quad (2.12)$$

Були досліджені всі коди одиничної відстані для $n = 3$ і $k = 8$. Аналіз отриманих результатів показав, що множина цих кодів може бути розбита на три класи еквівалентності.

Характеристики класів еквівалентності для $n = 3$ і $k = 8$ наведені в таблиці 2.9. Коди одного класу еквівалентності E мають однакові значення типового представника $T(E)$, структуру коду $S(E)$ та збалансованість $C(E)$.

Таблиця 2.9.

Характеристики класів еквівалентності для $n = 3$ та $k = 8$

Клас еквівалентності	$T(E)$	$S(E)$	$C(E)$
$E1$	01375462	2, 2, 3	1,3
$E2$	01326457	1, 3, 3	2,7
$E3$	01326754	1, 2, 4	3,3

У таблицях 2.10 – 2.12 наведено коди, що входять до класів еквівалентності $E1$, $E2$ та $E3$.

Таблиця 2.10.

Коди, що належать класу еквівалентності $E1$

i	$A_{1,i}$	i	$A_{1,i}$	i	$A_{1,i}$
1	15467320	17	46732015	33	01375462
2	54026731	18	04675132	34	73201546
3	20154673	19	26754013	35	75401326
4	54620137	20	67513204	36	75104623
5	51320467	21	67315402	37	23157640
6	31540267	22	02673154	38	51023764
7	32640157	23	62013754	39	57326401
8	62310457	24	13267540	40	01573264
9	64510237	25	76204513	41	57623104
10	10264573	26	76402315	42	15764023
11	26457310	27	73102645	43	04576231
12	64015732	28	37645102	44	45731026
13	32046751	29	13762045	45	45137620
14	40132675	30	02376451	46	20451376
15	10462375	31	23751046	47	40231576
16	46237510	32	37546201	48	31045762

Таблиця 2.11.

Коди, що належать класу еквівалентності E2

i	$A_{2,i}$	i	$A_{2,i}$	i	$A_{2,i}$
1	04513267	17	64023751	33	73154620
2	45102673	18	26401375	34	75462310
3	51046732	19	26731045	35	75132640
4	54673102	20	67320451	36	37510264
5	01546237	21	67540231	37	32015764
6	02315467	22	62375401	38	31576204
7	01326457	23	31026754	39	51376402
8	02645137	24	32675104	40	57640132
9	62045731	25	37620154	41	57310462
10	64573201	26	76231540	42	15732046
11	46201573	27	76451320	43	15402376
12	04623157	28	73264510	44	54013762
13	23104675	29	23764015	45	45762013
14	20467315	30	20137645	46	40157623
15	40267513	31	10237546	47	10457326
16	46751023	32	13754026	48	13204576

Таблиця 2.12.

Коди, що належать класу еквівалентності E3

i	$A_{3,i}$	i	$A_{3,i}$	i	$A_{3,i}$
1	01546732	17	20467513	33	13754620
2	54673201	18	46751320	34	73154026
3	15402673	19	67540132	35	75132046
4	51046237	20	67320154	36	75462013
5	54013267	21	26731540	37	02315764
6	32015467	22	62375104	38	31576402
7	31026457	23	01326754	39	51376204

Продовження таблиці 2.12.

8	64023157	24	32675401	40	57310264
9	62045137	25	76451023	41	15732640
10	26401573	26	76231045	42	57640231
11	02645731	27	73264015	43	45762310
12	64573102	28	37620451	44	10457623
13	13204675	29	23764510	45	40157326
14	46201375	30	10237645	46	04513762
15	04623751	31	20137546	47	45102376
16	40267315	32	37510462	48	23104576

Код під номером 23 у класі еквівалентності $E3$ є кодом Грея. У таблиці 2.13 наведені коди з $v_0 = 0$.

Таблиця 2.13

Коди з $v_0 = 0$

№	U	C	№	U	C
1	01326457	2.7	10	02645137	2.7
2	01326754	3.3	11	02645731	3.3
3	01375462	1.3	12	02673154	1.3
4	01546237	2.7	13	04513267	2.7
5	01546732	3.3	14	04513762	3.3
6	01573264	1.3	15	04576231	1.3
7	02315467	2.7	16	04623157	2.7
8	02315764	3.3	17	04623751	3.3
9	02376451	1.3	18	04675132	1.3

У таблиці 2.14 наведено десяткові еквіваленти двійкових кодів (D), позиційний код (Bin) та представники кодів кожного класу (U_1, U_2, U_3) та їх характеристики.

Таблиця 2.14.

Двійкові коди та їх характеристики

D_0	Bin			D_1	U_1			D_2	U_2			D_3	U_3		
	x_1	x_2	x_3												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
2	0	1	0	3	0	1	1	3	0	1	1	3	0	1	1
3	0	1	1	2	0	1	0	2	0	1	0	7	1	1	1
4	1	0	0	6	1	1	0	6	1	1	0	5	1	0	1
5	1	0	1	4	1	0	0	7	1	1	1	4	1	0	0
6	1	1	0	5	1	0	1	5	1	0	1	6	1	1	0
7	1	1	1	7	1	1	1	4	1	0	0	2	0	1	0
H	1	3	7		1	3	3		1	2	4		2	3	2
C		6.7				2.7				3.3				1.3	

2.5. Ієрархічна класифікація кодів одиничної відстані

Ієрархічна класифікація – класифікаційна система, у якій відносини класів утворюють ієрархічну класифікаційну структуру. На рис. 2.5 наведена ієрархічна класифікаційна структура кодів одиничної відстані.

Особливістю ієрархічної класифікації є розгляд на різних рівнях ієрархії різних множин об'єктів, об'єднання їх у класи щодо заданої для розглянутого рівня еквівалентності, визначення типових представників у кожному класі, побудова множини типових представників. Тобто, на кожному рівні класифікації відбувається перетворення множини типових представників, що надходять із попереднього рівня, з урахуванням установлених відносин еквівалентності між класами, у нову множину типових представників, що надходить на наступний рівень класифікації. З переходом на більше високий рівень класифікації кількість

типових представників зменшується [97].

Розглянемо ієрархічну класифікаційну структуру кодів одиничної відстані. На першому рівні класифікації розглядаються наступні види перетворень: перестановка стовпців (P -перетворення) і інверсія стовпців (N -перетворення). При цих перетвореннях зберігається властивість одиничної відстані між сусідніми двійковими словами в кодовій послідовності [97].

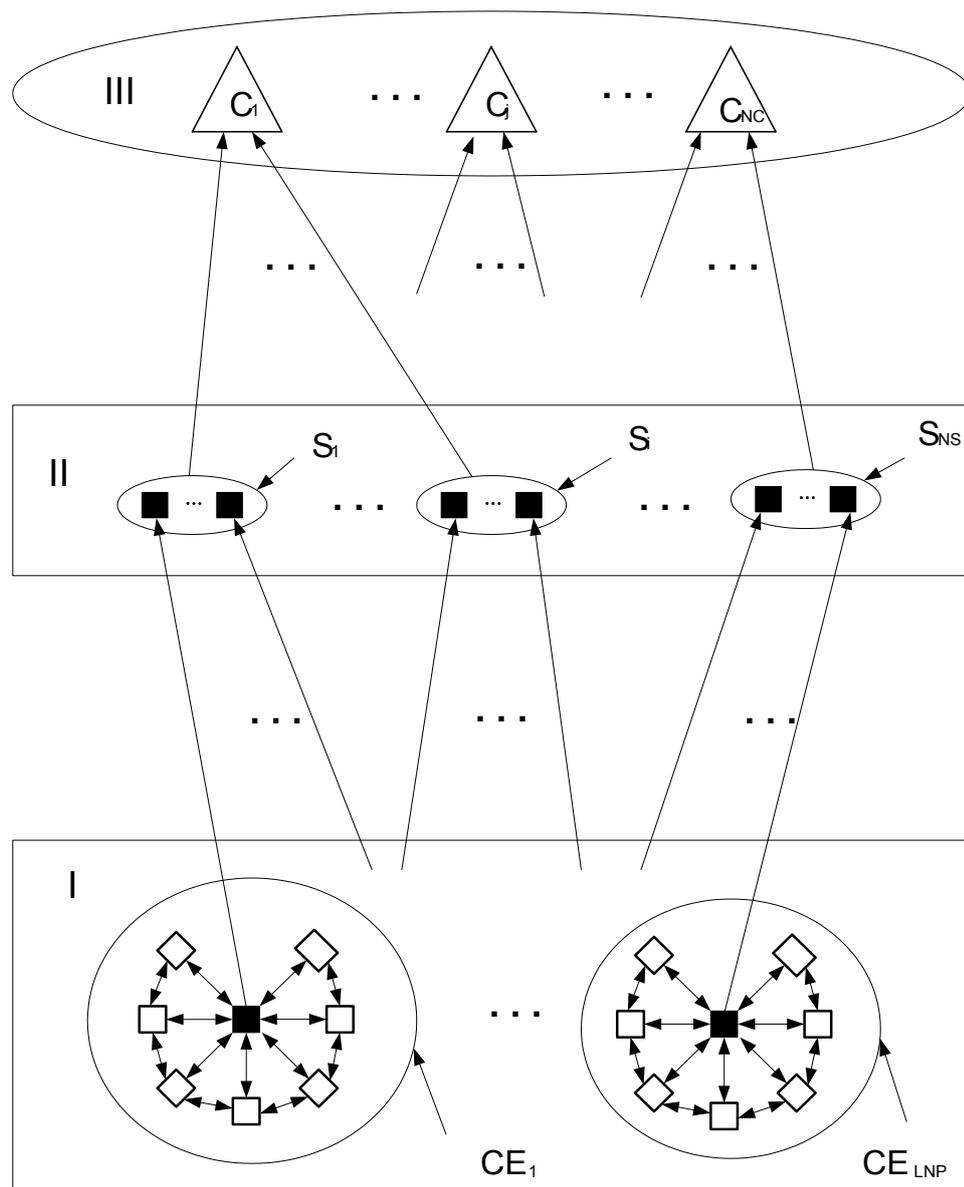


Рис. 2.5. Ієрархічна класифікаційна структура кодів одиничної відстані

У таблиці 2.15 наведені приклади PN -еквівалентних кодів.

Таблиця 2.15.

Приклади PN -еквівалентних кодів

X^1				X^2				X^3				X^4			
x^1_1	x^1_2	x^1_3	x^1_4	x^2_1	x^2_2	x^2_3	x^2_4	x^3_1	x^3_2	x^3_3	x^3_4	x^4_1	x^4_2	x^4_3	x^4_4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1
1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1

Для ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані було розроблено алгоритм, при описі якого використовуються наступні позначення [97]:

K – початкова множина всіх кодів одиничної відстані,

X^i – код, що розглядається $X \in K$,

$CE_{LPN}(X^i)$ – клас PN -еквівалентності, до якого належить код X^i ,

$W(X^i)$ – канонічна форма коду X^i ,

MT – множина типових представників першого рівня,

T^j – типовий представник PN -типу $T \in MT$,

MS – множина типових представників другого рівня,

$S(T^j)$ – структура коду T^j ,

S^k – типовий представник S -типу, $S \in MS$,

MC – множина типових представників третього рівня,

$C(S)$ – значення збалансованості для S^k ,

C^n – типовий представник C -типу.

Алгоритм ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані складається з наступних етапів:

1. Рівень I, для кожного $X^i \in K$:

1.1. Визначити клас $CE_{LPN}(X^i)$ відносно перетворень PN -перетворень.

1.2. Визначити $T^j = \min\{W(X^i)\}, X^i \in CE_{LPN}(X^i)$.

1.3. $T^j \rightarrow MT(T^j)$.

2. Рівень II, для кожного $T^j \in MT$:

2.1. Визначити структуру $S^k = S(T^j)$.

2.2. $S^k \rightarrow MS(S^k)$.

3. Рівень III, для кожного $S^k \in MS$:

3.1. Визначити $C^n \in C(S^k)$.

3.2. $C^n \rightarrow MC(C^n)$.

4. Записати в результат множини MT , MS , MC . Кількість типових представників зменшується на кожному рівні ($|K| \geq |MT| \geq |MS| \geq |MC|$).

Множина кодів одиничної відстані розбивається на класи еквівалентності $CE_1 - CE_{LPN}$, де LPN – кількість класів еквівалентності першого рівня. Для i -го коду, що входить в j -й клас еквівалентності X_j^i визначається його канонічна форма $W(X_j^i)$. Типовий представник j -го класу PN -еквівалентності T_j визначається в такий спосіб:

$$T_j = \min\{W(X_j^i)\}, i = 1, \dots, n!2^n; j = 1, \dots, LPN. \quad (2.13)$$

Множина типових представників для групи PN -перетворень позначається $MT = \{T_1, \dots, T_{LPN}\}$.

Множина типових представників для групи PN -перетворень для $n = 3$ і $k = 8$ складається із трьох елементів: $MT = \{01375462, 01326457, 01326754\}$. У таблиці 2.16 наведений фрагмент множини типових представників для групи PN -перетворень для $n = 4$ і $k = 16$.

Таблиця 2.16.

Фрагмент множини типових представників для групи
 PN -перетворень для $n = 4$ і $k = 16$

№	T	№	T	№	T
1	01326457fb98aecd	14	01326754cd98abfe	27	01326ec457fba89d
2	01326457fb9dc8ae	15	01326754cdfb98ae	28	01375462abfd98ce
3	01326457fdcea89b	16	01326754cefd98ab	29	01375462aec89dfb
4	01326457fecd9ba8	17	01326754cefd9ba8	30	01375462aefdc89b
5	0132645d98ceabf7	18	0132675d9bfea8c4	31	013754cdfb98a26e
6	0132645dc89baef7	19	013267fd54c89bae	32	013754ce62abfd98
7	013264c89baef75d	20	013267fea8c45d9b	33	01375d98c462aefb
8	013264cea89bf75d	21	013267feab98cd54	34	01375d9bfe64c8a2
9	013264ceabf75d98	22	013267fec45d98ab	35	01375dfb98a264ce
10	01326754c8aefb9d	23	01326eab98cdf754	36	01375dfec462a89b
11	013762a89bfecd54	24	01376ec45dfb98a2	37	0137feab98cd5462
12	013762a89d54cefb	25	0137fb98a26ecd54	38	0137fec8a2645d9b
13	013762ab98c45dfe	26	0137fd54c89bae62	39	0137fec8ab9d5462

На другому рівні класифікації розглядається множина типових представників MT , сформована на першому рівні. Для кожного типового представника, що входить у цю множину, визначається його структура $S(X) = \langle H(X), \leq \rangle$. Типові представники $T_1 - T_{LPN}$ розділяються на непересічні класи S -еквівалентності. Типові представники T_i і T_j називаються S -еквівалентними,

якщо $S(T_i) = S(T_j)$. У результаті формується множина типових S -еквівалентних представників, позначена $MS = \{S_1, \dots, S_{NS}\}$, де NS – кількість типових S -еквівалентних представників.

У таблиці 2.17 наведена множина типових S -еквівалентних представників для $n = 4$ і $k=16$.

Таблиця 2.17.

Множина типових S -еквівалентних представників
для $n = 4$ і $k=16$

№	s_1	s_2	s_3	s_4	№	s_1	s_2	s_3	s_4	№	s_1	s_2	s_3	s_4
1	1	2	4	8	7	1	4	4	6	13	2	3	4	6
2	1	2	5	7	8	1	4	5	5	14	2	3	5	5
3	1	2	6	6	9	2	2	3	8	15	2	4	4	5
4	1	3	3	8	10	2	2	4	7	16	3	3	3	6
5	1	3	4	7	11	2	2	5	6	17	3	3	4	5
6	1	3	5	6	12	2	3	3	7	18	3	4	4	4

На третьому рівні класифікації розглядається множина типових представників MS , сформована на другому рівні. Для кожного типового представника, що входить у цю множину, визначається його збалансованість $C(S)$. Типові представники S_1, \dots, S_{NS} розділяються на непересічні класи C -еквівалентності. Типові представники S_i і S_j називаються C -еквівалентними, якщо $C(S_i) = C(S_j)$. У результаті формується множина типових C -еквівалентних представників, позначена $MC = \{C_1, \dots, C_{NC}\}$, де NC – кількість типових C -еквівалентних представників.

У таблиці 2.18 наведена множина типових C -еквівалентних представників для $n = 4$ і $k = 16$.

Таблиця 2.18.

Множина типових C -еквівалентних представників для $n = 4$ і $k = 16$.

C	№	S				LPN
		s_1	s_2	s_3	s_4	
9	1	1	2	4	8	1
	2	1	2	5	7	4
	3	1	2	6	6	3
8,5	4	1	3	3	8	1
	5	2	2	3	8	1
7	6	1	3	4	7	8
	7	1	3	5	6	14
	8	2	2	4	7	2
	9	2	2	5	6	9
6,5	10	2	3	3	7	8
5,5	11	1	4	4	6	10
	12	1	4	5	5	13
5,0	13	2	3	4	6	40
	14	2	3	5	5	22
4,5	15	3	3	3	6	6
3,5	16	2	4	4	5	30
3,0	17	3	3	4	5	50
1,5	18	3	4	4	4	16

Характеристики множини типових C -еквівалентних представників для $n = 5$ і $k = 32$ наведені на рис. 2.6 [97].

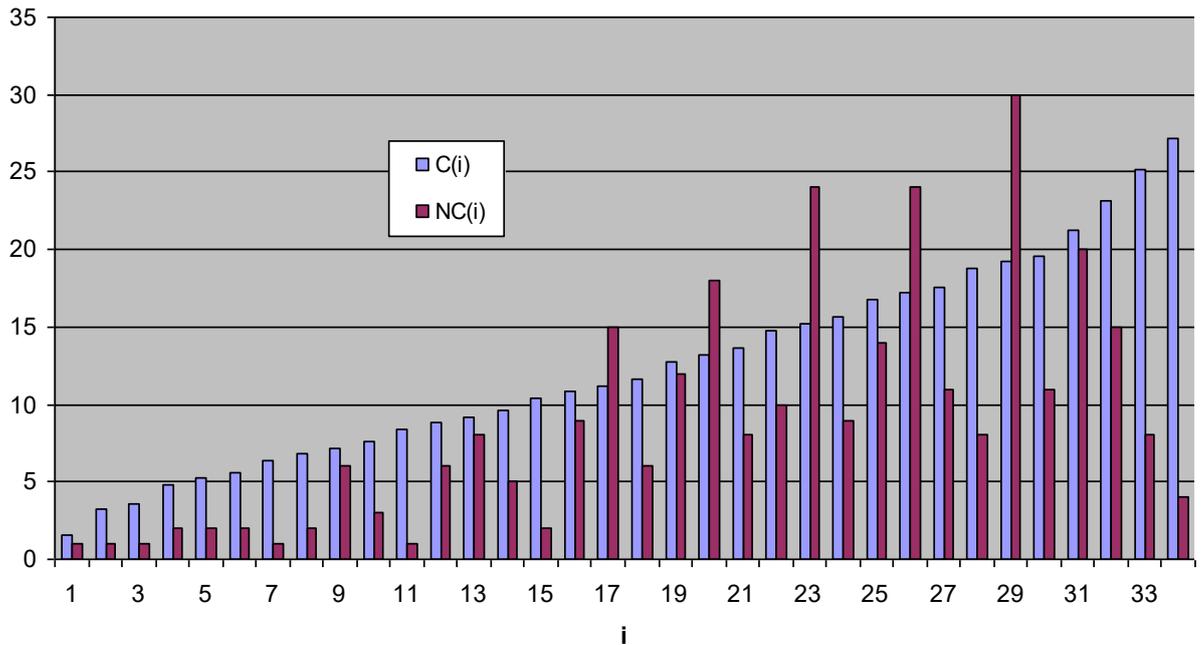


Рис. 2.6. Характеристики множини типових C -еквівалентних представників для $n = 5$ і $k = 32$.

2.6. Висновки за розділом 2

1. Коди Грея широко застосовуються на практиці, але вони мають низьку збалансованість і, у ряді випадків, не можуть бути використані. У зв'язку із цим ведеться пошук альтернативних варіантів кодування – ведеться пошук кодів, що мають такі самі характеристики, що й коди Грея.

2. Математичне моделювання багатьох завдань, що мають комбінаторну структуру, потребує використання нових класів комбінаторних множин. Процес вирішення завдання побудови комбінаторних множин, що мають складну комбінаторну структуру, можна поділити на два етапи. Перший етап є описом і генерацією елементів комбінаторної множини, що має задані властивості. Другий етап полягає у вирішенні завдання перерахування об'єктів і може бути виконаний методами перечислювальної комбінаторики.

3. Розроблено метод побудови кодів одиничної відстані, в основі якого лежать графові моделі кодів Грея – граф гіперкуба з позначеними вершинами. Гамільтоновість гіперкуба тісно пов'язана з теорією кодів Грея і існує бієктивна

відповідність між набором n -бітних циклічних кодів Грея і набором гамільтонових циклів у гіперкубі Q_n . Аналогічна властивість має місце для ациклічних n -бітових кодів Грея та гамільтонових шляхів. Розроблено алгоритм вирішення задачі, наведено приклад його роботи. Побудовані всі гамільтонові шляхи та цикли для гіперкуба Q_3 .

4. Досліджено властивості кодів з одиничною відстанню. Визначені властивості множини кодових слів, структура коду, характеристики коду, канонічна форма.

5. Для подальшого дослідження коди одиничної відстані розбиваються на класи еквівалентності щодо заданої групи перетворень та досліджуються властивості представників класів. Серед можливих перетворень двійкових матриць виділено перетворення, при яких зберігається властивість одиничної відстані між сусідніми двійковими словами коду. Це перестановка стовпців (P -перетворення) та інверсія стовпців (N -перетворення). У кожному класі еквівалентності визначається типовий представник класу. Розглянуто спосіб визначення типових представників та побудову системи різних представників.

Були досліджені всі коди одиничної відстані та побудовано каталог для $n = 3$ і $k = 8$. Аналіз отриманих результатів показав, що множина цих кодів може бути розбита на три класи еквівалентності, що охоплює відомі альтернативні коди Грея. Коди, що належать одному класу еквівалентності E , мають однакові значення типового представника, структуру коду та збалансованість.

6. Вперше розроблено метод ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності відносно заданої для кожного ієрархічного рівня групи перетворень та визнаються типові представники для кожного класу еквівалентності. Застосування методу ієрархічної класифікації дозволяє спростити аналіз множин кодів, досліджуючи властивості типових представників окремих класів еквівалентності. Розроблено алгоритм вирішення задачі, наведено приклад його роботи.

7. Матеріали другого розділу опубліковані у роботах [76, 97 – 103].

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТИВНЕ ПЕРЕРАХУВАННЯ КОДІВ ОДИНИЧНОЇ ВІДСТАНІ

3.1 Метод формування системи різних типових представників

У другому розділі розглянуто метод класифікації кодів з одиничною відстанню. Подальший етап роботи передбачає побудову систем різних представників для різних класів еквівалентності. Тобто виникає необхідність розробки конструктивних методів опису комбінаторних множин, що мають задані властивості [104, 105]. Побудова таких множин зі складною комбінаторною структурою може здійснюватися засобами комбінаторного аналізу [106, 107]. Одним із ключових напрямів цієї галузі є теорія перерахування, що використовується для виведення та дослідження формул для точного і асимптотичного підрахунку елементів у різних класах об'єктів [108, 109]. Розв'язання конкретної задачі перерахування дає змогу виявити специфічні комбінаторні властивості досліджуваних об'єктів, що проявляються як у самому процесі перерахування, так і в отриманих результатах [110].

До основних методів перерахування відносять [111, 112]: метод безпосередніх підрахунків; метод рекурентних співвідношень; метод твірних функцій; асимптотичні методи; теорія перерахування Д. Пойа [113, 114]. Центральне місце серед зазначених методів займає метод твірних функцій, описаний у роботах М. Клазар [115], Н. Камерон [116], Д. Вест [106]. Цей метод має розвинутий математичний апарат та зводить задачу перерахування до визначення кількості послідовностей із певними спеціальними властивостями або без них. У комбінаторному аналізі використовуються твірні функції різних видів: експоненційного типу, ряди П. Діріхле, твірні функції Л. Ейлера тощо.

Теорія перерахування Д. Пойа, заснована на роботах В. Бернсайда [117], Ф. Харари [118], Д. Брейна [119, 120] на введенні відношень еквівалентності на множині об'єктів перерахування відносно заданої групи підстановок.

Розрізняють два основні типи задач перерахування: підрахунок

позначених об'єктів і підрахунок об'єктів, нееквівалентних щодо заданої групи підстановок. Для задач першого типу існує широкий спектр методів розв'язання, проте вони не є повністю уніфікованими. Задачі другого типу, як правило, розв'язуються шляхом зведення до відповідної задачі першого типу або її модифікованого варіанту [106, 116].

Застосування теорії Д. Пойа при вирішенні конкретного завдання вимагає, щоб були виявлені умови її застосовності, визначена відповідна група підстановок і явно побудований цикловий індекс [119, 121].

Актуальною проблемою сучасної комбінаторики залишається генерація та підрахунок комбінаторних конфігурацій із заздалегідь визначеними властивостями [104, 108]. У роботах [122, 123] розглянута побудова формальних описів комбінаторних множин, що мають складну структуру, на основі описів базових множин, до яких віднесені перестановки, сполучення й розміщення.

Для побудови системи типових представників для групи Π -перетворень розроблено алгоритм, при описі якого використовуються наступні позначення [124]:

i – поточний номер коду, що розглядається,

X^i – код, що розглядається

$T(X^i)$ – типовий представник коду X^i ,

S^i – структура коду X^i ,

KT – кількість різних типових представників,

MT – множина різних типових представників,

KS – кількість структур кодів,

MS – множина структур кодів,

$KTC(S_j)$ – кількість різних типових представників, що мають структуру S_j ,
 $j = 1, \dots, KS$,

$MTC(S^i, KTC(S^i))$ – множина різних типових представників, що мають структуру S^i .

Алгоритм побудови системи типових представників для групи Π -перетворень складається з наступних етапів [124]:

1. $i = 0$.
2. $KT = 0, KS = 0$.
3. $i = i + 1$.
4. Сформувати код X^i .
5. Визначити типового представника коду $X^i - T(X^i)$.
6. Визначити структуру коду $X^i - S^i$.
7. Якщо $T(X^i) \in MT$, то перейти до етапу 19.
8. $KT = KT + 1$.
9. $MT(KT) = T(X^i)$.
10. Якщо $S^i \in MS$, то перейти до етапу 12.
11. Перейти до етапу 15.
12. $KTC(S^i) = KTC(S^i) + 1$.
13. $MTC(S^i, KTC(S^i)) = T(X^i)$.
14. Перейти до етапу 19.
15. $KS = KS + 1$.
16. $MS(KS) = S^i$.
17. $KTC(S^i) = 1$.
18. $MTC(S^i, KTC(S^i)) = T(X^i)$.
19. Якщо розглянуті всі варіанти коду, то кінець роботи алгоритму.
20. Перейти до етапу 3.

У таблиці 3.1 наведений приклад побудови системи типових представників для групи Π -перетворень [124].

Таблиця 3.1.

Приклад побудови системи типових представників для групи
 Π -перетворень

i	X^i	$T(X^i)$	S^i	MT	MS
1	01326457fb98aecdd	01326457fb98aecdd	1356	$MT(1) = T(X1)$	$MS(1) = S1$
2	01326457fb9dc8ae	01326457fb9dc8ae	1455	$MT(2) = T(X2)$	$MS(2) = S2$

Продовження таблиці 3.1.

3	01326457fb9dcea8	01326457fb9dcea8	1446	$MT(3) = T(X3)$	$MS(3) = S3$
4	01326457fba89dce	01326457fba89dce	1356	$MT(4) = T(X1)$	
5	01326457fbaec89d	01326457fbaec89d	1455	$MT(5) = T(X5)$	
6	01326457fbaecd98	01326457fbaecd98	1446	$MT(6) = T(X6)$	
7	01326457fd98ceab	01326457fd98ceab	1455	$MT(7) = T(X7)$	
8	01326457fd9ba8ce	01326457fd9ba8ce	1347	$MT(8) = T(X8)$	$MS(4) = S8$
9	0132a89bfd5764ce	01326457fd9ba8ce	1347	$T(X9) \in MT$	
10	0132abfd98c4576e	013267fd54c89bae	3336	$MT(9) = T(X10)$	$MS(5) = S10$
11	0132abfd98ce6457	013267fd54cea89b	2355	$MT(10) = T(X11)$	$MS(6) = S11$
12	0137feab98cd5462	0137feab98cd5462	2346	$MT(11) = T(X12)$	$MS(7) = S12$
13	01546237fd9baec8	01326457fb9dcea8	1446	$T(X13) \in MT$	
14	015467fb32a89dce	013267fd54c89bae	3336	$T(X14) \in MT$	
15	0154cdfb98a2376e	013267fd54c89bae	3336	$T(X15) \in MT$	
16	0154cdfb98ae6237	013267fd54cea89b	2355	$T(X16) \in MT$	
17	015d9b32a8cef764	01375d98c46efba2	3444	$MT(12) = T(X17)$	$MS(8) = S17$
18	015d9b37fe62a8c4	01375d9bfea8c462	2256	$MT(13) = T(X18)$	$MS(9) = S18$
19	015dfb98aec46732	0137fd54ce62ab98	2445	$MT(14) = T(X19)$	$MS(10) = S19$
20	015dfb98c46732ae	0137fd5462ab98ce	3345	$MT(15) = T(X20)$	$MS(11) = S20$
21	015dfb98c46ea237	0137fd5462aec89b	3345	$MT(16) = T(X21)$	
22	015dfb98cea23764	0137fd546ec89ba2	2445	$MT(17) = T(X22)$	
23	015dfe64c89ba237	0137fea2645dc89b	3345	$MT(18) = T(X23)$	
24	015dfe6732ab98c4	0137feab98cd5462	2346	$T(X24) \in MT$	
25	015dfea23764c89b	0137fec89ba2645d	3345	$MT(19) = T(X25)$	
26	0198a2376ec45dfb	0132645dcea89bf7	2355	$MT(20) = T(X26)$	
27	0198a23bf7546ecd	01326457fd98ceab	1455	$T(X27) \in MT$	
28	0198a23bf75dc46e	01326457fd9ba8ce	1347	$T(X28) \in MT$	
29	0198a23bf75dce64	01326457fd9baec8	1446	$MT(21) = T(X29)$	
30	0198a23bf7645dce	01326457fdc89bae	1356	$MT(22) = T(X30)$	

Продовження таблиці 3.1.

31	0198a23bf76ec45d	01326457fdcea89b	1257	$MT(23) = T(X31)$	$MS(12) = S31$
32	0198c45df76ea23b	01326457fdcea89b	1257	$T(X32) \in MT$	
33	019d573bfea264c8	01375d9bfea8c462	2256	$T(X33) \in MT$	
34	023bae64c89df751	01375d98c46efba2	3444	$T(X34) \in MT$	
35	023bae64cdf75198	01375d98cefba264	2445	$MT(24) = T(X35)$	
36	023bae67fd5198c4	01375d9bfea264c8	2346	$MT(25) = T(X36)$	
37	023bae67fd54c891	01375d9bfea8c462	2256	$T(X9)$	
38	023bae67fd9154c8	01375d9bfe62a8c4	2445	$MT(26) = T(X38)$	
39	023bae67fd98c451	01375d9bfe64c8a2	2445	$MT(27) = T(X39)$	
40	023bae67fdc45198	01375d9bfec8a264	2256	$MT(28) = T(X40)$	
41	02a8c46efb319d57	01326457fb98aecd	1356	$T(X41) \in MT$	
42	045dce62a8913bf7	01375d98c462aefb	3336	$MT(29) = T(X42)$	
43	045dce62a89bf731	01375d98c46efba2	3444	$T(X43) \in MT$	
44	0462a8cef7315d9b	01326457fba89dce	1356	$T(X44) \in MT$	
45	08a264cefb9d5137	01326457fb9dc8ae	1455	$T(X45) \in MT$	

У таблиці 3.2 наведена сформована система різних типових представників [124].

Таблиця 3.2.

Система різних типових представників

KS	S	KTC (KS)	$MTC(S)$	KS	S	KTC (KS)	$MTC(S)$
1	1257	1	01326457fdcea89b	8	2355	1	013267fd54cea89b
2	1347	1	01326457fd9ba8ce			2	0132645dcea89bf7
3	1356	1	01326457fb98aecd	9	2445	1	0137fd54ce62ab98
		2	01326457fba89dce			2	0137fd546ec89ba2
		3	01326457fdc89bae			3	01375d98cefba264

Продовження таблиці 3.2.

4	1446	1	01326457fb9dcea8	10	3336	4	01375d9bfe62a8c4
		2	01326457fbaecd98			5	01375d9bfe64c8a2
		3	01326457fd9baec8			1	013267fd54c89bae
5	1455	1	01326457fb9dc8ae	11	3345	2	01375d98c462aefb
		2	01326457fbaec89d			1	0137fd5462ab98ce
		3	01326457fd98ceab			2	0137fd5462aec89b
6	2256	1	01375d9bfea8c462	12	3444	3	0137fea2645dc89b
		2	01375d9bfec8a264			4	0137fec89ba2645d
7	2346	1	0137feab98cd5462	12	3444	1	01375d98c46efba2
		2	01375d9bfea264c8				

На рис. 3.1 наведена оцінка збалансованості варіантів.

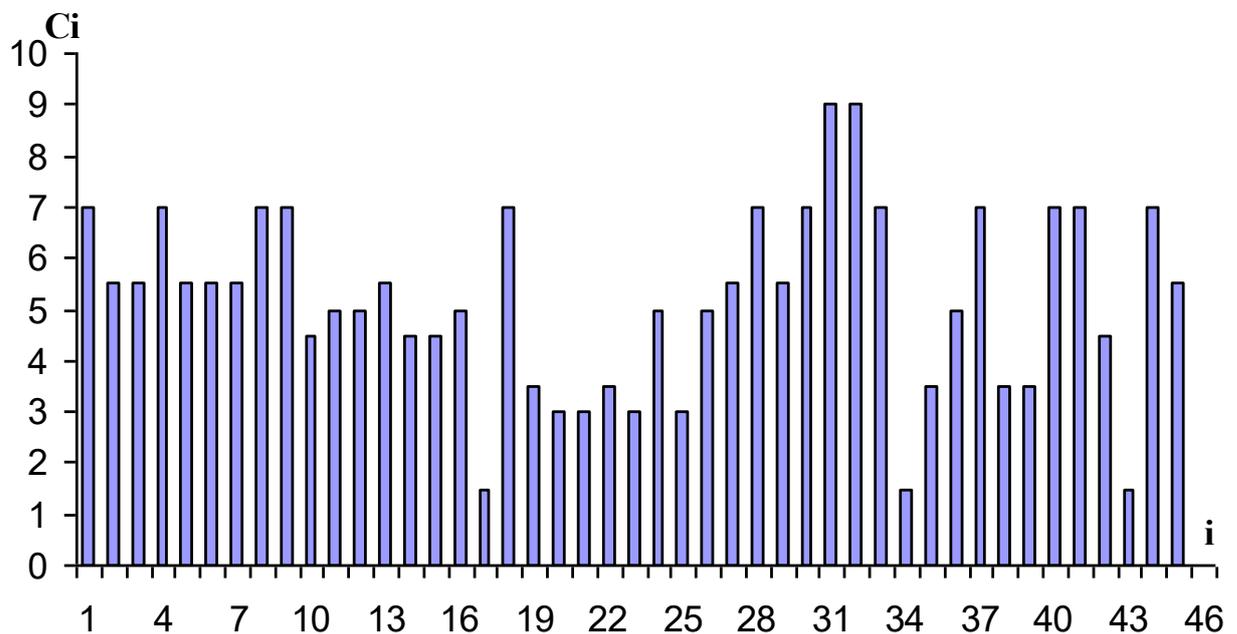


Рис. 3.1. Оцінка збалансованості варіантів.

У таблиці 3.2 наведено двійкові коди та їх характеристики: двійковий позиційний код X^1 , код Грея X^2 , двійковий код X^3 ($i = 17$ у таблиці 3.1), що відповідає структурі $S(X^3) = \{3, 4, 4, 4\}$ і його типовий представник X^4 [124].

Таблиця 3.2.

Двійкові коди та їх характеристики

X ¹				X ²				X ³				X ⁴			
x ¹ ₁	x ¹ ₂	x ¹ ₃	x ¹ ₄	x ² ₁	x ² ₂	x ² ₃	x ² ₄	x ³ ₁	x ³ ₂	x ³ ₃	x ³ ₄	x ⁴ ₁	x ⁴ ₂	x ⁴ ₃	x ⁴ ₄
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1
0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1
0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1
0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0
1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0

Кількість змін значень кожного розряду для зазначених кодів мають вигляд: $H^1 = \{1, 3, 7, 15\}$, $H^2 = \{1, 2, 4, 8\}$, $H^3 = \{4, 3, 4, 4\}$, $H^4 = \{4, 4, 3, 4\}$. Значення збалансованості кодів: $C^1 = 4,5$; $C^2 = 9$; $C^3 = 1,5$; $C^4 = 1,5$. Порівняльний аналіз отриманих результатів показує, що вид кодів істотно впливає на його характеристики. Так у наведеному вище прикладі, збалансованість отриманого типового представника X^4 в 6 разів краще цього показника в кодї Грея.

За допомогою описаного методу були досліджені різні види кодів одиничної відстані та побудовані каталоги типових представників [125].

3.2 Система типових представників для класів PN-еквівалентності

На першому рівні ієрархічної класифікації розглядаються наступні види перетворень: перестановка стовпців (P -перетворення) і інверсія стовпців (N -перетворення). Множина кодів одиничної відстані для вказаної групи перетворень розбивається на класи еквівалентності $CE_1 - CE_{LPN}$, де LPN – кількість класів еквівалентності першого рівня [126].

Кількість варіантів NP -типів (LS_i) для $n = 4$, що мають однакову структуру наведено на рис. 3.2, а оцінка їх збалансованості (C_i) наведена на рис. 3.3 (i – номер структури коду, $i = 1, \dots, 18$).

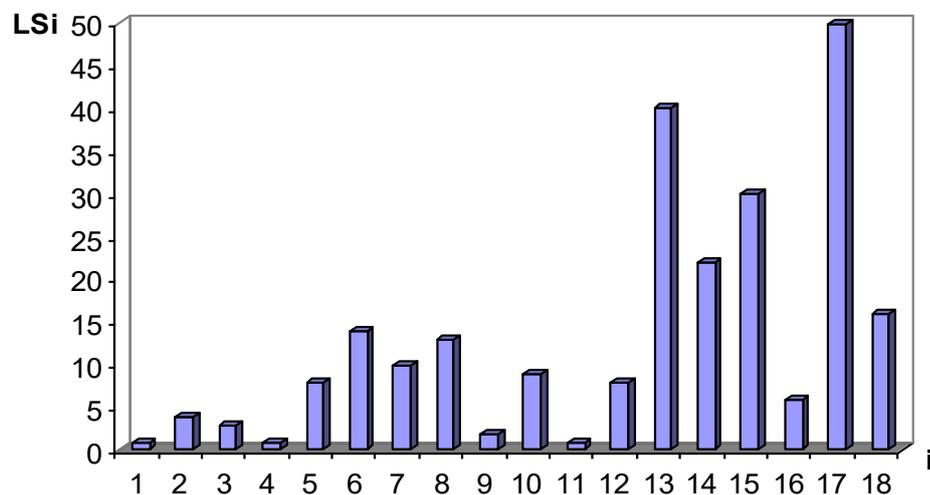


Рис. 3.2. Кількість варіантів NP -типів (LS_i) для $n = 4$, що мають однакову структуру

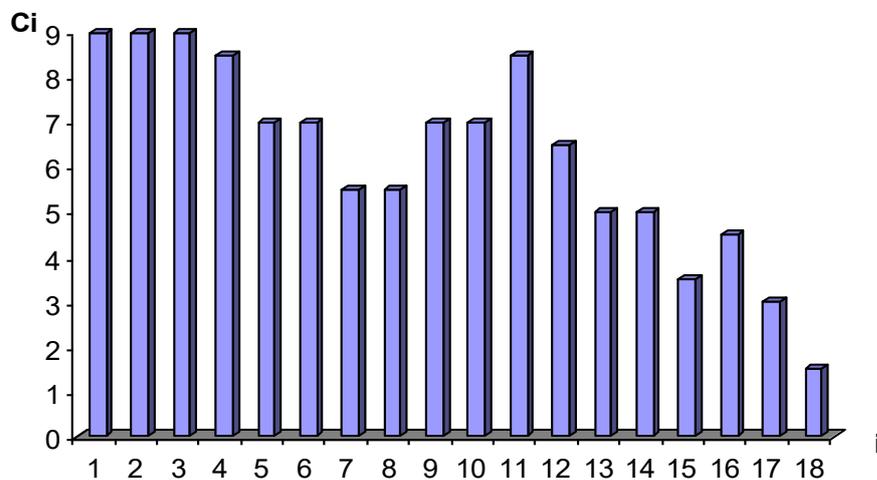


Рис. 3.3. Збалансованість варіантів структур для $n = 4$

У таблиці 3.3 наведені характеристики класів еквівалентності для $n = 4$ і $k = 16$.

Таблиця 3.3.

Характеристики класів еквівалентності для $n = 4$ і $k = 16$

C	№	S				Кількість
		s_1	s_2	s_3	s_4	
9	1	1	2	4	8	1
	2	1	2	5	7	4
	3	1	2	6	6	3
8,5	4	1	3	3	8	1
	5	2	2	3	8	1
7	6	1	3	4	7	8
	7	1	3	5	6	14
	8	2	2	4	7	2
	9	2	2	5	6	9
6,5	10	2	3	3	7	8
5,5	11	1	4	4	6	10
	12	1	4	5	5	13
5,0	13	2	3	4	6	40
	14	2	3	5	5	22
4,5	15	3	3	3	6	6
3,5	16	2	4	4	5	30
3,0	17	3	3	4	5	50
1,5	18	3	4	4	4	16

У таблиці 3.4 наведена система типових представників для $n = 3$, $n = 4$, $C = 3,0$; $S = (3, 3, 4, 5)$. Повністю каталог NP -типів наведено у додатку А.

Таблиця 3.4.

Система типових представників для $C = 3,0; S = (3, 3, 4, 5)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	013264c89baef75d	18	01326ec457fba89d	35	013762a89d54cefb
2	013264c89d57fbae	19	01326ec45d98abf7	36	013762a8c45d9bfe
3	013264c89d57feab	20	01326ef754c8ab9d	37	013762aefd54c89b
4	013264c8ab9d57fe	21	013754c89ba26efd	38	0137fb98a2645dce
5	013264c8aef75d9b	22	013754c89dfba26e	39	0137fb98a26ec45d
6	013264cd57fb98ae	23	013754c89dfe62ab	40	0137fb98cd5462ae
7	013264cea89d57fb	24	013754c8a26efb9d	41	0137fb98cea2645d
8	013267fb98aec45d	25	013754c8a26efd9b	42	0137fba2645d98ce
9	013267fb9d54c8ae	26	013754cd98a26efb	43	0137fd5462ab98ce
10	013267fea8c45d9b	27	013754cdfb98a26e	44	0137fd5462aec89b
11	01326ea89bf754cd	28	013754ce62a89dfb	45	0137fd54c89ba26e
12	01326ea89dc457fb	29	01375d98a264cefb	46	0137fe62a8c45d9b
13	01326ea8c457fb9d	30	01375d98c462abfe	47	0137fea2645dc89b
14	01326ea8c457fd9b	31	01375dc462a89bfe	48	0137fec89ba2645d
15	01326ea8c45d9bf7	32	01375dfea264c89b	49	0137fec89d5462ab
16	01326eab98c457fd	33	013762a89bfd54ce	50	0137fec8a2645d9b
17	01326eab98c45df7	34	013762a89bfec45d		

Характеристики досліджених кодів для $n = 3$ і $n = 4$ наведені в таблиці 3.5. Позначення: N_{code} – загальна кількість двійкових кодів, N_{udc} – кількість кодів з одиначною відстанню, N_{tip} – кількість NP -типів, N_{st} – кількість структур кодів, C_{Gray} – значення збалансованості коду Грея, C_{min} – мінімальне значення збалансованості кодів, L_{Cmin} – кількість NP -типів, з мінімальною збалансованістю.

Таблиця 3.5.

Характеристики досліджених кодів для $n = 3, k = 8$ і $n = 4, k = 16$

n	N_{code}	N_{udc}	N_{tip}	N_{st}	C_{Gray}	C_{min}	C_{Gray}/C_{min}	L_{Cmin}
3	40320	144	3	3	3,3	1,3	2,5	1
4	2×10^{13}	91392	238	18	9	1,5	6	16

Наведені результати показують, що кількість типових варіантів кодів з одиничною відстанню значно менше загальної кількості кодів, що дозволяє вибрати оптимальне кодування без перебору варіантів. Ефективність застосування методу росте з ростом кількості розрядів коду. Так, для $n = 3$ поліпшення збалансованості оптимальних кодів становить 2,5 рази й 6 разів для $n = 4$.

3.3 Система типових представників структур кодів одиничної відстані

Серед характеристик кодів одиничної відстані важливе місце займає структура коду $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, яка формується на підставі значень кількості змін значень змінних у стовпцях $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ [126]:

$$S(X) = \langle H(X), \leq \rangle . \quad (3.1)$$

Коди, що мають однакову структуру, мають однакове значення збалансованості коду C [126].

Структура n -розрядного коду одиничної відстані $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ має наступні властивості [126]:

$$s_1 \leq s_2 \leq s_3 \dots s_{n-1} \leq s_n, \sum_{i=1}^n s_i = k - 1, 0 \leq s_i \leq k/2. \quad (3.2)$$

Задача побудови множини типових структур S -еквівалентних кодів одиничної відстані $MS = \{S_1, \dots, S_{NS}\}$, де NS – кількість типових S -еквівалентних

структур, зводиться до визначення усіх варіантів впорядкованого розбиття числа $k - 1$ на n частин, що задовольняють вказаним обмеженням. Завдання перерахування варіантів структур кодів зводиться до специфічної задачі розбиття чисел.

У теорії чисел розроблено різні підходи до оцінки кількості розбиттів числа, які можна розділити на два види: асимптотичні та точні. Н. Rademacher [127], S. Ramanujan [128], L. Euler [129], G. Hardy [130] отримали асимптотичні оцінки кількості розбиттів. L. Euler [131] довів пентагональну теорему і запропонував описувати послідовність кількості розбиттів $p(n)$ за допомогою твірної функції. S. Ramanujan [86] отримав асимптотичний вираз для кількості розбиттів. D. Andrica [132] представив кількість розбиттів числа у вигляді ряду, що сходиться.

Методи точної оцінки досліджували J. Riordan [133], N. Cameron [123], I. Mezo [134], D. West [106]. Н. Gupta [135] запропонував метод формування розбиттів, заснований на обчисленні еnumerаторів і з його допомогою побудував докладніші таблиці розбиттів без обмежень. D. Knuth [109, 136] запропонував алгоритм для багатьох розбиттів. F. Ruskey та A. Williams представили модифіковану версію алгоритму Knuth's з відстанню 2 [137]. G. Ehrlich представив алгоритм зациклювання для множини розбиттів [138]. F. Ruskey та C. Savage узагальнили результати Ehrlich's на набір рядків невід'ємних цілих чисел і ввели два коди Грея для множини розбиття [31]. У статті [139] T. Mansour і G. Nassar описали комбінаторний код Грея для безлічі розбиття, який відрізняється від кодів Грея.

В даний час ведуться дослідження щодо створення безциклового алгоритму для генерації набору всіх розбиттів, що забезпечує постійний час між послідовними розбиттями в процесі побудови. G. Ehrlich вперше запровадив поняття безциклових алгоритмів. У роботах [110, 140] запропоновано безцикловий алгоритм, що генерує розбиття. Він ґрунтується на двох кроках: спочатку створюється пласке дерево, вершини якого є розбиттям. Потім

визначається новий метод обходу пласких дерев, який забезпечує постійний час між послідовними розбиттям.

У статті [141] показано, що елементи деяких сімейств цілих розбивок можуть бути перераховані в порядку мінімальної зміни або коду Грея. При цьому розглядалося перерахування спеціальних наборів, у яких послідовні елементи відрізнялися невеликою заздалегідь заданою зміною. Такі схеми перерахування називаються алгоритмами мінімальної зміни або комбінаторних кодів Грея на честь відображеного двійкового коду Грея. Ці схеми можуть дозволити «ефективну» генерацію комбінаторних сімейств експонентного розміру.

Wilf H. S. [35, 142] розглянувши завдання побудови кодів Грея для цілих розбивок і досліджував можливість при заданому n скласти список розбивок n так, щоб послідовні частини відрізнялися тільки тим, що одна частина збільшується на 1 і одна частина зменшується на 1. Ruskey F. [41] за допомогою двічі рекурсивної конструкції довів, що таке перерахування завжди існує.

Loehr N. [37] запропонував представляти розбиття як наочних геометричних об'єктів, званих діаграмами. Діаграма – це кінцевий набір осередків або клітин, вирівняних по лівій межі, в якому довжини рядків утворюють послідовність, що не збільшується (кожний рядок такої ж довжини як попередній, або коротше). Набір чисел, що складається з довжин рядків, задає розбиття невід'ємного цілого числа, що дорівнює загальній кількості осередків діаграми.

Серед існуючих підходів до формування розбиття слід зазначити алгоритми створення всіх розбиттів як різних видів композиції. Аналіз ефективності створення композицій проведено в роботах [143, 144]. Алгоритми порівнюються шляхом проведення поглибленого теоретичного аналізу та використання цього аналізу для якісних та кількісних прогнозів відносної ефективності алгоритмів. Точність цих прогнозів та обґрунтованість обраної теоретичної моделі потім оцінюється шляхом емпіричного спостереження.

Відомі методи формування розбиттів не враховують особливості задачі, що розглядається – специфічної задачі розбивки чисел з обмеженнями.

Для побудови системи типових представників структур кодів одиничної відстані розроблено алгоритм, в основі якого лежить послідовна генерація варіантів розбиття та перевірка встановлених обмежень [126].

У таблиці 3.6 наведені характеристики отриманих каталогів типових представників: значення загальної кількості розбивок A , кількість варіантів структур S та кількість C еквівалентних типових представників для $n = 3, 4, 5$.

Таблиця 3.6.

Характеристики отриманих каталогів типових представників
структур кодів

n	3	4	5
A	4	27	427
NS	3	18	299
NC	3	10	34

У додатку Б наведено каталог типових варіантів структур кодів.

3.4 Система типових представників двійково-десяткових кодів із одиничною відстанню

Десяткова арифметика набуває дедалі більшого значення у багатьох додатках (фінансових, комерційних, наукових та інших), де потрібно високий рівень точності [145].

Перетворення між двійковим уявленням та десятковим числом може призвести до помилок [146, 147]. З введенням стандарту IEEE754 [148] та створенням процесорів, призначених для десяткових чисел, зростає обсяг робіт, спрямованих на мінімізацію помилок як при кодуванні десяткових чисел, так і в операціях, що виконуються над десятковими числами [149, 150]. При цьому розглядаються альтернативні методи кодування двійково-десяткових кодів, які

дозволять ефективно розробляти дискретні пристрої. Використання нестандартних двійково-десяткових кодів запропоновано в роботі [151].

В даний час існує різні форми двійково-десяткових кодів. Найбільш відомі наступні двійково-десяткових коди, що виявляють помилки: Excess-3 Gray [4], Glixon [152], Klar [153], O'Brien I, O'Brien II [154], Paul [155], Petherick (RAE) [156], Susskind [157], Tompkins I, Tompkins II [158]. У таблицях 3.7 і 3.8 наведено таблиці цих кодів, десяткова цифра позначена «D».

Таблиця 3.7.

Двійково-десяткові коди Gray BCD, Glixon, O'Brien I, Tompkins I

D	Gray BCD				Glixon				O'Brien I				Tompkins I			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
3	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
4	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
5	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
6	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
7	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1
8	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
9	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0

За допомогою описаних вище методів були побудовані усі типові двійково-десяткові коди одиничної відстані. У таблиці 3.9 наведені усі типові представники циклічних двійково-десяткових кодів одиничної відстані, а у таблиці 3.10 – ациклічні.

Таблиця 3.8.

Двійково-десяткові коди Excess-3 Gray, Klar, Tompkins II, Paul

D	Excess-3 Gray				Klar				Tompkins II				Paul			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
3	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
4	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1
5	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
7	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
8	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
9	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Порівняльний аналіз найпоширеніших двійково-десяткових кодів показав, що коди Klar, O'Brien II, Petherick (RAE) та Susskind еквівалентні відносно групи *PN*-перетворень.

Таблиця 3.9.

Типові представники циклічних двійково-десяткових кодів одиначної відстані

01326ea8c4	0137fb98c4	0132645d98	01326efba8	01375dfe64	01375dc8a2
0137546ea2	0137fb9d54	0132645dc8	01326efd54	01375dfea8	01375dce62
013754c8a2	0137fb9dc4	013264cd98	01326efd98	01375dfec4	01375dcea2
013754ce62	0137fba264	013264cea8	01326efdc4	01375dfec8	01375dfba2
013754cea2	0137fba8c4	01326754c8	01326efdc8	013762ab98	01375dfe62
01375d98a2	0137fbae64	0132675d98	01375462a8	013762aec8	01375dfea2
01375d98c4	0137fbaec4	0132675dc4	0137546ea8	01326eab98	013762a8c4
01375d9ba2	0137fd5462	0132675dc8	0137546ec8	01326ecd54	013762aec4

Продовження таблиці 3.10.

01375dc462	0137fd54c8	013267fb98	013754cd98	01326ecd98	01376efd98
013764c8a2	0137fd98a2	013267fba8	013754cea8	01326ef754	01376efdc4
013764cea2	0137fd98c4	013267fd54	01375d9ba8	01326efb98	01376efdc8
01376ea8c4	0137fd9ba2	013267fd98	01375dce64	01376eab98	0137fb9dc8
01376ec8a2	0137fdc462	013267fdc4	01375dcea8	01376ecd54	0137fbae62
0137fb98a2	0137fdc8a2	013267fdc8	01375dfb98	01376ecd98	0137fbaec8
0137fea264	0137fdce62	013267fea8	01375dfba8	01376efb98	0137fd9ba8
0137fea8c4	0137fdcea2	013267fec4	0137645dc8	01376efba2	0137fdce64
0137fec462	0137fe62a8	013267fec8	013764cd98	01376efba8	0137fdcea8
0137fec8a2	0137fe64c8	0137645d98	013764cea8	01376efd54	0137feab98
0137fecd54	0137fecd98				

Таблиця 3.10.

Типові представники ациклічних двійково-десяткових
кодів одиничної відстані

01326457fb	01326ec457	01375d98ab	013764c8ab	0137fba8cd	0137fecd9b
0132645d9b	01326ec45d	01375d98ae	013764c8ae	0137fba8ce	01326457fd
0132645df7	01326ec89b	01375d98ce	013764cd9b	0137fbaecd	01326457fe
0132645dfb	01326ec89d	01375d9bae	013764cdfb	0137fd546e	0132645dce
013264c89b	01326ec8ab	01375d9bfe	013764ceab	0137fd54ce	0132645dfe
013264c89d	01326ecd57	01375dc46e	013764cefb	0137fd98ab	013264cdfc
013264c8ab	01326ecd9b	01375dc89b	01376ea89b	0137fd98ae	013264cefd
013264c8ae	01326ecdf7	01375dc8ab	01376ea89d	0137fd98ce	01326754ce
013264cd57	01326ecdfb	01375dc8ae	01376ea8cd	0137fd9bae	0132675dce
013264cd9b	01326ef75d	01375dceab	01376eab9d	0137fdc46e	0132675dfe
013264cdf7	01326efb9d	01375dcefb	01376eabfd	0137fdc89b	013267fbae
013264cdfb	01326efd57	01375dfbae	01376ec45d	0137fdc8ab	013267fdce
013264ceab	01326efd9b	01375dfeab	01376ec89b	0137fdc8ae	0137546ecd

Продовження таблиці 3.10.

013264cef7	01375462ab	013762a89b	01376ec89d	0137fdceab	0137546efd
013264cefb	01375462ae	013762a89d	01376ec8ab	0137fe62ab	013754cdfe
0132675d9b	0137546eab	013762a8cd	01376ecd9b	0137fe645d	013754cefd
0132675dfb	0137546efb	013762a8ce	01376ecdfb	0137fe64cd	013762abfe
013267fb9d	013754c89b	013762ab9d	01376efb9d	0137fea89b	013762aefb
013267fd9b	013754c89d	013762abfd	01376efd9b	0137fea89d	0137645dce
01326ea89b	013754c8ab	013762aecd	0137fb98ae	0137fea8cd	0137645dfe
01326ea89d	013754c8ae	013762aefd	0137fb98cd	0137feab9d	013764cdfe
01326ea8cd	013754cd9b	0137645d9b	0137fb98ce	0137fec45d	013764cefd
01326eab9d	013754cdfb	0137645dfb	0137fb9dce	0137fec89b	01326754cd
01326eabf7	013754ceab	013764c89b	0137fba26e	0137fec89d	013267feab
01326eabfd	013754cefb	013764c89d	0137fba89d	0137fec8ab	013267fecd

У таблиці 3.11 наведені характеристики типових представників двійково-десяткових кодів одиничної відстані.

Таблиця 3.11.

Характеристики типових представників двійково-десяткових
кодів одиничної відстані

Вид типових представників двійково-десяткових кодів одиничної відстані	C	Структура S	Кількість
Циклічні	1,5	2 2 2 3	44
	3,5	1 2 2 4	66
Ациклічні	3,0	1 2 3 3	126
	5,0	1 1 3 4	21
	5,5	1 1 2 5	3

У таблиці 3.12 наведено типові представники для найпоширеніших двійково-десяткових кодів. Порівняльний аналіз показує, що коди Klar, O'Brien II, Petherick (RAE) та Susskind мають одного типового представника, тобто вони еквівалентні відносно групи PN -перетворень.

Таблиця 3.12.

Типові представники для найпоширеніших двійково-десяткових кодів

№	Код	Тип. пред.	№	Код	Тип. пред.
1	Paul	0137fb9dc8	6	Petherick(RAE)	01376efb98
2	Glixon	01326754c8	7	O'Brien II	
3	Tompkins I	01326efdc8	8	Susskind	
4	O'Brien I (Watts)	01326eab98	9	Klar	
5	Excess-3 Gray	01375dfb98	10	Tompkins II	01376efd98

3.5 Висновки за розділом 3

1. У третьому розділі розглянуто конструктивне перерахування кодів одиначної відстані, при якому виникає необхідність розробки конструктивних засобів опису класів комбінаторних множин, що мають необхідні властивості. Показано, що процес вирішення завдання побудови комбінаторних множин, що мають складну структуру, може бути виконаний методами теорії перерахування комбінаторного аналізу. Аналіз існуючих методів перерахування, що вони не враховують особливості задачі, що розглядається.

2. Вперше розроблено метод конструктивного перерахування кодів одиначної відстані, заснований на визначенні інваріантів та генерації системи різних типових представників, що дозволяє формувати та аналізувати коди одиначної відстані з заданими властивостями збалансованості без повного перебору варіантів, спрощуючи задачу вибору оптимального кодування.

Для побудови каталогів типових представників для заданої групи перетворень розроблено метод формування системи різних типових

представників. Розроблено алгоритм вирішення задачі, наведено приклад його роботи. Аналіз отриманих результатів показує, що вид кодів істотно впливає на його характеристики. За допомогою запропонованого алгоритму були досліджені різні види кодів одиничної відстані та побудовані каталоги типових представників.

3. Побудована система типових представників для класів PN -еквівалентності, які розглядаються на першому рівні ієрархічної класифікації. Сформовано каталоги NP -типів, та наведені їх характеристики. Отримані результати показують, що кількість типових варіантів кодів з одиничною відстанню значно менша загальної кількості кодів, що дозволяє вибирати оптимальне кодування без перебору варіантів. Ефективність застосування методу росте з ростом кількості розрядів коду. Так для $n = 3$ поліпшення збалансованості оптимальних кодів становить 2,5 рази й 6 разів для $n = 4$.

4. Серед характеристик кодів одиничної відстані важливе місце займає структура коду, яка формується на підставі значень кількості змін значень змінних у стовпцях. Коди, що мають однакову структуру, мають однакове значення збалансованості коду S . Доведено, що задача побудови множини типових структур еквівалентних кодів одиничної відстані зводиться до визначення усіх варіантів впорядкованого розбиття числа, що задовольняють вказаним обмеженням.

Для побудови системи типових представників структур кодів одиничної відстані розроблено алгоритм, в основі якого лежить послідовна генерація варіантів розбиття та перевірка встановлених обмежень. Сформовано каталог типових варіантів структур кодів. Наведені характеристики отриманих каталогів типових представників: значення загальної кількості розбивок A , кількість варіантів структур S та кількість C еквівалентних типових представників для $n = 3, 4, 5$.

5. Досліджена система типових представників двійково-десяткових кодів із одиничною відстанню. Показано, що десяткова арифметика набуває дедалі

більшого значення у багатьох додатках, де потрібно високий рівень точності. Перетворення між двійковим уявленням та десятковим числом може призвести до помилок. З введенням стандарту IEEE754 та створенням процесорів, призначених для десяткових чисел, зростає обсяг робіт, спрямованих на мінімізацію помилок як при кодуванні десяткових чисел, так і в операціях, що виконуються над десятковими числами. При цьому розглядаються альтернативні методи кодування двійково-десяткових кодів, які дозволять ефективно розробляти дискретні пристрої.

За допомогою описаних вище методів були побудовані каталоги типових представників двійково-десяткові кодів одиначної відстані циклічних та ациклічних. Аналіз отриманих результатів показує, що усі відомі найпоширеніші двійково-десяткові коди входять у склад каталогів, а коди Klar, O'Brien II, Petherick (RAE) та Susskind мають одного типового представника, тобто вони еквівалентні відносно групи PN -перетворень.

6. Матеріали другого розділу опубліковані у роботах [124 – 126, 159 – 162].

РОЗДІЛ 4

ОЦІЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ
ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ І АНАЛІЗУ КОДІВ ОДИНИЧНОЇ ВІДСТАНІ

4.1 Порівняльна характеристика властивостей відомих кодів з розробленими кодами

Відомі коди одиничної відстані, що використовуються у телекомунікаційних системах, мають низку недоліків, зокрема низьку збалансованість, що обмежує їх використання в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем. Традиційний код Грея, який є найбільш поширеним, забезпечує зміну тільки одного біту при переході між послідовними словами, однак перемикання зосереджені переважно в окремих розрядах, що призводить до підвищеного енергоспоживання та локальних пікових навантажень при переході між словами у кодовій послідовності.

У результаті проведених досліджень було розроблено метод побудови кодів одиничної відстані, метод ієрархічної класифікації та метод конструктивного перерахування кодів одиничної відстані. За допомогою отриманих методів було сформовано множини кодів та визначено їх належність до окремих класів еквівалентності. Для оцінки ефективності розроблених кодів доцільно провести порівняння із відомими кодами. Для порівняння використовується показник кількості змін значень h_i змінної (біта) в стовпці i та показник збалансованості S .

Кількість змін значень i -ї змінної в стовпці позначена h_i і визначається в такий спосіб:

$$H_i = \sum_{j=2}^k (x_{i,j-1} \oplus x_{i,j}), i = 1, \dots, n. \quad (4.1)$$

Збалансованість коду C визначається в такий спосіб:

$$C = \sum_{i=1}^n \left| h_i - \frac{\sum_{j=1}^n h_j}{n} \right| \quad (4.2)$$

Результати застосування розроблених методів для коду довжиною $n = 3$ наведені у таблиці 4.1. Виявлено, що вся множина кодових послідовностей представлена трьома класами еквівалентності. Зокрема, класичний код Грея належить до класу, що має збалансованість $C = 3.3$, тоді як отриманий клас з найкращою збалансованістю має показник $C_{min} = 1.3$.

Таблиця 4.1.

Характеристика класів еквівалентності для $n = 3$

C	№	H			Кількість
		h_1	h_2	h_3	
2,6	1	1	3	3	1
3,3	2	1	2	4	1
1,3	3	2	2	3	1

У таблиці 4.2 наведена характеристика класів еквівалентності для $n = 4$. Виявлено 18 класів еквівалентності, що свідчить про ускладнення аналізу зі зростанням розрядності коду. Класичний код Грея належить до класу що має збалансованість $C = 9$, тоді як клас з найкращою збалансованістю має показник $C_{min} = 1.5$.

У табл. 4.3 наведено узагальнені результати дослідження двійкового коду, класичного коду Грея та побудованих кодів одичної відстані.

Таблиця 4.2.

Характеристика класів еквівалентності для $n = 4$

C	№	H				Кількість
		h_1	h_2	h_3	h_4	
9	1	1	2	4	8	1
	2	1	2	5	7	4
	3	1	2	6	6	3
8,5	4	1	3	3	8	1
	5	2	2	3	8	1
7	6	1	3	4	7	8
	7	1	3	5	6	14
	8	2	2	4	7	2
	9	2	2	5	6	9
6,5	10	2	3	3	7	8
5,5	11	1	4	4	6	10
	12	1	4	5	5	13
5,0	13	2	3	4	6	40
	14	2	3	5	5	22
4,5	15	3	3	3	6	6
3,5	16	2	4	4	5	30
3,0	17	3	3	4	5	50
1,5	18	3	4	4	4	16

Аналіз отриманих результатів свідчить, що застосування запропонованих методів дозволяє зменшити значення збалансованості порівняно з відомими кодами. Зокрема, для коду довжиною $n = 3$ значення показника збалансованості покращується у 2,5 рази, для коду довжиною $n = 4$ - у 6 разів відносно класичного коду Грея.

Таблиця 4.3.

Значення збалансованості досліджених кодів для $n = 3$ і $n = 4$

n	C_{bin}	C_{Gray}	C_{min}	C_{Gray}/C_{min}
3	6,7	3,3	1,3	2,5
4	4,5	9	1,5	6

Застосування розробленого методу ієрархічної класифікації дозволяє суттєво зменшити кількість варіантів кодових послідовностей, що потребують аналізу, при цьому зберігаючи основні властивості кодів одиничної відстані. Ефективність представлено на рисунку 4.1 та таблиці 4.4. Для коду довжиною $n = 3$ обсяг кодів, що розглядаються, зменшується від загальної кількості кодів $N_{udc} = 144$ до кількості типових представників $N_{tip} = 3$, або на 97,9%. При $n = 4$, розмір множини кодових послідовностей зменшується з $N_{udc} = 91392$ до $N_{tip} = 238$, або на 99,7%. Подальше узагальнення до рівня структурних класів (N_{st}) зменшує кількість аналізованих варіантів до 18, забезпечуючи скорочення на 99.9%. Отримані результати показують, що кількість типових варіантів кодів з одиничною відстанню значно менша загальної кількості кодів, що дозволяє вибирати оптимальне кодування без перебору варіантів. Ефективність застосування методу росте з ростом кількості розрядів коду.

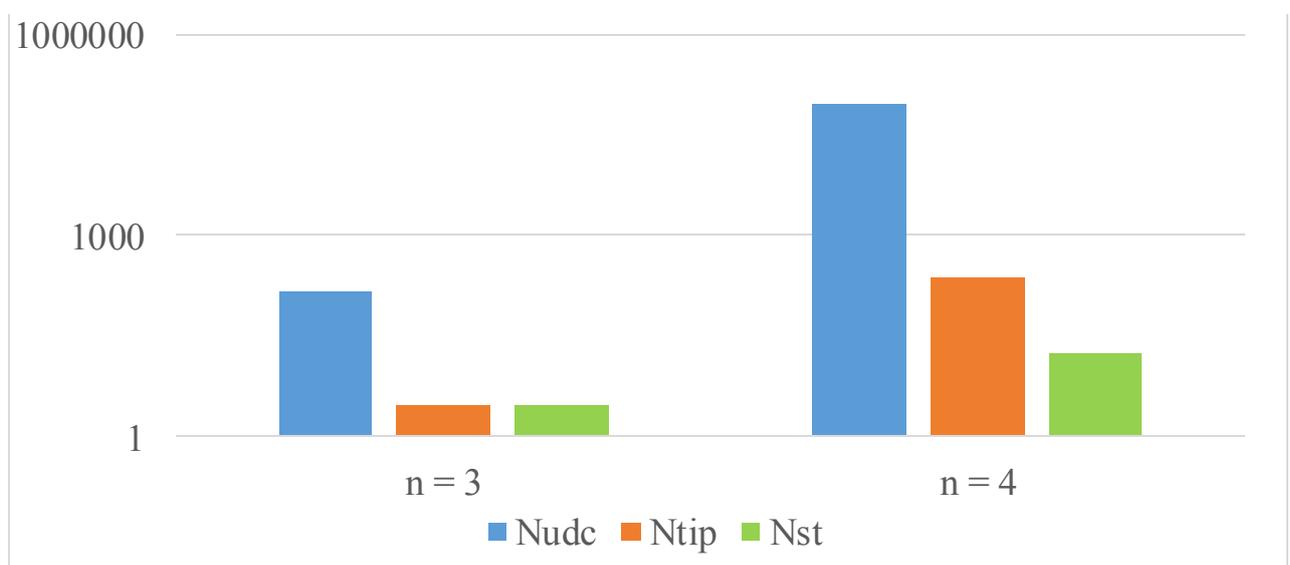


Рис. 4.1. Порівняння об'ємів кодових послідовностей

Таблиця 4.4.

Розміри множин кодових послідовностей для $n = 3$ і $n = 4$

n	N_{code}	N_{udc}	N_{tip}	N_{st}
3	40320	144	3	3
4	2×10^{13}	91392	238	18

Таким чином, у результаті проведеного порівняння виявлено, що отримані за допомогою розробленого методу побудови та методу конструктивного перерахування коди одиничної відстані мають кращі показники збалансованості відносно класичного коду Грея. Застосування розробленого методу ієрархічної класифікації дозволяє суттєво зменшити кількість варіантів кодових послідовностей, що потребують аналізу, спрощуючи задачу вибору оптимального кодування для енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем.

Оцінивши ефективність запропонованих методів, доцільно здійснити програмну та апаратну реалізацію для автоматизації побудови та аналізу кодів одиничної відстані.

4.2 Комп'ютерна програма «Інструмент генерації кодів одиничної відстані»

Інструмент генерації кодів одиничної відстані [163] – комп'ютерна програма, яка автоматично формує та відображає користувачу варіанти кодів одиничної відстані. Комп'ютерна програма призначена для автоматизації та полегшення формування наборів кодів одиничної відстані, що дозволяє розширити та оптимізувати вибір кодування під час проектування інформаційно-комунікаційних систем та проведення досліджень щодо характеристик кодів.

Комп'ютерна програма є прикладним інструментом з інтерфейсом користування через командний рядок. Програма створена за допомогою мови програмування C++. Складається із виконуваного файлу що необхідно

скопіювати на комп'ютер для використання. Системні вимоги: комп'ютер з операційною системою Windows 7 (x86/x64) та вище, оперативна пам'ять (RAM) – 1Gb та більше, процесор частотою 1 ГГц та більше.

Щоб почати роботу з програмою необхідно скопіювати виконуваний файл «Unit-Distance Codes Generator.exe» на комп'ютер, що задовольняє системні вимоги. Після цього необхідно запустити файл та слідувати інструкціям.

На запит ввести розмірність задачі – довжину бітового представлення числа у кодовій послідовності (n). Програма підтримує значення n в діапазоні від 2 до 8 включно.

Після введення значення для генерації кодів натисніть клавішу Enter. Програма створить 100 кодових послідовностей та збереже їх у файлі «UDCG_Output.txt». Якщо потрібно згенерувати більше кодів, увести «y» у відповідь на запит програми про подальшу генерацію.

Вихідний файл програми «UDCG_Output.txt» має текстовий формат і містить список кодових послідовностей. Кожна послідовність виведена на окремому рядку. Вигляд файлу показано на рисунку 4.2.

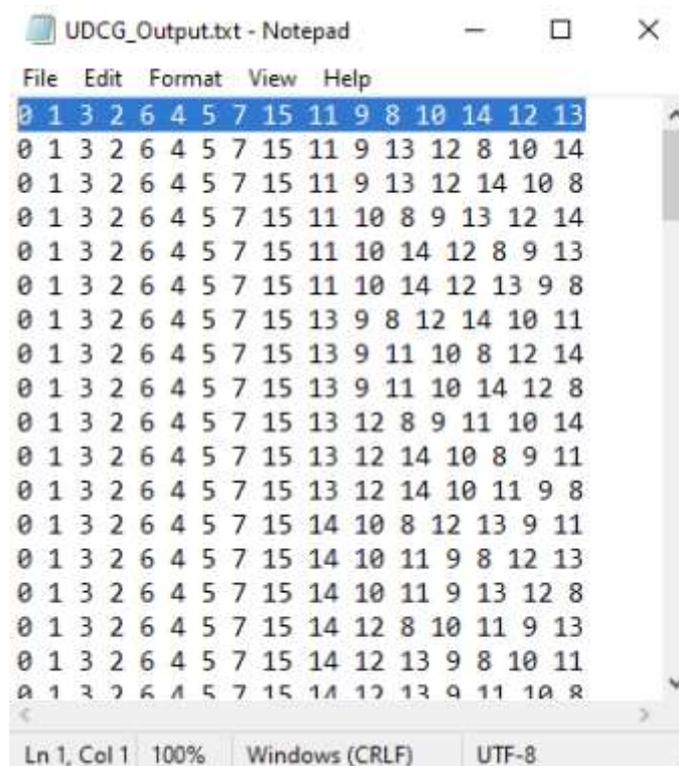


Рис. 4.2. Загальний вигляд файлу «UDCG_Output.txt»

Сформовані за допомогою програми коди одиничної відстані для $n = 3$ наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5.

Коди одиничної відстані отримані в результаті роботи програми

01326457	01326754	01375462	01546237	01546732	01573264
02315467	02315764	02376451	02645137	02645731	02673154
04513267	04513762	04576231	04623157	04623751	04675132
10237546	10237645	10264573	10457326	10457623	10462375
13204576	13204675	13267540	13754026	13754620	13762045
15402376	15402673	15467320	15732046	15732640	15764023
20137546	20137645	20154673	20451376	20467315	20467513
23104576	23104675	23157640	23751046	23764015	23764510
26401375	26401573	26457310	26731045	26731540	26754013
31026457	31026754	31045762	31540267	31576204	31576402
32015467	32015764	32046751	32640157	32675104	32675401
37510264	37510462	37546201	37620154	37620451	37645102
40132675	40157326	40157623	40231576	40267315	40267513
45102376	45102673	45137620	45731026	45762013	45762310
46201375	46201573	46237510	46732015	46751023	46751320
51023764	51046237	51046732	51320467	51376204	51376402
54013267	54013762	54026731	54620137	54673102	54673201
57310264	57310462	57326401	57623104	57640132	57640231
62013754	62045137	62045731	62310457	62375104	62375401
64015732	64023157	64023751	64510237	64573102	64573201
67315402	67320154	67320451	67513204	67540132	67540231
73102645	73154026	73154620	73201546	73264015	73264510
75104623	75132046	75132640	75401326	75462013	75462310
76204513	76231045	76231540	76402315	76451023	76451320

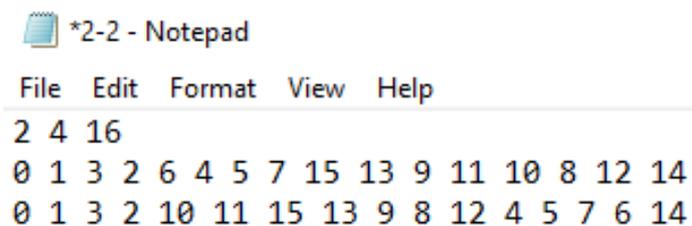
4.3 Комп'ютерна програма «Програма визначення еквівалентності кодів»

Комп'ютерна програма [164] призначена для аналізу кодів та для визначення еквівалентності двійкових кодів відносно групи *PN*-перетворень.

Вихідний файл має наступну структуру:

- кількість кодів, що аналізуються,
- кількість розрядів коду,
- кількість слів у коді,
- опис кодів, що аналізуються.

Приклад вихідного даних наведено на рис. 4.3.



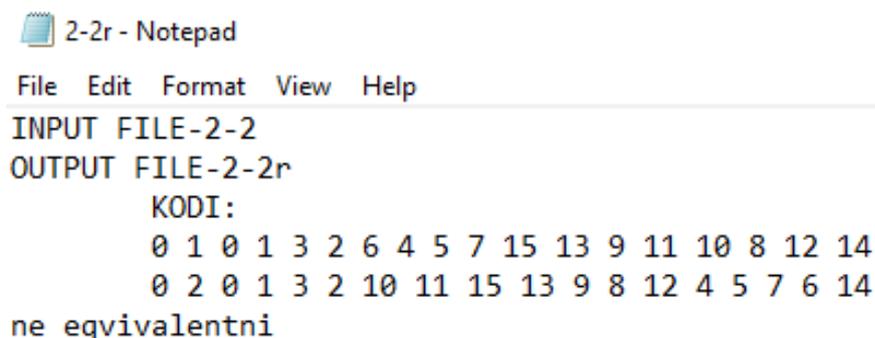
```
*2-2 - Notepad
File Edit Format View Help
2 4 16
0 1 3 2 6 4 5 7 15 13 9 11 10 8 12 14
0 1 3 2 10 11 15 13 9 8 12 4 5 7 6 14
```

Рис. 4.3. Приклад вихідного файлу програми

В результаті роботи програми формується файл результату, який містить:

- назви файлів,
- коди, що аналізуються,
- результат аналізу.

Приклад файлу результату наведено на рис. 4.4.



```
2-2r - Notepad
File Edit Format View Help
INPUT FILE-2-2
OUTPUT FILE-2-2r
KODI:
0 1 0 1 3 2 6 4 5 7 15 13 9 11 10 8 12 14
0 2 0 1 3 2 10 11 15 13 9 8 12 4 5 7 6 14
ne equivalentni
```

Рис. 4.4. Приклад файлу результату програми

4.4 Комп'ютерна програма «System of distinct representatives»

Комп'ютерна програма [165] призначена для аналізу множини кодів, проведення перетворення кодів, визначення їх характеристик та виділення системи різних представників.

У основі роботи програми лежить генерація NP -перетворень кодів, визначення типового представника (T); номера типу (N_T); структури типу (S); значення збалансованості коду (C) та визначення його циклічності (L).

Розроблене програмне забезпечення побудовано по модульному принципі і допускає гнучку адаптацію до вирішення більш широкого класу задач.

Спілкування з ЕОМ відбувається в режимі діалогу. Ініціатором діалогу виступає ЕОМ.

У результаті роботи програми формується файл результату, що містить опис характеристик кодів.

Вихідний файл має наступну структуру:

- кількість кодів;
- кількість розрядів коду;
- кількість строк у кодї;
- опис кодів.

Приклад вихідного даних наведено на рис. 4.5.

В результаті роботи програми формується файл результату, який містить:

- коди, що аналізуються (X);
- опис типового представника (T);
- номер типу (N_T);
- структуру типу (S);
- значення збалансованості коду (C);
- циклічність коду (L).

```

*INPUT - Notepad
File Edit Format View Help
30 4 16
0 1 3 2 6 7 15 11 9 13 5 4 12 14 10 8
0 1 3 2 6 14 10 8 9 11 15 7 5 13 12 4
0 1 3 2 6 4 5 7 15 11 9 8 10 14 12 13
0 1 3 2 10 8 9 11 15 7 5 13 12 4 6 14
0 1 3 2 6 4 5 13 12 14 10 8 9 11 15 7
0 1 3 2 6 4 5 7 15 11 9 13 12 8 10 14
0 1 3 2 6 4 5 13 12 8 9 11 10 14 15 7
0 1 3 2 10 8 9 11 15 7 5 4 6 14 12 13
0 1 3 2 6 4 12 14 10 11 15 7 5 13 9 8
0 1 3 2 6 14 15 7 5 13 9 11 10 8 12 4
0 1 3 2 6 14 10 11 9 13 15 7 5 4 12 8
0 1 3 2 6 14 10 8 9 11 15 7 5 13 12 4

```

Рис. 4.5. Приклад файлу вихідного файлу програми

Приклад результату роботи програми наведено у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6.

Приклад результату роботи програми

№	X	T	N_T	S	C	ζ
1	0 1 3 2 6 7 15 11 9 13 5 4 12 14 10 8	013267fb9d54cea8	1	3444	1.5	1
2	0 1 3 2 6 14 10 8 9 11 15 7 5 13 12 4	01326ea89bf75dc4	2	3444	1.5	1
3	0 1 3 2 6 4 5 7 15 11 9 8 10 14 12 13	01326457fb98aecd	3	1356	7.0	
4	0 1 3 2 10 8 9 11 15 7 5 13 12 4 6 14	01326457fb9dc8ae	4	1455	5.5	
5	0 1 3 2 6 4 5 13 12 14 10 8 9 11 15 7	0132645dcea89bf7	5	2355	5.0	
6	0 1 3 2 6 4 5 7 15 11 9 13 12 8 10 14	01326457fb9dc8ae	4	1455	5.5	
7	0 1 3 2 6 4 5 13 12 8 9 11 10 14 15 7	0132645dc89baef7	6	2337	6.5	
8	0 1 3 2 10 8 9 11 15 7 5 4 6 14 12 13	01326457fb98aecd	3	1356	7.0	
9	0 1 3 2 6 4 12 14 10 11 15 7 5 13 9 8	013264ceabf75d98	7	3444	1.5	1
10	0 1 3 2 6 14 15 7 5 13 9 11 10 8 12 4	01326ef75d9ba8c4	8	3444	1.5	1
11	0 1 3 2 6 14 10 11 9 13 15 7 5 4 12 8	01326eab9df754c8	9	3444	1.5	1
12	0 1 3 2 6 14 10 8 9 11 15 7 5 13 12 4	01326ea89bf75dc4	2	3444	1.5	1
13	0 1 3 2 10 8 9 11 15 13 5 7 6 14 12 4	01326457fd9baec8	10	1446	5.5	1

Продовження таблиці 4.6.

14	0 1 3 2 10 11 15 7 5 13 9 8 12 14 6 4	013267fb9d54cea8	1	3444	1.5	1
15	0 1 3 2 10 8 12 14 6 7 15 11 9 13 5 4	013264ceabf75d98	7	3444	1.5	1
16	0 1 3 2 10 14 15 11 9 13 5 7 6 4 12 8	01326ef75d9ba8c4	8	3444	1.5	1
17	0 1 3 2 10 8 9 11 15 13 12 14 6 4 5 7	01326457fdcea89b	11	1257	9.0	
18	0 1 3 2 10 8 9 11 15 13 12 14 6 7 5 4	01326457fdceab98	12	1266	9.0	1
19	0 1 3 2 10 14 6 7 5 13 15 11 9 8 12 4	01326eab9df754c8	9	3444	1.5	1
20	0 1 3 2 10 14 6 4 5 7 15 11 9 13 12 8	01326ea89bf75dc4	2	3444	1.5	1
21	0 1 3 2 6 4 5 7 15 13 9 11 10 8 12 14	01326457fd9ba8ce	13	1347	7.0	
22	0 1 3 2 6 4 5 7 15 13 9 11 10 14 12 8	01326457fd9baec8	10	1446	5.5	1
23	0 1 3 2 6 4 5 7 15 13 12 8 9 11 10 14	01326457fdc89bae	14	1356	7.0	
24	0 1 3 2 6 4 5 7 15 13 12 14 10 8 9 11	01326457fdcea89b	11	1257	9.0	
25	0 1 3 2 6 4 12 14 10 11 15 7 5 13 9 8	013264ceabf75d98	7	3444	1.5	1
26	0 1 3 2 6 4 5 7 15 14 12 13 9 8 10 11	01326457fecd98ab	15	1257	9.0	
27	0 1 3 2 6 4 5 7 15 14 12 13 9 11 10 8	01326457fecd9ba8	16	1266	9.0	1
28	0 1 3 2 6 14 10 11 9 13 15 7 5 4 12 8	01326eab9df754c8	9	3444	1.5	1
29	0 1 3 2 6 4 5 13 9 8 12 14 10 11 15 7	0132645d98ceabf7	17	2355	5.0	
30	0 1 3 2 6 7 15 11 9 13 5 4 12 14 10 8	013267fb9d54cea8	1	3444	1.5	1

На основі отриманого файлу результату формуються зведені характеристики проаналізованих кодів (табл. 4.7).

Таблиця 4.7.

Зведені характеристики кодів

№	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>Ц</i>
1	1.5	3444	013267fb9d54cea8	1
			01326ea89bf75dc4	1
			013264ceabf75d98	1
			01326ef75d9ba8c4	1
			01326eab9df754c8	1

Продовження таблиці 4.7.

2	5.0	2355	0132645dcea89bf7	
3	5.5	1455	01326457fb9dc8ae	
		1446	01326457fd9baec8	1
4	6.5	2337	0132645dc89baef7	
5	7.0	1356	01326457fb98aecd	
			01326457fdc89bae	
		1347	01326457fd9ba8ce	
6	9.0	1257	01326457fdcea89b	
			01326457fec98ab	
		1266	01326457fdceab98	1
			01326457fec9ba8	1

4.5 Комп'ютерна програма «Програма формування кодів із заданими властивостями»

Комп'ютерна програма [166] призначена для формування двійкових кодів із заданими характеристиками (кількість розрядів коду, кількість слів, відстань по Хемінгу між словами).

В основі роботи програми лежить генерація варіантів кодів для заданої кількості розрядів коду та кількості слів у коді, аналіз їх характеристик та відбір тих, що відповідають заданим вимогам.

Програма побудована за модульним принципом і допускає гнучку адаптацію до рішення більш широкого класу задач. Спілкування з ЕОМ відбувається в режимі діалогу. Ініціатором діалогу виступає ЕОМ.

В результаті роботи програми формується файл результату, який містить:

- кодування двійкових слів (mk),
- вихідні дані (n, DD, RO),
- варіанти побудови коду,
- кількість варіантів.

Фрагмент результату роботи програми для $n = 4$, $DD = 9$, $RO = 1$ наведено у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8.

Фрагмент результату роботи програми

<i>mk</i>			
0 0 0 0	0 0 0 1	0 0 1 0	0 0 1 1
0 1 0 0	0 1 0 1	0 1 1 0	0 1 1 1
1 0 0 0	1 0 0 1	1 0 1 0	1 0 1 1
1 1 0 0	1 1 0 1	1 1 1 0	1 1 1 1
<i>n</i>	<i>DD</i>	<i>RO</i>	
4	9	1	
Варіанти побудови коду			
0 1 3 2 6 4 5 7 15	0 1 3 2 6 4 5 13 9	0 1 3 2 6 4 5 13 12	
0 1 3 2 6 4 5 13 15	0 1 3 2 6 4 12 8 9	0 1 3 2 6 4 12 8 10	
0 1 3 2 6 4 12 13 5	0 1 3 2 6 4 12 13 9	0 1 3 2 6 4 12 13 15	
0 1 3 2 6 4 12 14 10	0 1 3 2 6 4 12 14 15	0 1 3 2 6 7 5 4 12	
0 1 3 2 6 7 5 13 9	0 1 3 2 6 7 5 13 12	0 1 3 2 6 7 5 13 15	
0 1 3 2 6 7 15 11 9	0 1 3 2 6 7 15 11 10	0 1 3 2 6 7 15 13 5	
0 1 3 2 6 7 15 13 9	0 1 3 2 6 7 15 13 12	0 1 3 2 6 7 15 14 10	
0 1 3 2 6 7 15 14 12	0 1 3 2 6 14 10 8 9	0 1 3 2 6 14 10 8 12	
0 1 3 2 6 14 10 11 9	0 1 3 2 6 14 10 11 15	0 1 3 2 6 14 12 4 5	
0 1 3 2 6 14 12 8 9	0 1 3 2 6 14 12 8 10	0 1 3 2 6 14 12 13 5	
0 1 3 2 6 14 12 13 9	0 1 3 2 6 14 12 13 15	0 1 3 2 6 14 15 7 5	
...	
0 8 12 14 15 11 10 2 6	0 8 12 14 15 11 10 2 6	0 8 12 14 15 11 10 2 6	
0 8 12 14 15 13 5 4 6	0 8 12 14 15 13 5 4 6	0 8 12 14 15 13 5 4 6	

4.6 Апаратні засоби для аналізу та перетворення кодів

Корисна модель [167] перетворювач кодів відноситься до автоматики і обчислювальної техніки і призначена для використання в інформаційних обчислювальних системах.

Відомий генератор коду Грея (патент США № 10419003 В1, МПК Н03М 7/16, опубл. 17.09.2019), що містить лічильник, що підраховує цифрові біти з першого по четвертий у відповідь на тактовий сигнал, і перетворювач, що перетворює цифрові біти в біти Грея. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості.

Відомий перетворювач коду Грея в двійковий код і навпаки (патент України № 40178, МПК G 06 F 5/00, опубл. 25.03.2009, бюл. № 6, 2009) , що містить вхідний регістр, тригери, дешифратор коду Грея, інформаційні входи, вхід керування, елемент «І», групу елементів «АБО», шифратор коригуючих констант. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості.

Найбільш близьким по технічній суті і результату, що досягається є формувач послідовностей коду Грея (патент США № 6703950В2, МПК Н03М 7/16, опубл. 9.03.2004), що містить три входи, три виходи, два елемента нерівнозначність, причому перший вхід з'єднаний з першими входами першого та другого елементів нерівнозначність, другий вхід з'єднаний з другим виходом, вихід першого елемента нерівнозначність з'єднаний з першим виходом, вихід другого елемента нерівнозначність з'єднаний з третім виходом. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості, а саме низька збалансованість кодів, що формуються.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення перетворювача кодів шляхом введення нового складу елементів, та нової організації взаємозв'язків між ними, забезпечити кращу збалансованість кодів, що формуються.

Поставлене завдання вирішується тим, що перетворювач кодів, що містить три входи, три виходи, два елемента нерівнозначність, причому перший вхід

з'єднаний з першими входами першого та другого елементів нерівнозначність, другий вхід з'єднаний з другим виходом, вихід першого елемента нерівнозначність з'єднаний з першим виходом, вихід другого елемента нерівнозначність з'єднаний з третім виходом, згідно з корисною моделлю містить елемент «АБО» та елемент «І», причому другий вхід з'єднаний з першим входом елемента «І» та першим входом елемента «АБО», третій вхід з'єднаний з другим входом елемента «І» та другим входом елемента «АБО».

Заявлений пристрій має новий склад елементів, та нову організацію взаємозв'язків між ними, тобто містить нову сукупність ознак, які забезпечують нові технічні властивості винаходу – кращу збалансованість кодів, що формуються.

На рис. 4.6 представлена функціональна схема перетворювача кодів.

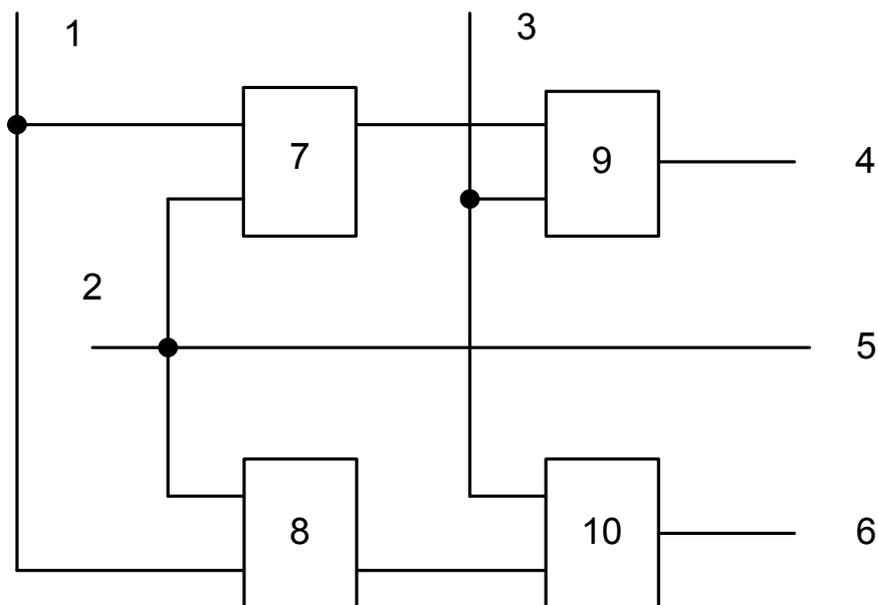


Рис. 4.6. Перетворювач кодів

Перетворювач кодів містить три входи 1,2,3, три виходи 4,5,6, елемент «І» 7, елемент «АБО» 8, два елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» 9 та 10, причому перший вхід 1 з'єднаний з першими входами першого та другого елементів «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» 9 та 10, другий вхід 2 з'єднаний з другим виходом 5, з першим входом елемента «І» та першим входом елемента «АБО», вихід першого

елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» 9 з'єднаний з першим виходом 4, вихід другого елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» 10 з'єднаний з третім виходом 6, третій вхід 3 з'єднаний з другим входом елемента «І» 7 та другим входом елемента «АБО» 8.

Працює пристрій у такий спосіб. На входи пристрою 1,2,3 подаються вхідні двійкові набори, а на виходах 4,5,6 формується збалансований двійковий код.

У таблиці 4.9 наведені десяткові еквіваленти двійкових кодів (D_B), позиційний код (Bin), двійковий еквівалент коду прототипу D_{II} , двійковий код на виході пристрою – прототипу U_{II} , двійковий еквівалент коду заявленого пристрою D_3 , двійковий код на виході заявленого пристрою U_3 .

Для кожного коду зазначені кількості змін значень кожного розряду $H = \{h_1, h_2, h_3\}$ і значення збалансованості коду C . Заявлений пристрій має в порівнянні із прототипом краще значення збалансованості C .

Таблиця 4.9.

Двійкові коди і їхні характеристики

D_0	U_B			D_{II}	U_{II}			D_3	U_3		
	x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	
2	0	1	0	3	0	1	1	3	0	1	
3	0	1	1	2	0	1	0	7	1	1	
4	1	0	0	6	1	1	0	5	1	0	
5	1	0	1	7	1	1	1	4	1	0	
6	1	1	0	5	1	0	1	6	1	1	
7	1	1	1	4	1	0	0	2	0	1	
H	1	3	7		1	2	4		2	3	
C	6.7				3.3				1.3		

4.7 Формувач збалансованих кодів

Корисна модель відноситься до автоматики і обчислювальної техніки і призначена для використання в інформаційних обчислювальних системах [168].

Відомий генератор коду Грея (патент США № 10419003 В1, МПК Н03М 7/16, опубл. 17.09.2019), що містить лічильник, що підраховує цифрові біти з першого по четвертий у відповідь на тактовий сигнал, і перетворювач, що перетворює цифрові біти в біти Грея. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості.

Відомий перетворювач коду Грея в двійковий код і навпаки (патент України № 40178, МПК G 06 F 5/00, опубл. 25.03.2009, бюл. № 6, 2009) , що містить вхідний регістр, тригери, дешифратор коду Грея, інформаційні входи, вхід керування, елемент «І», групу елементів «АБО», шифратор коригуючих констант. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості.

Найбільш близьким по технічній суті і результату, що досягається є формувач послідовностей коду Грея (патент США № 6703950В2, МПК Н03М 7/16, опубл. 9.03.2004), що містить чотири входи, чотири виходи, три елемента нерівнозначність, причому перший вхід з'єднаний з першими входами першого та другого елементів нерівнозначність, другий вхід з'єднаний з другим виходом, вихід першого елемента нерівнозначність з'єднаний з першим виходом, вихід другого елемента нерівнозначність з'єднаний з третім виходом. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості, а саме низька збалансованість кодів, що формуються.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення пристрою шляхом введення нового складу елементів, та нової організації взаємозв'язків між ними, забезпечити кращу збалансованість кодів, що формуються.

Поставлене завдання вирішується тим, що формувач збалансованих кодів, що містить чотири входи, чотири виходи, згідно з корисною моделлю містить два дешифратора, три елемента «НІ», два елемента «І», чотири елемента «АБО», причому перший вхід з'єднаний з першими входами першого та другого

дешифраторів, другий вхід з'єднаний з другими входами першого та другого дешифраторів, з першим входом першого елемента «І» та через перший елемент «НІ» з першим входом другого елемента «І», третій вхід з'єднаний з третім входом першого дешифратора, другим входом другого елемента «І» та через другий елемент «НІ» з другим входом першого елемента «І», четвертий вхід з'єднаний з третім входом другого дешифратора, з третім входом другого елемента «І» та через третій елемент «НІ» з третім входом першого елемента «І», входи першого елемента «АБО» з'єднані з третім, четвертим, п'ятим та сьомим виходами першого дешифратора, входи другого елемента «АБО» з'єднані з виходами елементів «І», з шостим та сьомим виходами першого дешифратора, та з шостим та сьомим виходами другого дешифратора, входи третього елемента «АБО» з'єднані з другим, третім, восьмим виходами першого дешифратора, та з третім та восьмим виходами другого дешифратора, входи четвертого елемента «АБО» з'єднані з другим, третім, п'ятим виходами першого дешифратора та з другим та п'ятим виходами другого дешифратора, вихід першого елемента «АБО» з'єднаний з першим виходом, вихід другого елемента «АБО» з'єднаний з другим виходом, вихід третього елемента «АБО» з'єднаний з третім виходом, вихід четвертого елемента «АБО» з'єднаний з четвертим виходом.

Заявлений пристрій має новий склад елементів, та нову організацію взаємозв'язків між ними, тобто містить нову сукупність ознак, які забезпечують нові технічні властивості винаходу – кращу збалансованість кодів, що формуються.

На рис. 4.7 представлена функціональна схема пристрою. Формувач збалансованих кодів містить чотири входи 1,2,3,4, чотири виходи 5,6,7,8, два дешифратора 9, 10, три елемента «НІ» 11,12,13, два елемента «І» 14,15, чотири елемента «АБО» 16,17,18,19. Елементи пристрою з'єднані наступним чином. Перший вхід 1 з'єднаний з першими входами дешифраторів 9 та 10, другий вхід 2 з'єднаний з другими входами дешифраторів 9, 10, з першим входом першого елемента «І» 15 та через перший елемент «НІ» 11 з першим входом другого елемента «І» 14, третій вхід 3 з'єднаний з третім входом першого дешифратора

9, другим входом другого елемента «І» 14 та через другий елемент «НІ» 12 з другим входом першого елемента «І» 15, четвертий вхід 4 з'єднаний з третім входом другого дешифратора 10, з третім входом другого елемента «І» 14 та через третій елемент «НІ» 13 з третім входом першого елемента «І» 15, входи першого елемента «АБО» 16 з'єднані з третім, четвертим, п'ятим та сьомим виходами першого дешифратора 9, входи другого елемента «АБО» 17 з'єднані з виходами елементів «І» 14, 15, з шостим та сьомим виходами першого дешифратора 9, та з шостим та сьомим виходами другого дешифратора 10, входи третього елемента «АБО» 18 з'єднані з другим, третім, восьмим виходами першого дешифратора 9, та з третім та восьмим виходами другого дешифратора 10, входи четвертого елемента «АБО» 19 з'єднані з другим, третім, п'ятим виходами першого дешифратора 9, та з другим та п'ятим виходами другого дешифратора 10, вихід першого елемента «АБО» 16 з'єднаний з першим виходом 5, вихід другого елемента «АБО» 17 з'єднаний з другим виходом 6, вихід третього елемента «АБО» 18 з'єднаний з третім виходом 7, вихід четвертого елемента «АБО» 19 з'єднаний з четвертим виходом 8.

Працює пристрій у такий спосіб. На входи пристрою 1,2,3,4 подаються вхідні двійкові набори, а на виходах 5,6,7,8 формується збалансований двійковий код.

У таблиці 4.10 наведені десяткові еквіваленти двійкових кодів (D_B), позиційний код (U_B), двійковий еквівалент коду прототипу D_{II} , двійковий код на виході пристрою – прототипу U_{II} , двійковий еквівалент коду заявленого пристрою D_3 , двійковий код на виході заявленого пристрою U_3 .

Для кожного коду зазначені кількості змін значень кожного розряду $H = \{h_1, h_2, h_3, h_4\}$ і значення збалансованості коду C . Заявлений пристрій має в порівнянні із прототипом краще значення збалансованості C .

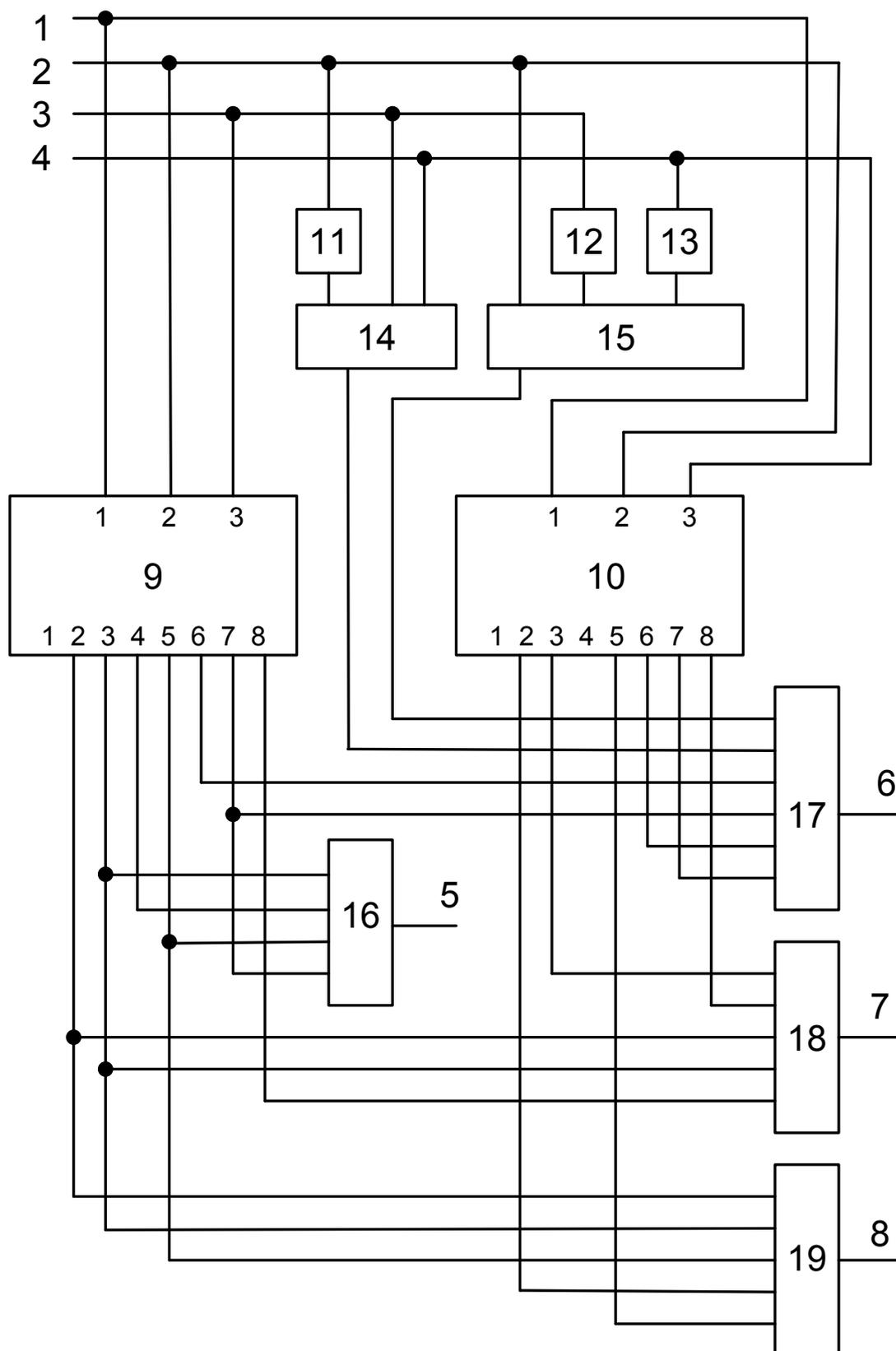


Рис. 4.7. Формувач збалансованих кодів

Таблиця 4.10.

Двійкові коди та їх характеристики

U _B					U _П					U ₃				
D _B	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	D _П	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	D ₃	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	3	0	0	1	1	3	0	0	1	1
3	0	0	1	1	2	0	0	1	0	7	0	1	1	1
4	0	1	0	0	6	0	1	1	0	15	1	1	1	1
5	0	1	0	1	7	0	1	1	1	11	1	0	1	1
6	0	1	1	0	5	0	1	0	1	10	1	0	1	0
7	0	1	1	1	4	0	1	0	0	8	1	0	0	0
8	1	0	0	0	12	1	1	0	0	9	1	0	0	1
9	1	0	0	1	13	1	1	0	1	13	1	1	0	1
10	1	0	1	0	15	1	1	1	1	5	0	1	0	1
11	1	0	1	1	14	1	1	1	0	4	0	1	0	0
12	1	1	0	0	10	1	0	1	0	12	1	1	0	0
13	1	1	0	1	11	1	0	1	1	14	1	1	1	0
14	1	1	1	0	9	1	0	0	1	6	0	1	1	0
15	1	1	1	1	8	1	0	0	0	2	0	0	1	0
Н	1	3	7	15	Н	1	2	4	8	Н	4	4	3	4
С	4,5				С	9				С	1,5			

4.8 Генератор еквівалентних кодів

Корисна модель відноситься до автоматики і обчислювальної техніки і призначена для використання в інформаційних обчислювальних системах [169].

Відомий генератор коду Грея (патент США US № 10419003 В1, МПК Н03М 7/16, опубл. 17.09.2019), що містить чотири входи, чотири виходи,

двійковий лічильник, три елемента нерівнозначність. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості.

Відомий перетворювач коду Грея в двійковий код і навпаки (патент України № 40178, МПК G 06 F 5/00, опубл. 25.03.2009, бюл. № 6, 2009) , що містить вхідний регістр, тригери, дешифратор коду Грея, інформаційні входи, вхід керування, елемент «І», групу елементів «АБО», шифратор корегуючих констант. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості.

Найбільш близьким по технічній суті і результату, що досягається є генератор послідовності N -розрядних двійкових кодів (патент України № 102743, МПК G 06 F 11/26, опубл. 12.08.2013, бюл. № 15, 2013) , що містить вхід запуску, двійковий лічильник, вихідну шину. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості, бо він не дозволяє виконувати перетворення кодів.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення пристрою шляхом введення нового складу елементів, та нової організації взаємозв'язків між ними, забезпечити ширші функціональні можливості: спроможність виконувати перетворення кодів та визначати їх характеристики.

Поставлене завдання вирішується тим, що генератор еквівалентних кодів, що має вхід запуску, двійковий лічильник, вихідну шину, згідно з корисною моделлю містить блок керування, другу вихідну шину, перший блок пам'яті, другий блок пам'яті, третій блок пам'яті, схему порівняння, регістр, перший блок перетворення, другий блок перетворення, причому вхід запуску з'єднаний з входом запуску блоку керування, перший вихід блоку керування з'єднаний з входом двійкового лічильника, другий вихід блоку керування з'єднаний з керуючим входом схеми порівняння, третій вихід блоку керування з'єднаний з керуючим входом першого блоку пам'яті, четвертий вихід блоку керування з'єднаний з керуючим входом другого блоку пам'яті, п'ятий вихід блоку керування з'єднаний з керуючим входом регістра, перша вихідна шина блоку керування з'єднана з першою групою входів першого блоку перетворення, друга вихідна шина блоку керування з'єднана з першою групою входів другого блоку

перетворення, виходи двійкового лічильника з'єднані з входами першого блоку пам'яті та першою групою входів другого блоку пам'яті, виходи першого блоку пам'яті з'єднані з другою групою входів першого блоку перетворення, виходи першого блоку перетворення, з'єднані з другою групою входів другого блоку перетворення, виходи другого блоку перетворення з'єднані з другою групою входів другого блоку пам'яті та входами регістра, виходи регістра з'єднані з першою групою входів схеми порівняння та входами третього блоку пам'яті, виходи третього блоку пам'яті з'єднані з першою вихідною шиною та другою групою входів схеми порівняння, вихід якої з'єднаний з керуючим входом третього блоку пам'яті, виходи другого блоку пам'яті з'єднані з другою вихідною шиною.

Заявлений пристрій має новий склад елементів, та нову організацію взаємозв'язків між ними, тобто містить нову сукупність ознак, які забезпечують нові технічні властивості винаходу – спроможність виконувати перетворення кодів та визначати їх характеристики.

На рис. 4.8 представлена функціональна схема пристрою. Генератор еквівалентних кодів містить вхід запуску 1, першу вихідну шину 2, другу вихідну шину 3, блок керування 4, двійковий лічильник 5, перший блок пам'яті 6, другий блок пам'яті 7, третій блок пам'яті 8, схему порівняння 9, регістр 10, перший блок перетворення 11, другий блок перетворення 12, причому вхід запуску 1 з'єднаний з входом запуску блоку керування 4, перший вихід блоку керування 4 з'єднаний з входом двійкового лічильника 5, другий вихід блоку керування 4 з'єднаний з керуючим входом схеми порівняння 9.

Третій вихід блоку керування 4 з'єднаний з керуючим входом першого блоку пам'яті 6, четвертий вихід блоку керування 4 з'єднаний з керуючим входом другого блоку пам'яті 6, п'ятий вихід блоку керування 4 з'єднаний з керуючим входом регістра 10, перша вихідна шина блоку керування 4 з'єднана з першою групою входів першого блоку перетворення 11, друга вихідна шина блоку керування 4 з'єднана з першою групою входів другого блоку перетворення 12, виходи двійкового лічильника 5 з'єднані з входами першого блоку пам'яті 6

та першою групою входів другого блоку пам'яті 7, виходи першого блоку пам'яті 6 з'єднані з другою групою входів першого блоку перетворення 11, виходи першого блоку перетворення 11, з'єднані з другою групою входів другого блоку перетворення 12, виходи другого блоку перетворення 12 з'єднані з другою групою входів другого блоку пам'яті 7 та входами регістра 10, виходи регістра 10 з'єднані з першою групою входів схеми порівняння 9 та входами третього блоку пам'яті 8, виходи третього блоку пам'яті 8 з'єднані з першою вихідною шиною 2 та другою групою входів схеми порівняння 9, вихід якої з'єднаний з керуючим входом третього блоку пам'яті 8, виходи другого блоку пам'яті 7 з'єднані з другою вихідною шиною 3.

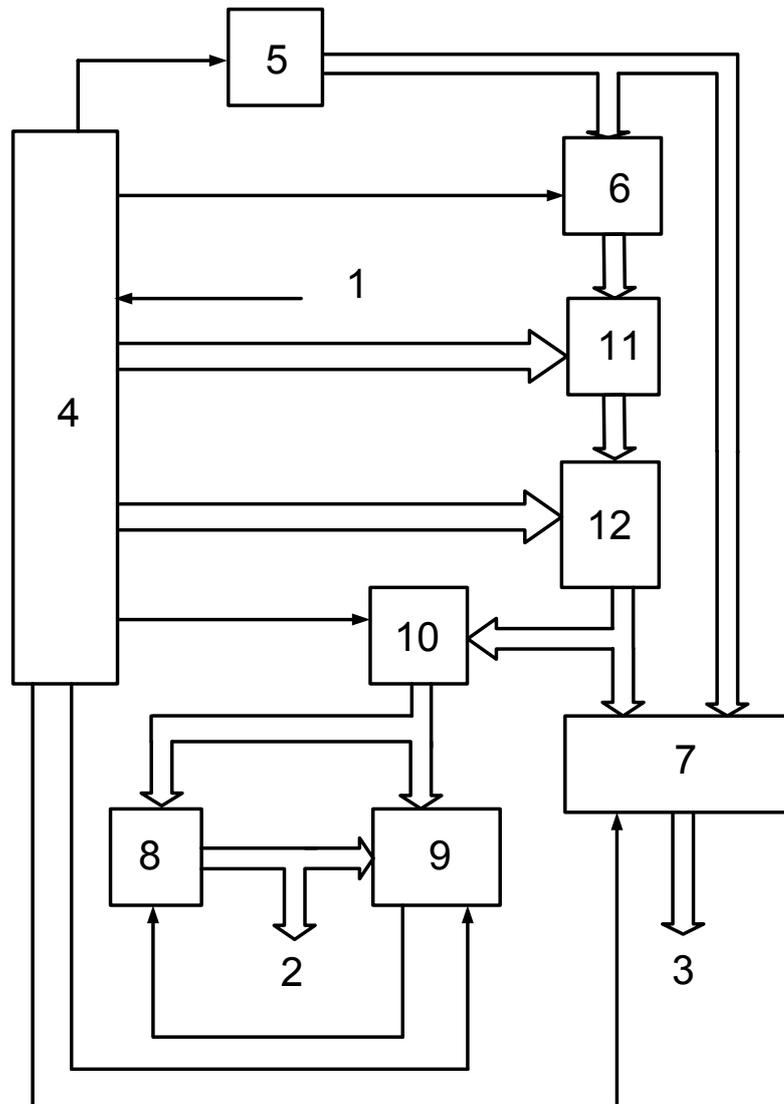


Рис. 4.8. Генератор еквівалентних кодів

Працює пристрій у наступний спосіб. У перший блок пам'яті 6 записано початковий двійковий код, у третій блок пам'яті 8 записано двійкове слово «1...1». На вхід запуску 1 подається імпульс, який запускає роботу пристрою. Блок керування 4 на першому виході формує імпульси, які поступають на вхід двійкового лічильника 5, послідовно змінюючи його стан і, відповідно, двійковий код, що поступає на входи першого блока пам'яті 6. На виході першого блока пам'яті 6 видається значення відповідного двійкового слова.

Блок керування 4 на першою та другою вихідних шинах формує двійкові коди, які поступають на перші групи входів першого блока перетворення 11 і другого блока перетворення 12.

Перший блок перетворення 11 для заданого двійкового коду формує перестановку значень відповідних розрядів двійкового слова, що розглядається, і передає отриманий код на входи другого блока перетворення 12, який у відповідності до двійкового коду, що надійшов по другій вихідній шині блоку керування 4 виконує інверсію відповідних розрядів. Двійковий код з виходів другого блока перетворення 12 поступає на другу групу входів другого блоку пам'яті 7 і записується в нього по адресі, що поступила з виходів двійкового лічильника 5 на його першу групу входів.

Одночасно двійковий код з виходів другого блока перетворення 12 поступає на входи регістру зсуву 10, який записує послідовно усі коди, що формуються на виходах другого блока перетворення 12.

Після перетворення усіх двійкових слів, що входять у склад початкового коду блок керування 4 на своєму п'ятому виході формує сигнал, що включає схему порівняння 9. Ця схема виконує порівняння двійкового слова, записаного у третьому блоці пам'яті 8 і слова, записаному у регістрі 10 і, якщо останнє менше ніж слово, записане у третьому блоці пам'яті 8, то схема порівняння 9 формує на своєму виході сигнал запису, що поступає на керуючий вхід третього блоку пам'яті 8 і в нього записується значення регістра 10. Таким чином, після виконання усіх заданих перетворень на виходах третього блоку пам'яті 8

сформовано слово мінімального виду, а у другому блоці пам'яті 7 записані усі види еквівалентних відносно заданих перетворень кодів.

4.9 Аналізатор кодів

Корисна модель відноситься до автоматики і обчислювальної техніки і призначена для використання в системах кодування, декодування та перетворення кодів [170].

Відомий генератор коду Грея (патент США № 10419003 В1, МПК Н03М 7/16, опубл. 17.09.2019), що містить лічильник, що підраховує цифрові біти з першого по четвертий у відповідь на тактовий сигнал, і перетворювач, що перетворює цифрові біти в біти Грея.

Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості.

Найбільш близьким по технічній суті і результату, що досягається є аналізатор В-коду («В-code analyzer», патент Китаю №CN218549946 (U) — МПК Н04J3/06, Н04L43/18, опубл. 28.02.2023), що містить блок керування та блок пам'яті. Недоліком відомого пристрою є низькі функціональні можливості, а саме неспроможність визначати характеристики двійкового коду.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення пристрою шляхом введення нового складу елементів, та нової організації взаємозв'язків між ними, забезпечити ширші функціональні можливості: спроможність визначати характеристики двійкового коду.

Поставлене завдання вирішується тим, що аналізатор кодів, що має блок керування та блок пам'яті, згідно з корисною моделлю, містить вхід запуску, вихід готовності результату, $n + 1$ групу інформаційних виходів, два мультиплексора, n елементів «І», n елементів «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ», n двійкових лічильників, суматор, причому вхід запуску з'єднаний з входом запуску блоку керування, вихід готовності результату з'єднаний з першим виходом блоку керування, перша група інформаційних виходів блоку керування з'єднана з адресними входами першого мультиплексора, друга група

інформаційних виходів блоку керування з'єднана з адресними входами другого мультиплектора, виходи блоку пам'яті з'єднані з інформаційними входами першого мультиплектора та другого мультиплектора, i -й вихід першого мультиплектора з'єднаний з першим входом i -го елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ», i -й вихід другого мультиплектора з'єднаний з другим входом i -го елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ», другий вихід блоку керування з'єднаний з першими входами елементів «І», вихід i -го елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» з'єднаний з другим входом i -го елемента «І», вихід i -го елемента «І» з'єднаний з рахунковим входом i -го двійкового лічильника, третій вихід блоку керування з'єднаний з керуючими входами двійкових лічильників, виходи i -го двійкового лічильника з'єднані з i -ю групою входів суматора та i -ю групою інформаційних виходів, виходи суматора з'єднані з $n + 1$ -ою групою інформаційних виходів, ($i = 1, \dots, n$, де n – кількість розрядів).

Заявлений пристрій має новий склад елементів, та нову організацію взаємозв'язків між ними, тобто містить нову сукупність ознак, які забезпечують нові технічні властивості винаходу – спроможність визначати характеристики двійкового коду.

На рис. 4.9 представлена функціональна схема пристрою. Аналізатор кодів має вхід запуску 1, вихід готовності результату 2, $n + 1$ групу інформаційних виходів $3_1 - 3_{n+1}$, блок пам'яті 4, блок керування 5, перший мультиплексор 6, другий мультиплексор 7, n елементів «І» $8_1 - 8_n$, n елементів «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» $9_1 - 9_n$, n двійкових лічильників $10_1 - 10_n$, суматор 11, причому вхід запуску 1 з'єднаний з входом запуску блоку керування 5, вихід готовності результату 2 з'єднаний з першим виходом блоку керування 5, перша група інформаційних виходів блоку керування 5 з'єднана з адресними входами першого мультиплектора 6, друга група інформаційних виходів блоку керування 5 з'єднана з адресними входами другого мультиплектора 7, виходи блоку пам'яті 4 з'єднані з інформаційними входами першого мультиплектора 6 та другого мультиплектора 7, i -й вихід першого мультиплектора 6 з'єднаний з першим входом i -го елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» 9_i , i -й вихід другого

мультиплексора 7 з'єднаний з другим входом i -го елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» 9_i , другий вихід блоку керування 5 з'єднаний з першими входами елементів «І» $8_1 - 8_n$, вихід i -го елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» 9_i з'єднаний з другим входом i -го елемента «І» 8_i , вихід i -го елемента «І» 8_i з'єднаний з рахунковим входом i -го двійкового лічильника 10_i , третій вихід блоку керування 5 з'єднаний з керуючими входами двійкових лічильників $10_1 - 10_n$, виходи i -го двійкового лічильника 10_i з'єднані з i -ю групою входів суматора 11 та i -ю групою інформаційних виходів 3_i , виходи суматора 11 з'єднані з $n + 1$ -ою групою інформаційних виходів 3_{n+1} , ($i = 1, \dots, n$, де n – кількість розрядів).

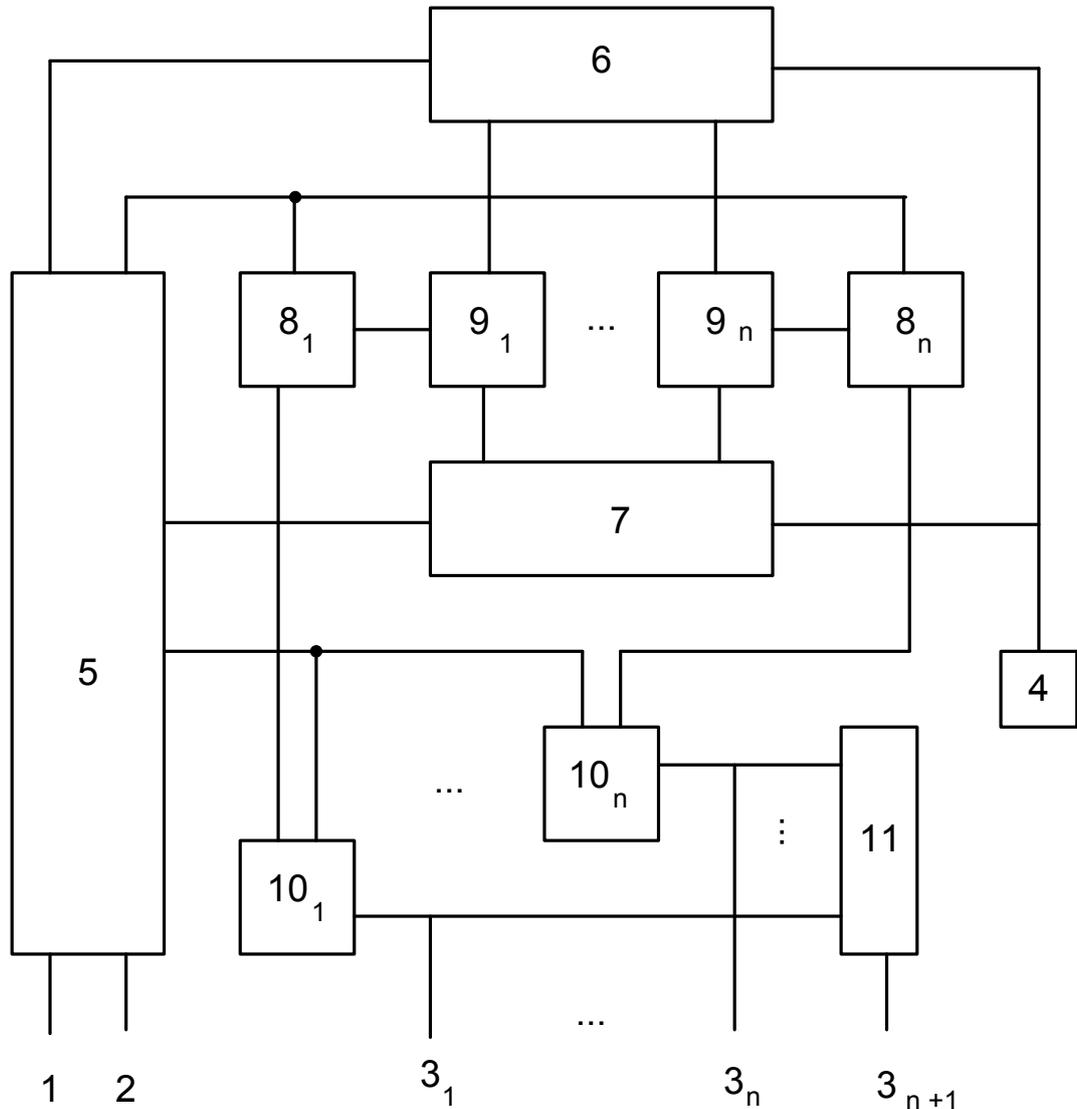


Рис. 4.9. Аналізатор кодів.

Працює пристрій наступним чином. У блоці пам'яті 4 записано k двійкових n розрядних кодових слів. На вхід запуску 1 подається сигнал, що поступає на блок керування 5 і блок керування 5 формує на першій групі інформаційних виходів адресу j -го кодового слова. Мультиплексор 6 формує на своїх виходах значення j -го кодового слова $A^j = \{a^j_1, a^j_2, \dots, a^j_n\}$.

На другій групі інформаційних виходів блок керування 5 формує адресу $j + 1$ -го кодового слова. Мультиплексор 7 формує на своїх виходах значення $j + 1$ -го кодового слова $A^{j+1} = \{a^{j+1}_1, a^{j+1}_2, \dots, a^{j+1}_n\}$.

На виході i -го елемента «НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ» 9_{*i*} формується сигнал

$$c_i = a^j_i \oplus a^{j+1}_i, \text{ де } i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k - 1. \quad (4.3)$$

Блок керування 5 на другому виході формує імпульс, який поступає на перші входи елементів «І» 8. Якщо на других входах відповідних елементів «І» сигнал «1», то цей імпульс проходить на рахунковий вхід відповідного двійкового лічильника 10, які відкриваються сигналом, що поступає з третього виходу блока керування 5.

Вказаний процес виконується для усіх пар суміжних кодових слів. Після його закінчення у двійкових лічильниках 10 записана кількість змін значень відповідних розрядів, яка поступає на відповідну групу інформаційних виходів $3_1 - 3_n$, а у суматорі 11 сформовано значення загальної кількості змін значень у коді. Це значення поступає на групу інформаційних виходів 3_{n+1} .

4.10 Висновки за розділом 4

1. Проведено порівняння характеристик кодів отриманих в результаті використання запропонованих методів з кодом Грея, що є найбільш поширеним в телекомунікаційних системах. Виявлено, що застосування запропонованих

методів для побудови кодів одиничної відстані дозволяє покращити значення збалансованості порівняно з відомими кодами. Зокрема, для коду довжиною $n = 3$ значення показника збалансованості покращується у 2,5 рази, для коду довжиною $n = 4$ – у 6 разів відносно класичного коду Грея.

2. Проведено оцінку ефективності застосування розробленого методу ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані. Виявлено, що запропонований метод дозволяє суттєво зменшити кількість варіантів кодових послідовностей, що потребують аналізу, при цьому зберігаючи основні властивості кодів одиничної відстані. Для коду довжиною $n = 3$ обсяг кодів, що розглядаються, зменшується на 97,9%; при $n = 4$, розмір множини кодових послідовностей зменшується на 99,7%. Подальше узагальнення до рівня структурних класів зменшує кількість аналізованих варіантів до 18, забезпечуючи скорочення на 99.9%. Ефективність застосування методу росте з ростом кількості розрядів коду.

3. Для автоматизації процесу аналізу й формування кодів із заданими властивостями, розроблені інструментальні засоби, що реалізують описані методи і їхні поетапні завдання.

Застосування розроблених інструментальних засобів дозволить скоротити час рішення розглянутого завдання й підвищити якість і вірогідність одержуваних результатів за рахунок виключення суб'єктивного фактору.

4. Достовірність розроблених програм та пристроїв підтверджується їх перевіркою та реєстрацією у Державній організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [163 – 170].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kliever W. H. Principles and Techniques for Direct-Reading Digital Transducers / W. H. Kliever // IRE Transactions on Industrial Electronics. – 1958. – April. – P. 357–465.
2. Danes W. G. Digital Transducers / W. G. Danes. – Dayton : Aeronautical Systems Division, 1962.
3. Cerni R. H. Instrumentation for Engineering Measurements / R. H. Cerni, L. E. Foster. – New York : John Wiley and Sons, 1964. – 66 p.
4. Military Handbook: Encoders – Shaft Angle To Digital. – United States Department of Defense, 1991. – MIL-HDBK-231A.
5. Eisher H. E. Telemetry Transducer Handbook / H. E. Eisher. – Melbourne : Radiation Incorporated, 1963. – (WADD TR 681-667, Vol. II, Rev. II).
6. Tiny Sensor-Transmitter Can Withstand Extreme Acceleration, Gives Digital Output // NASA Tech. Brief (Brief 683-105681). – 1964. – 33 p.
7. Chee Y. M. Optimal memoryless encoding for low power off-chip data buses / Y. M. Chee, C. J. Colbourn, A. C. H. Ling // Proceedings of the 2006 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, San Jose, CA, 5–9 Nov. 2006. – New York: ACM, 2006. – P. 369–374. – DOI: <https://doi.org/10.1145/1233501.1233575>.
8. Kulandai A. D. Gray counters for non-volatile memories / A. D. Kulandai, J. Rose, T. Schwarz // Memories – Materials, Devices, Circuits and Systems. – 2022. – Vol. 2. – Art. 100014. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memori.2022.100014>.
9. Roberts T. A Shaft-Position Digitizer Using Synchros / T. Roberts // Transactions of the Society of Instrument Technology. – 1963. – March. – P. 377–485.
10. Staff of Borg-Warner Controls. Vibrotron Pressure Transducer as a Depth Monitor in Oceanographic Applications. – Borg-Warner Corporation.
11. Gray code counter : pat. CN109525241 China / Y. Zhuai. – China National Intellectual Property Administration, 2022.

12. Gray code counting signal distribution system : pat. CN112087227 China / S. Sakurai, H. Ebihara. – China National Intellectual Property Administration, 2022.
13. Gray code counter circuit : pat. CN113489485 China / Z. Zhao. – China National Intellectual Property Administration, 2021.
14. Gray code counter-based low-power consumption nonvolatile memory circuit : pat. CN118173141 China / C. Liang, G. Zilong. – China National Intellectual Property Administration, 2024.
15. Gray code counter : pat. CN118316440 China / Z. Hu, K. Hyun. – China National Intellectual Property Administration, 2024.
16. Gray code simulative generator and gray code testing arrangement : pat. CN206148145 China / L. Meijun, L. Yi. – China National Intellectual Property Administration, 2017.
17. Code disc, gray code encoder and encoding method thereof : pat. CN115493628 China / Z. Yu. – China National Intellectual Property Administration, 2022.
18. Gray code signal processing method, equipment, medium and product of rod position detector : pat. CN118398259 China / W. Li, S. Wu. – China National Intellectual Property Administration, 2024.
19. Gray code to binary code converter and device comprising same : pat. CN116599536 China / H. Lee. – China National Intellectual Property Administration, 2023.
20. A kind of underground utilities positioner and method based on complementary Gray code : pat. CN107390276 China / H. Li, L. Liu. – China National Intellectual Property Administration, 2019.
21. Gray code-based wind direction sensor detection method : pat. CN113406356 China / Z. Zhou. – China National Intellectual Property Administration, 2021.
22. Binary-to-gray converting circuit and gray code counter including the same : pat. KR20130119546 Korea / K. Kim, J. Kim, H. Chae. – Korean Intellectual Property Office, 2013.

23. Absolute position displacement sensor grating absolute position encoding and decoding method : pat. CN109579711 China / A. Ying, D. Jun. – China National Intellectual Property Administration, 2020.
24. Benini L. Networks on chip: a new paradigm for systems on chip design / L. Benini, G. De Micheli // Proceedings of Design Automation and Test in Europe Conference and Exhibition. – 2002. – P. 418–419.
25. Dally W. J. Route packets, not wires: on-chip interconnection networks / W. J. Dally, B. Towles // Proceedings of Design Automation Conference. – 2001. – P. 684–689.
26. Gebali F. Networks-on-Chips: Theory and Practice / F. Gebali, H. Elmilig i, M. W. El-Kharashi. – New York : Taylor & Francis, 2011.
27. Ghoneima M. Reducing the data switching activity on serial link buses / M. Ghoneima, Y. Ismail, M. Khellah, V. De // 7th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED'06), San Jose, CA. – 2006. – P. 427–432.
28. Jafarzadeh N. Data encoding techniques for reducing energy consumption in network-on-chip / N. Jafarzadeh, M. Palesi, A. Khademzadeh, A. Afzali-Kusha // IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst. – 2014. – Vol. 22, № 3. – P. 675–685.
29. Lee K. Low-power network-on-chip for high-performance SoC design / K. Lee et al. // IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst. – 2006. – Vol. 14, № 3. – P. 148–160.
30. Kim K.-W. Coupling-driven signal encoding scheme for low-power interface design / K.-W. Kim, K.-H. Baek, N. Shanbhag, C. L. Liu, S.-M. Kang // IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design (ICCAD-2000). – 2000. – P. 318–321.
31. Ruskey F. Gray codes for set partitions and restricted growth tails / F. Ruskey, C. Savage // Australas. J. Combin. – 1994. – Vol. 10. – P. 85–96.
32. Palesi M. Data encoding schemes in networks on chip / M. Palesi, G. Ascia, F. Fazzino, V. Catania // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2011. – Vol. 30, № 5. – P. 774–786.

33. Najafi A. Misalignment-aware delay modeling of narrow on-chip interconnects considering variability / A. Najafi, L. Bamberg, A. Najafi, A. Garcia-Ortiz // 7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST). – 2018. – P. 1–4.

34. Najafi A. Misalignment-aware energy modeling of narrow buses for data encoding schemes / A. Najafi, L. Bamberg, A. Garcia-Ortiz // Integration. – 2020. – Vol. 72. – P. 58–65.

35. Nijenhuis A. Combinatorial algorithms: for computers and calculators / A. Nijenhuis, H. S. Wilf. – Elsevier, 2014. – 320 p.

36. Ruskey F. The coolest way to generate combinations / F. Ruskey, A. Williams // Discrete Mathematics. – 2009. – Vol. 309, № 17. – P. 5305–5320. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.disc.2007.11.048>.

37. Loehr N. Combinatorics / N. Loehr. – Chapman and Hall/CRC, 2017. – 642 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315153360>.

38. Cheng W.-C. Memory Bus Encoding for Low Power: A Tutorial / W.-C. Cheng, M. Pedram // Proceedings of the 2nd International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED'01). – 2001. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ISQED.2001.915227>.

39. Beletsky A. Conceptual Bases of Gray Transformations and Discrete Vilenkin–Crestenson Functions Systems / A. Beletsky // WSEAS Transactions on Computers. – 2023. – Vol. 22. – P. 44–56. – DOI: 10.37394/23205.2023.22.5.

40. Beletsky A. Generalized Gray Transforms and Synthesis Symmetric Systems of Walsh functions / A. Beletsky // Telecommunications and Radio Engineering. – Vol. 78, № 4. – P. 305–326. – DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i4.30.

41. Beletsky A. On the construction of generalized Gray code / A. Beletsky, N. Hung // Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments IV. – SPIE, 2006. – Vol. 6159. – P. 1098–1103. – DOI: 10.1117/12.674968.

42. Bouyuklieva S. Generating m-Ary Gray Codes and Related Algorithms / S. Bouyuklieva, I. Bouyukliev, V. Bakoev // Algorithms. – 2024. – Vol. 17, № 7. – P. 311–331. – DOI: <https://doi.org/10.3390/a17070311>.
43. Phillips A. T. A dynamic programming approach to generating a binary reflected gray code sequence / A. T. Phillips, M. R. Wick // Proceedings of the 38th Annual Midwest Instruction and Computing Symposium. – 2005. – 11 p.
44. Nimbe P. Innovative Approaches to Classical and Quantum Reflected Binary Code Generation using Pascal Triangle, Reversible N-Input C-Gate and Reversible N-Input Q-Gate / P. Nimbe, P. Yeng, E. Okyere, B. Weyori, A. Adekoya // Journal of Algebraic Statistics. – 2022. – Vol. 13, № 3. – P. 4708–4734.
45. Mutze T. Efficient computation of middle levels gray codes / T. Mutze, J. Nummenpalo // ACM Transactions on Algorithms. – Vol. 14(2). – P. 915–927. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-48350-3_76.
46. Zhou Y. (n, k, p)-Gray code for image systems / Y. Zhou, K. Panetta, C. Chen // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2013. – Vol. 43, № 2. – P. 515–529. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2012.2210706>.
47. Wang X. A new hybrid image encryption algorithm based on Gray code transformation and snake-like diffusion / X. Wang, Y. Su, H. Zhang, C. Zou // The Visual Computer. – 2022. – P. 1–22. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-021-02224-0>.
48. Tahiri M. New color image encryption using hybrid optimization algorithm and Krawtchouk fractional transformations / M. Tahiri, H. Karmouni, A. Bencherqui, A. Daoui // The Visual Computer. – 2023. – Vol. 39, № 12. – P. 6395–6420. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00371-022-02736-3>.
49. Arora U. A review of mathematical methods for construction of Gray codes / U. Arora // GANITA. – 2021. – Vol. 71(2). – P. 153–164.
50. Meenakshi G. Advanced level cyclic gray codes with application / G. Meenakshi, S. Gupta // International Journal of Electronics Communication and Computer Technology (IJECCCT). – 2014. – Vol. 4, № 3. – P. 619–622.

51. Jacques M. Generating Gray codes for weak orders in constant amortized time / M. Jacques, D. Wong, K. Woo // *Discrete Mathematics*. – 2020. – № 343(10). – P. 1–10. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.disc.2020.111992>.
52. Lee E. T. Algorithms for generating generalized gray codes / E. T. Lee, M. E. Lee // *Kybernetes*. – 1999. – Vol. 28, № 6/7. – P. 837–844. – DOI: <https://doi.org/10.1108/03684929910283286>.
53. Kreher D. L. Combinatorial algorithms: generation, enumeration, and search / D. L. Kreher, D. R. Stinson. – CRC Press, 1999. – 329 p.
54. Стоян Ю. Г. Описание классов комбинаторных конфигураций на основе отображений / Ю. Г. Стоян, И. В. Гребенник // *Доповіді НАН України*. – 2008. – № 10. – С. 28–31.
55. Bergeron F. Combinatorial species and tree-like structures / F. Bergeron, G. Labelle, P. Leroux. – Cambridge : University Press, 1998. – 457 p.
56. Стоян Ю. Г. Комбинаторные виды для перечисления комбинаторных конфигураций со специальными свойствами / Ю. Г. Стоян, И. В. Гребенник // *Доповіді НАН України*. – 2010. – № 7. – С. 28–32.
57. Gross J. L. Combinatorial methods with computer applications / J. L. Gross. – CRC Press, 2016. – 664 p.
58. Atiyah M. K-theory / M. Atiyah. – CRC Press, 2018. – 240 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429493546>.
59. Huffman W. C. Concise encyclopedia of coding theory / W. C. Huffman, J. L. Kim, P. Solé. – Chapman and Hall/CRC, 2021. – 998 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315147901>.
60. Ruskey F. Combinatorial Gray code / F. Ruskey // *Encyclopedia of Algorithms*. – Springer, 2016. – P. 342–347.
61. Diestel R. Graph theory / R. Diestel. – Springer, 2024. – 475 p.
62. Zhang L. Hypergraph and uncertain hypergraph representation learning theory and methods / L. Zhang, J. Guo, J. Wang, J. Wang, S. Li // *Mathematics*. – 2022. – Vol. 10, № 11. – P. 1921.

63. Bondy J. A. Graph theory / J. A. Bondy, U. S. R. Murty. – Springer Publishing Company, 2008. – 654 p.
64. Harary F. Graphical enumeration / F. Harary, E. M. Palmer. – Elsevier, 2014. – 286 p.
65. Harris J. M. Combinatorics and graph theory / J. M. Harris, J. L. Hirst, M. J. Mossinghoff. – New York : Springer, 2008. – 387 p. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-79711-3>.
66. Wang L. Development of hypergraph theory / L. Wang, E. K. Egorova, A. V. Mokryakov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2018. – Vol. 57. – P. 109–114.
67. Jungnickel D. Graphs, networks and algorithms / D. Jungnickel. – Heidelberg : Springer, 2008. – 125 p. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-72780-4>.
68. Wilmer E. L. Graphs induced by Gray codes / E. L. Wilmer, M. D. Ernst // Discrete Mathematics. – 2002. – № 257(2–3). – P. 585–598. – DOI: [https://doi.org/10.1016/s0012-365x\(02\)00516-2](https://doi.org/10.1016/s0012-365x(02)00516-2).
69. Harisha C. S. Graph Theory Approach to Number Theory Theorems / C. S. Harisha // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. – 2020. – Vol. 12, № 01. – P. 568–572. – DOI: <http://dx.doi.org/10.5373/jardcs/v12sp1/20201105>.
70. Pardo-Guerra S. Extending Undirected Graph Techniques to Directed Graphs via Category Theory / S. Pardo-Guerra, K. Vivek, M. Vikash // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 9. – P. 1357. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/math12091357>.
71. Prabha S. C. Solutions of Detour Distance Graph Equations / S. C. Prabha, M. Palanivel, S. Amutha, N. Anbazhagan // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 21. – P. 8440. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s22218440>.
72. Saoub K. Graph Theory / K. Saoub // Textbooks in Mathematics. – Chapman and Hall/CRC, 2021. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1201/9781138361416>.

73. O'Regan G. Graph Theory / G. O'Regan // Texts in Computer Science. – Cham: Springer International Publishing, 2016. – P. 141–153. – DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44561-8_9.

74. Ralucca G. Graph Theory / G. Ralucca, S. Hedetniemi, C. Larson. – Cham : Springer International Publishing, 2016. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-31940-7>.

75. Annamalai N. Linear codes from incidence matrices of unit graphs / N. Annamalai, C. Durairajan // Journal of Information and Optimization Sciences. – 2021. – Vol. 42, № 8. – P. 1943–1950. – DOI: <https://doi.org/10.1080/02522667.2021.1972617>.

76. Yareshchenko V. CODING TO REDUCE THE ENERGY OF DATA MOVEMENT / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2023. – Т. 1 (71). – С. 159-162. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.159>.

77. Islam M. N. Algorithms for generating binary reflected gray code sequence: Time efficient approaches / M. N. Islam, A. B. Foysal // Proceedings of the 2009 International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC). – 2009. – Vol. 79. – P. 79–83. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ICFCC.2009.41>.

78. Bhamra K. S. An Efficient Design of Binary to Gray Code Binary Converter using QCA / K. S. Bhamra, G. Joshi, N. Kumar // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1033(1). – DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1033/1/012014>.

79. Fields L. The structure of equivalence classes / L. Fields, T. Verhave // Journal of the Experimental Analysis of Behavior. – 1987. – Vol. 48, № 2. – P. 317–332. – DOI: <https://doi.org/10.1901/jeab.1987.48-317>.

80. Bhat A. Equivalence class partitioning and boundary value analysis – a review / A. Bhat, S. M. Quadri // Proceedings of the 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). – IEEE, 2015. – P. 1557–1562.

81. Ballester-Bolinches A. Classes of finite groups / A. Ballester-Bolinches, L. M. Ezquerro. – Springer, 2006. – Vol. 584.
82. Ireland K. A classical introduction to modern number theory / K. Ireland, M. Rosen. – Springer, 2013. – Vol. 84. – 394 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2103-4>.
83. Huffman W. C. On the classification and enumeration of self-dual codes / W. C. Huffman // Finite Fields and Their Applications. – 2005. – Vol. 11, № 3. – P. 451–490. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ffa.2005.05.012>.
84. Bouyukliev I. About the code equivalence / I. Bouyukliev // Advances in Coding Theory and Cryptology / T. Shaska, W. C. Huffman, D. Joyner, V. Ustimenko. – Hackensack : World Scientific Publishing, 2007. – 268 p. – DOI: 10.1142/6464.
85. Olver P. J. Classical invariant theory / P. J. Olver. – Cambridge : Cambridge University Press, 1999. – № 44.
86. Sills A. V. An invitation to the Rogers–Ramanujan identities / A. V. Sills. – Chapman and Hall/CRC, 2017. – 256 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315151922>.
87. Hilbert D. Theory of algebraic invariants / D. Hilbert. – Cambridge : Cambridge University Press, 1993. – 199 p.
88. Chang S. Invariant rationalization / S. Chang, Y. Zhang, M. Yu, T. Jaakkola // International Conference on Machine Learning. – PMLR, 2020. – P. 1448–1458.
89. Larocca M. Group-invariant quantum machine learning / M. Larocca, F. Sauvage, F. M. Sbahi, G. Verdon, P. J. Coles // PRX Quantum. – 2022. – Vol. 3, № 3. – P. 030341.
90. Bandeira A. S. Estimation under group actions: recovering orbits from invariants / A. S. Bandeira, B. Blum-Smith, J. Kileel, J. Niles-Weed, A. Perry, A. S. Wein // Applied and Computational Harmonic Analysis. – 2023. – Vol. 66. – P. 236–319.
91. Derksen H. Computational invariant theory / H. Derksen, G. Kemper. – Springer, 2015. – 366 p.

92. Ferroni L. Valuative invariants for large classes of matroids / L. Ferroni, B. Schröter // *Journal of the London Mathematical Society*. – 2024. – Vol. 110, № 3. – P. e12984. – DOI: <https://doi.org/10.1112/jlms.12984>.

93. Nurhabibah N. Numerical invariants of coprime graph of a generalized quaternion group / N. Nurhabibah, I. G. A. W. Wardhana, N. W. Switrayni // *Journal of the Indonesian Mathematical Society*. – 2023. – P. 36–44.

94. Landesman A. Canonical representations of surface groups / A. Landesman, D. Litt // *Annals of Mathematics*. – 2024. – Vol. 199, № 2. – P. 823–897.

95. Guo W. Structure theory for canonical classes of finite groups / W. Guo. – Springer, 2015. – 360 p.

96. Arkani-Hamed N. Stringy canonical forms / N. Arkani-Hamed, S. He, T. Lam // *Journal of High Energy Physics*. – 2021. – Vol. 2021, № 2. – P. 1–62.

97. Vladyslav, Y., Kosenko, V. LOW-POWER CODING METHOD IN DATA TRANSMISSION SYSTEMS // *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. Kharkiv, 2024. – VOL. 3 (29). – P. 121–129. – doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.121>.

98. Ярещенко В. В. Кодування для зменшення енергії руху даних / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Тринадцята міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління», 26–27 квітня 2023 р., Баку–Харків–Жиліна. – 2023. – Т. 1. – С. 49.

99. Ярещенко В. В. Метод формування та оцінки енергоефективних кодів / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2023): матеріали XVI міжнар. наук.-практ. конф., 23–24 травня 2023 р., Київ. – К. : НАУ, 2023. – С. 352–354.

100. Косенко В. В. Коди одичної відстані / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко // Проблеми інформатизації: тези доп. 11-ї міжнар. наук.-техн. конф., 16–17 листопада 2023 р., Баку–Харків–Бельсько-Бяла. – Харків : Impress, 2023. – Т. 1. – С. 67.

101. Ярещенко В. В. Кодування з низьким енергоспоживанням / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: матеріали ІХ Всеукр. наук.-практ. конф., 10 листопада 2023 р. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2023. – С. 67–68.

102. Ярещенко В. В. Граф-орієнтований алгоритм формування енергоефективних кодів / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: тези доп. XIII міжнар. наук.-практ. конф., 23–24 травня 2024 р., Чернігів. – 2024. – Т. 2. – С. 254.

103. Yareshchenko V. Equivalence of combinatorial configurations / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами», 9–13 вересня 2024 р., Коблево: зб. пр. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – С. 46–48. – DOI: <https://doi.org/10.30837/ISRMM.2024.09>.

104. Stoyan Yu. Description and generation of combinatorial sets having special characteristics / Yu. Stoyan, I. Grebennik // International Journal of Biomedical Soft Computing and Human Sciences. – 2011. – Vol. 18, № 1. – P. 85–90.

105. Shablya Y. Combinatorial Generation Algorithms for Directed Lattice Paths / Y. Shablya, A. Merinov, D. Kruchinin // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 8. – P. 1–18. – DOI: <https://doi.org/10.3390/math12081207>.

106. West D. B. Combinatorial mathematics / D. B. West. – Cambridge : Cambridge University Press, 2021. – 988 p. – DOI: 10.1017/9781107415829.

107. Barasch L. S. Generalized Gray codes and their properties / L. S. Barasch, S. Lakshmivarahan, S. K. Dhall // Mathematics for Large Scale Computing. – CRC Press, 2020. – P. 203–216.

108. Grebennik I. V. Generating combinatorial sets with given properties / I. V. Grebennik, O. S. Lytvynenko // Cybernetics and Systems Analysis. – 2012. – Vol. 48. – P. 890–898. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-012-9469-9>.

109. Merino A. On a combinatorial generation problem of Knuth / A. Merino, O. Micka, T. Mutze // Proceedings of the 32nd Annual ACM-SIAM Symposium on

Discrete Algorithms (SODA 2021). – Philadelphia : SIAM, 2021. – P. 735–743. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1137/1.9781611976465.46>.

110. Mansour T. Efficient generation of restricted growth words / T. Mansour, V. Vajnovszki // *Information Processing Letters*. – 2013. – Vol. 113(17). – P. 613–616.

111. Percus J. K. *Combinatorial methods* / J. K. Percus. – Springer, 2012. – Vol. 4.

112. Charalambides C. A. *Enumerative combinatorics* / C. A. Charalambides. – Chapman and Hall/CRC, 2018. – 632 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315273112>.

113. Strozecki Y. Enumeration complexity / Y. Strozecki // *Bulletin of EATCS*. – 2019. – Vol. 3, № 129.

114. Lucatero C. R. *Combinatorial Enumeration of Graphs* / C. R. Lucatero // *Probability, Combinatorics and Control*. – London : IntechOpen, 2019. – DOI: [intechopen.88805](https://doi.org/10.1007/9781108277457).

115. Klazar M. *Combinatorial Algebraic Counting* / M. Klazar. – 2022.

116. Cameron P. J. *Notes on counting: An introduction to enumerative combinatorics* / P. J. Cameron. – Cambridge : Cambridge University Press, 2017. – Vol. 26. – 222 p. – DOI: [10.1017/9781108277457](https://doi.org/10.1017/9781108277457).

117. Zhongmu C. An extension of Burnside theorem / C. Zhongmu // *Acta Mathematica Sinica*. – 1964. – Vol. 14. – P. 75–77.

118. Harary F. *Graph theory* / F. Harary. – Addison-Wesley, 1969. – 274 p.

119. De Bruijn N. G. *Polya's theory of counting* / N. G. De Bruijn // *Applied Combinatorial Mathematics*. – 1964. – P. 144–184.

120. De Bruijn N. G. *Asymptotic methods in analysis* / N. G. De Bruijn. – Courier Corporation, 1981. – Vol. 4.

121. Kloks T. The combinatorics of N. G. de Bruijn / T. Kloks, R. Tijdeman // *Indagationes Mathematicae*. – 2013. – Vol. 24, № 4. – P. 939–970. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indag.2012.12.001>.

122. Hungerford T. W. *Algebra* / T. W. Hungerford. – Springer, 1980. – 502 p.

123. Cameron N. T. Riordan matrices and lattice path enumeration / N. T. Cameron, A. Nkwanta // *Notices of the American Mathematical Society*. – 2023. – Vol. 70. – P. 231–242. – DOI: 10.3390/appliedmath3010012.

124. Yareshchenko V. UNIT-DISTANCE CODES ENUMERATION / V. Yareshchenko, V. Kosenko // *Advanced Information Systems*. – 2024. – Vol. 8(4). – P. 41–48. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.06>.

125. Ярещенко В. В. Каталоги кодів з одиничною відстанню / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // *Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи* : зб. наук. пр. з матеріалами III Міжнар. наук. конф., 4 жовтня 2024 р., м. Ужгород. – Вінниця : УКРЛОГОС Груп, 2024. – С. 141–146.

126. Yareshchenko V. METHOD OF GENERATING ENERGY EFFICIENT CODES / V. Yareshchenko, V. Kosenko // *Control, Navigation and Communication Systems*. Poltava: PNTU, 2025. – VOL. 1 (79). – P. 213–217. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.213-217>.

127. Alday L. F. Rademacher Expansions and the Spectrum of 2d CFT / L. F. Alday, J. B. Bae // *Journal of High Energy Physics*. – 2020. – Vol. 2020, № 11. – P. 1–30. – DOI: [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2020\)134](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2020)134).

128. Corteel S. Cylindric partitions and some new Rogers–Ramanujan identities / S. Corteel, J. Dousse, A. Uncu // *Proceedings of the American Mathematical Society*. – 2022. – Vol. 150, № 2. – P. 481–497. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.12828>.

129. Savage C. D. Euler's partition theorem and the combinatorics of ℓ -sequences / C. D. Savage, A. J. Yee // *Journal of Combinatorial Theory, Series A*. – 2008. – Vol. 115, № 6. – P. 967–996. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcta.2007.11.006>.

130. Hardy G. H. *An Introduction to the Theory of Numbers* / G. H. Hardy, E. M. Wright. – 6th ed. – Oxford : Oxford University Press, 2008. – 621 p. – ISBN 978-0-19-921986-5.

131. Alder H. L. Partition identities – from Euler to the present / H. L. Alder // *The American Mathematical Monthly*. – 1969. – Vol. 76, № 7. – P. 733–746. – DOI: <https://doi.org/10.1080/00029890.1969.12000317>.
132. Andrica D. Recurrent Sequences / D. Andrica, O. Bagdasar. – Berlin : Springer, 2020. – 402 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-51502-7>.
133. Shapiro L. The Riordan group and applications / L. Shapiro, R. Sprugnoli, P. Barry, G. S. Cheon, T. X. He, D. Merlini, W. Wang. – Cham : Springer, 2022. – 362 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94151-2>.
134. Mezo I. Combinatorics and number theory of counting sequences / I. Mezo. – Chapman and Hall/CRC, 2019. – 498 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315122656>.
135. Gupta H. Partitions – a survey / H. Gupta // *Journal of Research of the National Bureau of Standards – B: Mathematical Sciences*. – 1970. – Vol. 74. – P. 1–29.
136. Knuth D. E. The art of computer programming. Vol. 4A. Combinatorial algorithms. Part 1 / D. E. Knuth. – Upper Saddle River : Addison-Wesley, 2011.
137. Ruskey F. Binary bubble languages and coollex order / F. Ruskey, J. Sawada, A. Williams // *Journal of Combinatorial Theory, Series A*. – 2012. – Vol. 119(1). – P. 155–169. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcta.2011.07.005>.
138. Bitner J. Efficient generation of the binary reflected gray code and its applications / J. Bitner, G. Ehrlich, E. Reingold // *Communications of the ACM*. – 1976. – Vol. 19(9). – P. 517–521.
139. Mansour T. Gray codes, loopless algorithm and partitions / T. Mansour, G. Nassar // *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*. – 2008. – Vol. 7. – P. 291–310. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10852-008-9086-9>.
140. Mansour T. Loop-free Gray code algorithms for the set of compositions / T. Mansour, G. Nassar // *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*. – 2010. – Vol. 9(4). – P. 343–356. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10852-010-9131-3>.
141. Rasmussen D. Gray code enumeration of families of integer partitions / D. Rasmussen, C. D. Savage, D. B. West // *Journal of Combinatorial Theory, Series A*. –

1995. – Vol. 70, № 2. – P. 201–229. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0097-3165\(95\)90090-X](https://doi.org/10.1016/0097-3165(95)90090-X).

142. Wilf H. S. Combinatorial algorithms: an update / H. S. Wilf. – Society for Industrial and Applied Mathematics, 1989. – 47 p.

143. Andrews G. E. Almost partition identities / G. E. Andrews, C. Ballantine // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 116, № 12. – P. 5428–5436. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1820945116>.

144. Ladan M. Generalization of formulas for partition functions / M. Ladan, A. Alkali, A. Imam, Y. Tella // Science World Journal. – 2022. – Vol. 17(2). – P. 254–276.

145. Andaloussi I. Optimized Design of a Converter Decimal to BCD Encoder and a Reversible 4-bit Controlled Up/Down Synchronous Counter / I. Andaloussi, M. B. Sedra, M. Ghazi // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2021. – Vol. 12, № 8.

146. George M. Development of a 4-Digit BCD Multiplier Architecture with Similarity Investigator / M. George // i-Manager's Journal on Electronics Engineering. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 1–8.

147. Mian R. Hardware-Software Co-Design for Decimal Multiplication / R. Mian, M. Shintani, M. Inoue // Computers. – 2021. – Vol. 10, № 2. – P. 17.

148. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic : IEEE Std 754-2008. – IEEE, 2008. – 70 p. – DOI: [10.1109/IEEESTD.2008.4610935](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2008.4610935).

149. Radha N. An efficient implementation of BCD to seven segment decoder using MGDI / N. Radha, M. Maheswari // Proceedings of the 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud). – IEEE, 2018. – P. 475–479.

150. Yadav A. Design and analysis of an electro-optic effect-driven directional coupler for realization of an optical BCD to excess-3 code converter circuit / A. Yadav et al. // Applied Optics. – 2024. – Vol. 63, № 26. – P. 6887–6896.

151. Yazdanian-Amiri Z. High-speed binary coded decimal digit multipliers with multiple error detection / Z. Yazdanian-Amiri, M. Valinataj // *Integration*. – 2023. – Vol. 93. – P. 102073.
152. Glixon H. Advantage of the Cyclic Binary-Decimal Code / H. Glixon // *Control Engineering*. – 1957. – Vol. 4(3). – P. 87–91.
153. Klar R. Digitale Rechenautomaten – Eine Einführung in die Struktur von Computerhardware / R. Klar. – Berlin : Walter de Gruyter, 1989. – Vol. 2050. – P. 28.
154. O'Brien J. Cyclic Decimal Codes for Analogue to Digital Converters / J. O'Brien // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*. – 1956. – Vol. 75(2). – P. 120–122. – DOI: 10.1109/TCE.1956.6372498.
155. Paul M. Unterbrechungsfreier Schleifencode / M. Paul. – Ver. 1.02. – 1994.
156. Petherick E. A Cyclic Progressive Binary-coded-decimal System of Representing Numbers : Technical Note MS15 / E. Petherick. – Farnborough : Royal Aircraft Establishment (RAE), 1953.
157. Susskind A. Unit-Distance Codes / A. Susskind, J. Ward // *Notes on Analog-Digital Conversion Techniques*. – Cambridge, 1957. – Vol. 1. – P. 3–10.
158. Tompkins H. Unit-Distance Binary-Decimal Codes for Two-Track Commutation / H. Tompkins // *IRE Transactions on Electronic Computers*. – 1956.
159. Ярещенко В. В. Інваріантний підхід до класифікації двійкових кодів / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Зб. наук. праць з матеріалами 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 14–23 травня 2024 р.). – Полтава: НУПШ, 2024. – Т. 1. – С. 70–71. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/15765>.
160. Ярещенко В. В. Каталоги кодів з одиничною відстанню / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи: зб. наук. праць з матеріалами III Міжнар. наук. конф. (Ужгород, 4 жовтня 2024 р.). – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОСГруп», 2024. – С. 141–146.
161. Ярещенко В. В. Типові структури кодів одиничної відстані / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Наукові відкриття та фундаментальні наукові

дослідження: світовий досвід: зб. наук. праць з матеріалами V Міжнар. наук. конф. (Полтава, 8 листопада 2024 р.). – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. – С. 270–274.

162. Kosenko V. V. A system of typical representatives of binary-decimal codes with a unit distance / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko // Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society : Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference (Dnipro, November 7–8, 2024). – Dnipro : FOP Marenichenko V.V., 2024. – P. 20–22.

163. Комп'ютерна програма «Інструмент генерації кодів одиничної відстані» / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 122830. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 11.01.2024 р.

164. Комп'ютерна програма «Програма визначення еквівалентності кодів» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 129601. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 3.09.2024 р.

165. Комп'ютерна програма «System of distinct representatives» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 129600. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 3.09.2024 р.

166. Комп'ютерна програма «Програма формування кодів із заданими властивостями» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 128425. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 24.07.2024 р.

167. Патент України на корисну модель № 153728, МПК Н 03 М 7/16. Перетворювач кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 01178, опубл. 16.08.2023, бюл. № 33. – 3 с.

168. Патент України на корисну модель № 155281, МПК Н 03 М 7/16. Формувач збалансованих кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 03583, опубл. 8.02.2024, бюл. № 2. – 3 с.

169. Патент України на корисну модель № 155449, МПК Н 03 М 7/04. Генератор еквівалентних кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 04388, опубл. 28.02.2024, бюл. № 9. – 3 с.

170. Патент України на корисну модель № 155648, МПК Н 03 М 13/01. Аналізатор кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 04863, опубл. 20.03.2024, бюл. № 12. – 3 с.

ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих у дисертаційній роботі результатів і проведена експериментальна перевірка свідчать про вирішення поставленої актуальної наукової проблеми підвищення ефективності обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем.

Зокрема у дисертаційній роботі отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Проведений аналіз існуючих методів підвищення ефективності та достовірності обробки інформації в телекомунікаційних системах показує, що коди Грея широко застосовуються на практиці завдяки властивості одиначної відстані між суміжними словами. Однак перемикання зосереджені переважно в окремих розрядах коду, що призводить до локалізації перемикань в окремих лініях зв'язку та їх підвищеного енергоспоживання, зростання пікових локальних навантажень, що негативно впливає на надійність обладнання телекомунікаційних систем. Виявлено, що відомі методи кодування не враховують критерій рівномірного розподілу навантаження на окремі розряди та не мають системного підходу до вибору альтернативних варіантів. Обґрунтована доцільність розробки методів побудови кодів одиначної відстані з покращеними характеристиками збалансованості для енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем.

2. Розроблено метод побудови кодів одиначної відстані, в основі якого лежать графові моделі кодів Грея - граф гіперкуба з позначеними вершинами. Гамільтоновість гіперкуба тісно пов'язана з теорією кодів Грея і існує бієктивна відповідність між набором p -бітних циклічних кодів Грея і набором гамільтонових циклів у гіперкубі. Аналогічна властивість має місце для циклічних p -бітових кодів Грея та гамільтонових шляхів. Застосування розробленого методу дозволяє формувати всі можливі коди одиначної відстані довжини n .

3. Вперше розроблено метод ієрархічної класифікації кодів одиначної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності відносно заданої для кожного ієрархічного рівня групи перетворень та визначаються типові представники для кожного класу еквівалентності. Застосування розробленого методу дозволяє суттєво зменшити кількість варіантів кодових послідовностей, що потребують аналізу, при цьому зберігаючи основні властивості кодів одиначної відстані. Для коду довжиною $n = 3$ обсяг кодів, що розглядаються, зменшується на 97,9%; при $n = 4$, розмір множини кодових послідовностей зменшується на 99,7%. Подальше узагальнення до рівня структурних класів зменшує кількість аналізованих варіантів до 18, забезпечуючи скорочення на 99.9%. Ефективність застосування методу росте з ростом кількості розрядів коду.

4. Вперше розроблено метод конструктивного перерахування кодів одиначної відстані, заснований на визначенні інваріантів та генерації системи різних типових представників, що дозволяє формувати та аналізувати коди одиначної відстані з заданими властивостями збалансованості без повного перебору варіантів. Аналіз отриманих кодових послідовностей свідчить, що застосування запропонованих методів для формування кодів одиначної відстані дозволяє покращити показник збалансованості порівняно з відомими кодами. Зокрема, для коду довжиною $n = 3$ значення показника збалансованості покращується у 2,5 рази, для коду довжиною $n = 4$ - у 6 разів відносно класичного коду Грея.

5. Для автоматизації процесу аналізу й формування кодів із заданими властивостями, розроблені інструментальні засоби, що реалізують описані методи і їхні поетапні завдання. Достовірність розроблених програм та пристроїв підтверджується їх перевіркою та реєстрацією у Державній організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». Застосування розроблених методів та інструментальних засобів дозволить аналізувати й відбирати коди з найкращими властивостями, які у свою чергу дають можливість одержувати кращі результати з погляду пікових навантажень,

затримок, енерговитрат і інших обмежень при проектуванні енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем.

6. Проведено порівняльну характеристику властивостей кодів, у результаті якої виявлено, що сформовані множини кодів з використанням розроблених методів мають кращі показники збалансованості, ніж класичні коди Грея. При цьому значення показника збалансованості розроблених кодів покращується у 2,5–6 разів (залежно від розрядності) відносно відомих кодів. Проведено оцінку ефективності застосування методу ієрархічної класифікації кодів одиначної відстані. Отримані результати показують, що застосування методу дозволяє зменшити об'єм множини варіантів, що підлягають аналізу, на 97,9–99,9 % у порівнянні з методами повного перебору. Розроблені методи доцільно застосовувати при проектуванні енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем для вибору оптимального кодування, що забезпечує мінімізацію пікової комутаційної активності на лініях зв'язку.

Для підтвердження достовірності отриманих теоретичних результатів застосовувались методи імітаційного моделювання. Аналіз результатів експериментальних досліджень проводився з використанням методів математичної статистики, програмні продукти розроблені на основі мов програмування C/C++.

Вибір методів досліджень забезпечив достовірність отриманих результатів і висновків, що підтверджується збіжністю результатів, отриманих за допомогою розроблених програмних продуктів з теоретичними і практичними результатами, відображеними в публікаціях, і обумовлений відповідністю протиріч положенням теорії кодування.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для підвищення ефективності обробки інформації у як існуючому, так і перспективному енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем.

ДОДАТОК А

Системи типових представників для групи NP-перетворень

У таблицях ДА.1 – ДА.10 наведені системи типових представників для групи NP -перетворень.

Таблиця ДА. 1.

Система типових представників для $C = 1,5; S = (3, 4, 4, 4)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	013264ceabf75d98	7	013754ce62abfd98	13	0137fb98a26ecd54
2	013267fb9d54cea8	8	01375d98c46efba2	14	0137fb98cd546ea2
3	01326ea89bf75dc4	9	01375dc462aefb98	15	0137fba89d54ce62
4	01326eab9df754c8	10	01375dfe62ab98c4	16	0137fd54c89bae62
5	01326ef75d9ba8c4	11	013762aec45dfb98		
6	013754cd9bfe62a8	12	01376efb9d54c8a2		

Таблиця ДА. 2.

Система типових представників для $C = 3,0; S = (3, 3, 4, 5)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	013264c89baef75d	18	01326ec457fba89d	35	013762a89d54cefb
2	013264c89d57fbae	19	01326ec45d98abf7	36	013762a8c45d9bfe
3	013264c89d57feab	20	01326ef754c8ab9d	37	013762aefd54c89b
4	013264c8ab9d57fe	21	013754c89ba26efd	38	0137fb98a2645dce
5	013264c8aef75d9b	22	013754c89dfba26e	39	0137fb98a26ec45d
6	013264cd57fb98ae	23	013754c89dfe62ab	40	0137fb98cd5462ae
7	013264cea89d57fb	24	013754c8a26efb9d	41	0137fb98cea2645d
8	013267fb98aec45d	25	013754c8a26efd9b	42	0137fba2645d98ce
9	013267fb9d54c8ae	26	013754cd98a26efb	43	0137fd5462ab98ce
10	013267fea8c45d9b	27	013754cdfb98a26e	44	0137fd5462aec89b
11	01326ea89bf754cd	28	013754ce62a89dfb	45	0137fd54c89ba26e
12	01326ea89dc457fb	29	01375d98a264cefb	46	0137fe62a8c45d9b
13	01326ea8c457fb9d	30	01375d98c462abfe	47	0137fea2645dc89b

Продовження таблиці ДА. 2.

14	01326ea8c457fd9b	31	01375dc462a89bfe	48	0137fec89ba2645d
15	01326ea8c45d9bf7	32	01375dfea264c89b	49	0137fec89d5462ab
16	01326eab98c457fd	33	013762a89bfd54ce	50	0137fec8a2645d9b
17	01326eab98c45df7	34	013762a89bfec45d		

Таблиця ДА. 3.

Система типових представників для $C = 3,5; S = (2, 4, 4, 5)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	0132675d9bfea8c4	11	01375d9bfe64c8a2	21	01376ec45dfb98a2
2	01326ea8cd9bf754	12	01375dc46efb98a2	22	0137fb98aec5462
3	01326eabf75d98c4	13	01375dc89bfea264	23	0137fb9d546ec8a2
4	0137546ec89dfba2	14	01375dfb98c46ea2	24	0137fb9d54ce62a8
5	0137546efb9dc8a2	15	01375dfe64c89ba2	25	0137fba26ec45d98
6	013754c8ab9dfe62	16	01375dfeab98c462	26	0137fba26ec89d54
7	013754cdfb98ae62	17	013762a8cefb9d54	27	0137fd546ec89ba2
8	01375d98abfec462	18	013762aec89bfd54	28	0137fd54ce62ab98
9	01375d98cefb9d54	19	0137645d9bfec8a2	29	0137fe62ab9d54c8
10	01375d9bfe62a8c4	20	0137645dfb98cea2	30	0137fec8ab9d5462

Таблиця ДА. 4.

Система типових представників для $C = 4,5; S = (3, 3, 3, 6)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	013264cea89bf75d	3	013267fd54c89bae	5	01375d98c462aefb
2	013267fba89d54ce	4	013754ce62a89bfd	6	013762ab98c45dfe

Таблиця ДА. 5.

Система типових представників для $C = 5,0$; $S = (2, 3, 5, 5)$ і $S = (2, 3, 4, 6)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	0132645d98ceabf7	22	01326eab98cdf754	43	013762a89bfecd54
2	0132645d9ba8cef7	23	01326eabf754c89d	44	013762ab98cefd54
3	0132645dcea89bf7	24	01326eabf754cd98	45	013762abfec45d98
4	013264c89baefd57	25	01326eabfd98c457	46	013762aefb98c45d
5	013264c8aefb9d57	26	01326ec457fd98ab	47	013762aefb9d54c8
6	013264cd57fea89b	27	01326ec457fd9ba8	48	0137645d98cefba2
7	013264cd57feab98	28	01326ec8ab9df754	49	0137645dc89bfea2
8	013264cef75d98ab	29	01326ecd98abf754	50	01376efd54c89ba2
9	013264cef75d9ba8	30	01326ef754cd9ba8	51	0137fb9d5462a8ce
10	013264cefba89d57	31	01326efd9ba8c457	52	0137fb9d5462aec8
11	0132675d98abfec4	32	013754c89dfbae62	53	0137fb9d54c8a26e
12	0132675dfb98aec4	33	013754cd98abfe62	54	0137fb9d54c8ae62
13	0132675dfeab98c4	34	013754cdf62a89b	55	0137fbaec89d5462
14	013267fb98aec45d	35	013754cdf62ab98	56	0137fd54ce62a89b
15	013267fbaec45d98	36	01375d9bfea264c8	57	0137fe62ab98c45d
16	013267fd54cea89b	37	01375d9bfec462a8	58	0137fe62ab98cd54
17	013267fd54ceab98	38	01375dcefb98a264	59	0137fe645dc89ba2
18	013267feab9d54c8	39	01375dfb98a26ec4	60	0137feab98cd5462
19	013267fec45d9ba8	40	01375dfb98c462ae	61	0137fec45d9ba8
20	013267fec8ab9d54	41	01375dfec462ab98	62	0137fec45d9ba8
21	01326ea89bfdc457	42	01375dfec89ba264		

Таблиця ДА. 6.

Система типових представників для $C = 5,5; S = (1, 4, 4, 6)$ та $S = (1, 4, 5, 5)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	01326457fb9dc8ae	9	01326754c8aefb9d	17	01375462abfd98ce
2	01326457fb9dcea8	10	01326754c8aefd9b	18	01375462abfec89d
3	01326457fbaec89d	11	01326754cd9bfea8	19	01375462abfec9d8
4	01326457fbaecd98	12	01326754cea89dfb	20	01375462aecdfb98
5	01326457fd98ceab	13	01326754ceabfd98	21	01375462aefb98cd
6	01326457fd9baec8	14	01375462a89dcefb	22	01375462aefb9dc8
7	01326457fea8cd9b	15	01375462a8cd9bfe	23	01375462aefdc89b
8	01326457feab9dc8	16	01375462ab9dfec8		

Таблиця ДА. 7.

Система типових представників для $C = 6,5; S = (2, 3, 3, 7)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	0132645dc89baef7	4	013267fec45d98ab	7	01375dfb98a264ce
2	013264cea89bfd57	5	01326ef754cd98ab	8	01375dfec462a89b
3	013267feab98c45d	6	01326efba89dc457		

Таблиця ДА. 8.

Система типових представників для $C = 7;$ $S = (1, 3, 4, 7), S = (1, 3, 5, 6), S = (2, 2, 4, 7), S = (2, 2, 5, 6)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	01326457fb98aec9d	12	01326754cdfb98ae	23	01375462aec89dfb
2	01326457fba89dce	13	01326754cea89bfd	24	0137546ecd9fb98a2
3	01326457fd9ba8ce	14	01326754cefba89d	25	0137546efdc89ba2
4	01326457fdc89bae	15	013267fbaec89d54	26	01375d9bfea8c462
5	01326457feab98cd	16	01375462a89bfdce	27	01375d9bfec8a264

Продовження таблиці ДА. 8.

6	01326457fec8ab9d	17	01375462a89bfecd	28	01375dfb98aec462
7	01326754c89baefd	18	01375462a8cefb9d	29	01375dfb98cea264
8	01326754c89dfbae	19	01375462a8cefd9b	30	013762abfec89d54
9	01326754c89dfeab	20	01375462ab98cdfc	31	013762aefb98cd54
10	01326754c8ab9dfe	21	01375462ab98cefd	32	0137645dcefb98a2
11	01326754cd98aefb	22	01375462aec89bfd	33	0137645dfec89ba2

Таблиця ДА. 9.

Система типових представників для $C = 8,5; S = (1, 3, 3, 8), S = (2, 2, 3, 8)$

№	$T(E)$
1	01326754cd98abfe
2	013267feab98cd54

Таблиця ДА. 10.

Система типових представників для $C = 9,0; S = (1, 2, 4, 8),$

$S = (1, 2, 5, 7), S = (1, 2, 6, 6)$

№	$T(E)$	№	$T(E)$	№	$T(E)$
1	01326457fdcea89b	4	01326457fec9ba8	7	01326754cefd98ab
2	01326457fdceab98	5	01326754cdfca89b	8	01326754cefd9ba8
3	01326457fec98ab	6	01326754cdfca89b		

ДОДАТОК Б

Типові варіанти структур кодів одиничної відстані

Таблиця ДБ. 1.

Типові варіанти структур кодів одиничної відстані для $n = 5$

C	N_s	1	2	3	4	5	C	N_s	1	2	3	4	5	C	N_s	1	2	3	4	5
1,6	1	6	6	6	6	7	8,8	5	4	4	7	7	9	11,2	1	1	6	6	7	11
3,2	1	5	6	6	7	7	8,8	6	4	4	7	8	8	11,2	2	1	6	6	8	10
3,6	1	5	6	6	6	8	9,2	1	2	6	6	7	10	11,2	3	1	6	6	9	9
4,8	1	4	6	7	7	7	9,2	2	2	6	6	8	9	11,2	4	2	5	6	7	11
4,8	2	5	5	7	7	7	9,2	3	3	5	6	7	10	11,2	5	2	5	6	8	10
5,2	1	4	6	6	7	8	9,2	4	3	5	6	8	9	11,2	6	2	5	6	9	9
5,2	2	5	5	6	7	8	9,2	5	4	4	6	7	10	11,2	7	3	4	6	7	11
5,6	1	4	6	6	6	9	9,2	6	4	4	6	8	9	11,2	8	3	4	6	8	10
5,6	2	5	5	6	6	9	9,2	7	4	5	5	7	10	11,2	9	3	4	6	9	9
6,4	1	3	7	7	7	7	9,2	8	4	5	5	8	9	11,2	10	3	5	5	7	11
6,8	1	3	6	7	7	8	9,6	1	2	6	6	6	11	11,2	11	3	5	5	8	10
6,8	2	4	5	7	7	8	9,6	2	3	5	6	6	11	11,2	12	3	5	5	9	9
7,2	1	3	6	6	7	9	9,6	3	4	4	6	6	11	11,2	13	4	4	5	7	11
7,2	2	3	6	6	8	8	9,6	4	4	5	5	6	11	11,2	14	4	4	5	8	10
7,2	3	4	5	6	7	9	9,6	5	5	5	5	5	11	11,2	15	4	4	5	9	9
7,2	4	4	5	6	8	8	10,4	1	1	7	7	7	9	11,6	1	1	6	6	6	12
7,2	5	5	5	5	7	9	10,4	2	1	7	7	8	8	11,6	2	2	5	6	6	12
7,2	6	5	5	5	8	8	10,8	1	1	6	7	7	10	11,6	3	3	4	6	6	12
7,6	1	3	6	6	6	10	10,8	2	1	6	7	8	9	11,6	4	3	5	5	6	12
7,6	2	4	5	6	6	10	10,8	3	1	6	8	8	8	11,6	5	4	4	5	6	12
7,6	3	5	5	5	6	10	10,8	4	2	5	7	7	10	11,6	6	4	5	5	5	12
8,4	1	2	7	7	7	8	10,8	5	2	5	7	8	9	12,8	1	1	5	7	7	11
8,8	1	2	6	7	7	9	10,8	6	2	5	8	8	8	12,8	2	1	5	7	8	10
8,8	2	2	6	7	8	8	10,8	7	3	4	7	7	10	12,8	3	1	5	7	9	9
8,8	3	3	5	7	7	9	10,8	8	3	4	7	8	9	12,8	4	1	5	8	8	9
8,8	4	3	5	7	8	8	10,8	9	3	4	8	8	8	12,8	5	2	4	7	7	11

Продовження таблиці ДБ. 1.

C	N_s	1	2	3	4	5	C	N_s	1	2	3	4	5	C	N_s	1	2	3	4	5
12,8	6	2	4	7	8	10	13,6	2	2	4	6	6	13	15,2	10	2	3	6	8	12
12,8	7	2	4	7	9	9	13,6	3	2	5	5	6	13	15,2	11	2	3	6	9	11
12,8	8	2	4	8	8	9	13,6	4	3	3	6	6	13	15,2	12	2	3	6	10	10
12,8	9	3	3	7	7	11	13,6	5	3	4	5	6	13	15,2	13	2	4	5	7	13
12,8	10	3	3	7	8	10	13,6	6	3	5	5	5	13	15,2	14	2	4	5	8	12
12,8	11	3	3	7	9	9	13,6	7	4	4	4	6	13	15,2	15	2	4	5	9	11
12,8	12	3	3	8	8	9	13,6	8	4	4	5	5	13	15,2	16	2	4	5	10	10
13,2	1	1	5	6	7	12	14,8	1	1	4	7	7	12	15,2	17	3	3	5	7	13
13,2	2	1	5	6	8	11	14,8	2	1	4	7	8	11	15,2	18	3	3	5	8	12
13,2	3	1	5	6	9	10	14,8	3	1	4	7	9	10	15,2	19	3	3	5	9	11
13,2	4	2	4	6	7	12	14,8	4	1	4	8	8	10	15,2	20	3	3	5	10	10
13,2	5	2	4	6	8	11	14,8	5	1	4	8	9	9	15,2	21	3	4	4	7	13
13,2	6	2	4	6	9	10	14,8	6	2	3	7	7	12	15,2	22	3	4	4	8	12
13,2	7	2	5	5	7	12	14,8	7	2	3	7	8	11	15,2	23	3	4	4	9	11
13,2	8	2	5	5	8	11	14,8	8	2	3	7	9	10	15,2	24	3	4	4	10	10
13,2	9	2	5	5	9	10	14,8	9	2	3	8	8	10	15,6	1	1	4	6	6	14
13,2	10	3	3	6	7	12	14,8	10	2	3	8	9	9	15,6	2	1	5	5	6	14
13,2	12	3	3	6	9	10	15,2	1	1	4	6	7	13	15,6	3	2	3	6	6	14
13,2	13	3	4	5	7	12	15,2	2	1	4	6	8	12	15,6	4	2	4	5	6	14
13,2	14	3	4	5	8	11	15,2	3	1	4	6	9	11	15,6	5	2	5	5	5	14
13,2	15	3	4	5	9	10	15,2	4	1	4	6	10	10	15,6	6	3	3	5	6	14
13,2	16	4	4	4	7	12	15,2	5	1	5	5	7	13	15,6	7	3	4	4	6	14
13,2	17	4	4	4	8	11	15,2	6	1	5	5	8	12	15,6	8	3	4	5	5	14
13,2	18	4	4	4	9	10	15,2	7	1	5	5	9	11	15,6	9	4	4	4	5	14
13,2	12	3	3	6	9	10	15,2	8	1	5	5	10	10	16,8	1	1	3	7	7	13
13,6	1	1	5	6	6	13	15,2	9	2	3	6	7	13	16,8	2	1	3	7	8	12

Продовження таблиці ДБ. 1.

C	N_s	1	2	3	4	5	C	N_s	1	2	3	4	5	C	N_s	1	2	3	4	5
16,8	3	1	3	7	9	11	17,2	15	2	3	5	9	12	18,8	5	1	2	8	8	12
16,8	4	1	3	7	10	10	17,2	16	2	3	5	10	11	18,8	6	1	2	8	9	11
16,8	5	1	3	8	8	11	17,2	17	2	4	4	7	14	18,8	7	1	2	8	10	10
16,8	6	1	3	8	9	10	17,2	18	2	4	4	8	13	18,8	8	1	2	9	9	10
16,8	7	1	3	9	9	9	17,2	19	2	4	4	9	12	19,2	1	1	2	6	7	15
16,8	8	2	2	7	7	13	17,2	20	2	4	4	10	11	19,2	2	1	2	6	8	14
16,8	9	2	2	7	8	12	17,2	21	3	3	4	7	14	19,2	3	1	2	6	9	13
16,8	10	2	2	7	9	11	17,2	22	3	3	4	8	13	19,2	4	1	2	6	10	12
16,8	11	2	2	7	10	10	17,2	23	3	3	4	9	12	19,2	5	1	2	6	11	11
16,8	12	2	2	8	8	11	17,2	24	3	3	4	10	11	19,2	6	1	3	5	7	15
16,8	13	2	2	8	9	10	17,6	1	1	3	6	6	15	19,2	7	1	3	5	8	14
16,8	14	2	2	9	9	9	17,6	2	1	4	5	6	15	19,2	8	1	3	5	9	13
17,2	1	1	3	6	7	14	17,6	3	1	5	5	5	15	19,2	9	1	3	5	10	12
17,2	2	1	3	6	8	13	17,2	24	3	3	4	10	11	19,2	10	1	3	5	11	11
17,2	3	1	3	6	9	12	17,6	4	2	2	6	6	15	19,2	11	1	4	4	7	15
17,2	4	1	3	6	10	11	17,6	5	2	3	5	6	15	19,2	12	1	4	4	8	14
17,2	5	1	4	5	7	14	17,6	6	2	4	4	6	15	19,2	13	1	4	4	9	13
17,2	6	1	4	5	8	13	17,6	7	2	4	5	5	15	19,2	14	1	4	4	10	12
17,2	7	1	4	5	9	12	17,6	8	3	3	4	6	15	19,2	15	1	4	4	11	11
17,2	8	1	4	5	10	11	17,6	9	3	3	5	5	15	19,2	16	2	2	5	7	15
17,2	9	2	2	6	7	14	17,6	10	3	4	4	5	15	19,2	17	2	2	5	8	14
17,2	10	2	2	6	8	13	17,6	11	4	4	4	4	15	19,2	18	2	2	5	9	13
17,2	11	2	2	6	9	12	18,8	1	1	2	7	7	14	19,2	19	2	2	5	10	12
17,2	12	2	2	6	10	11	18,8	2	1	2	7	8	13	19,2	20	2	2	5	11	11
17,2	13	2	3	5	7	14	18,8	3	1	2	7	9	12	19,2	21	2	3	4	7	15
17,2	14	2	3	5	8	13	18,8	4	1	2	7	10	11	19,2	22	2	3	4	8	14

Продовження таблиці ДБ. 1.

C	N_s	1	2	3	4	5	C	N_s	1	2	3	4	5	C	N_s	1	2	3	4	5
19,2	23	2	3	4	9	13	21,2	8	1	3	4	9	14	23,2	14	2	2	3	11	13
19,2	24	2	3	4	10	12	21,2	9	1	3	4	10	13	23,2	15	2	2	3	12	12
19,2	25	2	3	4	11	11	21,2	10	1	3	4	11	12	25,2	1	1	2	3	9	16
19,2	26	3	3	3	7	15	21,2	11	2	2	4	7	16	25,2	2	1	2	3	10	15
19,2	27	3	3	3	8	14	21,2	12	2	2	4	8	15	25,2	3	1	2	3	11	14
19,2	28	3	3	3	9	13	21,2	13	2	2	4	9	14	25,2	4	1	2	3	12	13
19,2	29	3	3	3	10	12	21,2	14	2	2	4	10	13	25,2	5	2	2	2	9	16
19,2	30	3	3	3	11	11	21,2	15	2	2	4	11	12	25,2	6	2	2	2	10	15
19,6	1	1	2	6	6	16	21,2	16	2	3	3	7	16	25,2	7	2	2	2	11	14
19,6	2	1	3	5	6	16	21,2	17	2	3	3	8	15	25,2	8	2	2	2	12	13
19,6	3	1	4	4	6	16	21,2	18	2	3	3	9	14	27,2	1	1	2	2	10	16
19,6	4	1	4	5	5	16	21,2	19	2	3	3	10	13	27,2	2	1	2	2	11	15
19,6	5	2	2	5	6	16	21,2	20	2	3	3	11	12	27,2	3	1	2	2	12	14
19,6	6	2	3	4	6	16	23,2	1	1	2	4	8	16	27,2	4	1	2	2	13	13
19,6	7	2	3	5	5	16	23,2	2	1	2	4	9	15							
19,6	8	2	4	4	5	16	23,2	3	1	2	4	10	14							
19,6	9	3	3	3	6	16	23,2	4	1	2	4	11	13							
19,6	10	3	3	4	5	16	23,2	5	1	2	4	12	12							
19,6	11	3	4	4	4	16	23,2	6	1	3	3	8	16							
21,2	1	1	2	5	7	16	23,2	7	1	3	3	9	15							
21,2	2	1	2	5	8	15	23,2	8	1	3	3	10	14							
21,2	3	1	2	5	9	14	23,2	9	1	3	3	11	13							
21,2	4	1	2	5	10	13	23,2	10	1	3	3	12	12							
21,2	5	1	2	5	11	12	23,2	11	2	2	3	8	16							
21,2	6	1	3	4	7	16	23,2	12	2	2	3	9	15							
21,2	7	1	3	4	8	15	23,2	13	2	2	3	10	14							

ДОДАТОК В

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ:
 Директор Державного підприємства
 «Південний державний проектно-
 конструкторський та науково-дослідний
 інститут авіаційної промисловості»


 Роман АРТЮХ
 «_____» _____ 2025 р.

Акт впровадження
результатів наукових досліджень
Ярещенко Владислава Валерійовича
отриманих під час виконання дисертаційної роботи

Комісія Державного підприємства «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості» у складі: голова комісії Чмихун Костянтин Євгенійович – головний інженер; члени комісії: Чорний Віктор Олексійович – заступник директора з виробництва; Топольницька Олена Олександрівна – головний архітектор проєкту констатує, що в ході виконання науково-дослідної роботи за темою «Методи побудови кодів одиничної відстані для енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем» використані результати дисертаційних досліджень отриманих Ярещенком Владиславом Валерійовичем, а саме:

- метод побудови кодових перетворювачів;
- каталоги типових кодів одиничної відстані із заданими властивостями;
- комп'ютерна програма «Програма формування кодів із заданими властивостями» / В.В. Косенко, В.В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 128425;
- комп'ютерна програма «Інструмент генерації кодів одиничної відстані» / В.В. Ярещенко, В.В. Косенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 122830.

У результаті впровадження положень та результатів дисертаційної роботи Ярещенко Владислава Валерійовича отримано науково технічний ефект, пов'язаний з підвищенням ефективності інформаційно-комунікаційних систем за рахунок розширення вибору варіантів кодування під час проєктування.

Голова комісії:
 Члени комісії:


 К.С. Чмихун
 В.О. Чорний
 О.О. Топольницька

Рис. В. 1. Акт впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи в Державному підприємстві «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості»



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ПП “Софтвеа Експерт”
к.т.н. Шевченко Олександр Юрійович

« 20 » травня 2025 р.

Акт
про впровадження результатів наукових досліджень
Ярещенко Владислава Валерійовича
отриманих під час виконання дисертаційної роботи
«Методи побудови кодів одиничної відстані для
енергоєфективного обладнання телекомунікаційних систем»

Науково – технічна комісія у складі:

голова комісії:

директор - к.т.н. Шевченко Олександр Юрійович;

члени комісії:

керівник підрозділу інноваційних розробок - к.т.н. Шевченко Олена Леонідівна;

керівник підрозділу розробки ПО - Сокол Вадим Вікторович.

склала цей акт про те, що наукові положення і результати, зокрема:

- комп'ютерна програма «Програма формування кодів із заданими властивостями» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 128425, в основі якої лежить генерація варіантів кодів для заданої кількості розрядів коду та кількості слів у коді, аналіз їх характеристик та відбір тих, що відповідають заданим вимогам. Програма побудована за модульним принципом і допускає гнучку адаптацію до рішення більш широкого класу задач;

- метод побудови кодових перетворювачів, який вирішує задачу вдосконалення перетворювача кодів шляхом введення нового складу елементів та нової організації взаємозв'язків між ними, забезпечує кращу збалансованість кодів, що формуються. Заявлений метод має новий склад елементів, та нову організацію взаємозв'язків між ними, тобто містить нову

Рис. В. 2. Перший аркуш акту впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи в підприємстві ПП “Софтвеа Експерт”

сукупність ознак, які забезпечують нові технічні властивості винаходу – кращу збалансованість кодів, що формуються;

Цей принцип, кодування одиначної відстані, був застосований у науково-дослідних роботах, що виконуються на підприємстві ПП “Софтвеа Експерт” у варіаційних квантових алгоритмах.

Впровадження наведених результатів дозволило вирішити ряд задач пов’язаних з зменшенням чутливості до шуму.

Голова комісії:



Шевченко О.Ю.

Члени комісії



Шевченко О.Л.



Сокол В.В.

Рис. В. 3. Другий аркуш акту впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи в підприємстві ПП “Софтвеа Експерт”

«ЗАТВЕРДЖУЮ»:

Проректор з наукової роботи
Українського державного університету
залізничного транспорту
кандидат технічних наук, доцент



Артур КАГРАМАНЯН

2026 року

АКТ

впровадження у навчальний процес
Українського державного університету залізничного транспорту
результатів дисертаційного дослідження **Ярещенко Владислава Валерійовича**

Комісія у складі:

- голова – в.о. завідувача кафедри транспортного зв'язку, к.т.н., доц. Індик С.В.
члени – професор кафедри транспортного зв'язку, д.т.н., проф. Штомпель М.А.
– доцент кафедри транспортного зв'язку, к.т.н., доц. Жученко О.С.
– доцент кафедри транспортного зв'язку, к.т.н., доц. Єлізаренко А.О.

склала цей акт про те, що у навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту при викладанні навчальних дисциплін за освітніми програмами першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти «Телекомунікації та радіотехніка» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка: «Методи оптимізації в телекомунікаціях та радіотехніці», «Системи керування в телекомунікаціях», «Комп'ютерно-інтегровані мережеві системи», а також при виконанні бакалаврських кваліфікаційних робіт було використано наступні результати дисертаційної роботи Ярещенко В.В:

– метод ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності відносно заданої для кожного ієрархічного рівня групи перетворень та визначаються типові представники для кожного класу еквівалентності;

– метод конструктивного перерахування кодів одиничної відстані, заснований на визначенні інваріантів та генерації системи різних типових представників, що дозволяє формувати коди одиничної відстані з заданими

Рис. В. 4. Перший аркуш акту впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи в Українському державного університету залізничного транспорту

властивостями збалансованості без повного перебору варіантів, спрощуючи задачу вибору оптимального кодування;

– метод побудови кодів одиначної відстані, що базується на моделі гіперкуба та пошуку гамільтонового шляху в гіперкубі, який дозволяє формувати множини кодів одиначної відстані заданої довжини.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Яреценко В.В дозволило збільшити науковий та методичний рівень вказаних навчальних дисциплін та сприяло удосконаленню навчального процесу.

Голова комісії:

в.о. завідувача кафедри
транспортного зв'язку
к.т.н., доцент


Сергій ІНДИК

Члени комісії:

д.т.н., професор, професор кафедри
транспортного зв'язку
к.т.н., доцент, доцент кафедри
транспортного зв'язку
к.т.н., доцент, доцент кафедри
транспортного зв'язку


Микола ШТОМПЕЛЬ


Олександр ЖУЧЕНКО


Андрій ЄЛІЗАРЕНКО

Рис. В. 5. Другий аркуш акту впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи в Українському державного університету залізничного транспорту



Рис. В. 6. Перший аркуш акту впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи в Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

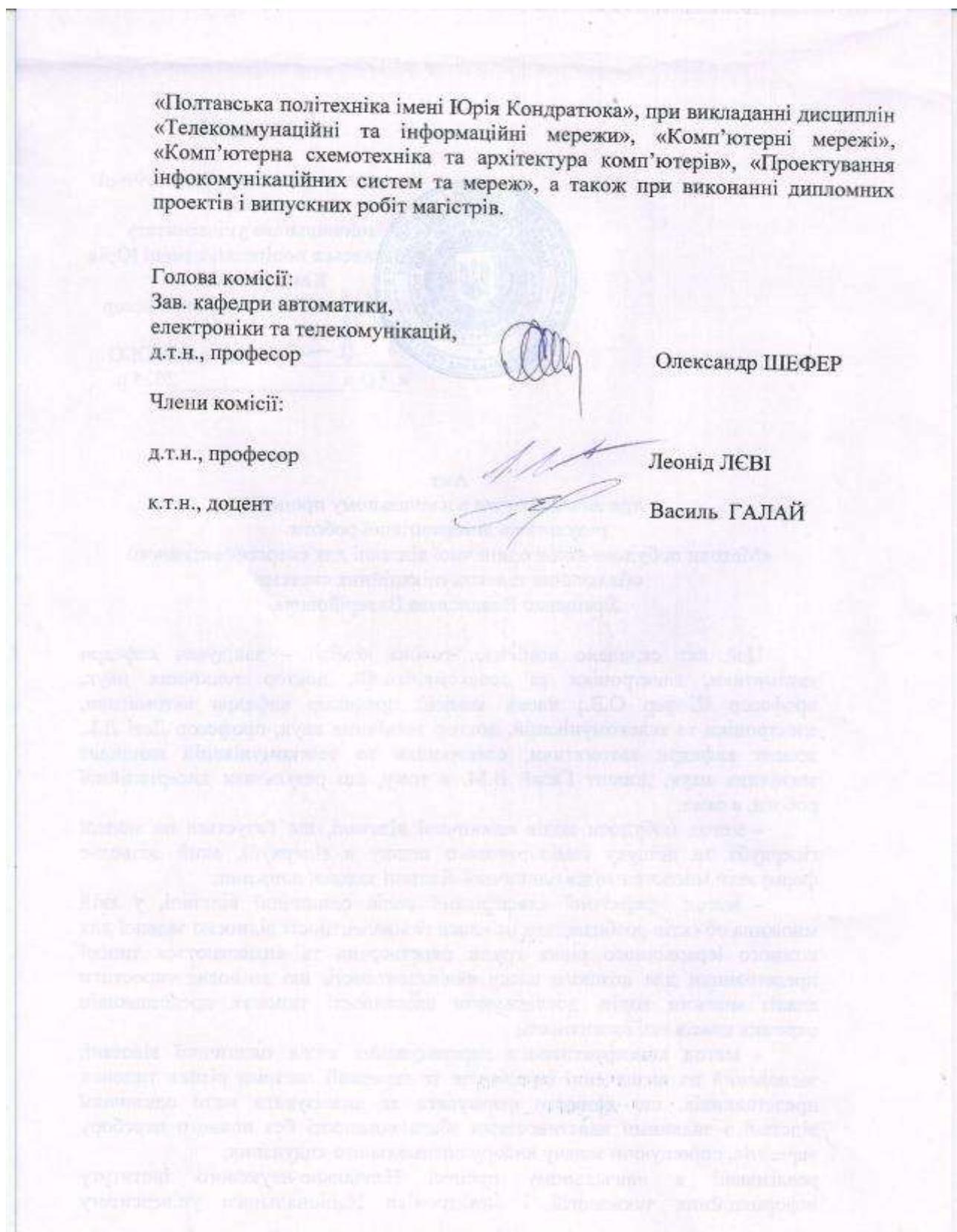


Рис. В. 7. Другий аркуш акту впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи в Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ДОДАТОК Г

Список публікацій здобувача

Публікації здобувача за темою дисертації, в яких опубліковані основні наукові результати:

5. Yareshchenko V. Coding to reduce the energy of data movement / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. праць. – Полтава : ПНТУ, 2023. – Т. 1 (71). – С. 159–162. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.159>.

6. Yareshchenko V. Unit-distance codes enumeration / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Advanced Information Systems. – 2024. – Vol. 8, No. 4. – P. 41–48. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.06>.

7. Ярещенко В. Метод кодування з низьким енергоспоживанням у системах передачі даних / В. Ярещенко, В. Косенко // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2024. – Т. 3 (29). – С. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.121>.

8. Yareschenko V. Method of generating energy efficient codes / V. Yareschenko, V. Kosenko // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2025. – Т. 1 (79). – С. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.213-217>.

Патенти України на корисну модель:

5. Патент України на корисну модель № 153728, МПК Н 03 М 7/16. Перетворювач кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 01178, опубл. 16.08.2023, бюл. № 33. – 3 с.

6. Патент України на корисну модель № 155281, МПК Н 03 М 7/16. Формувач збалансованих кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 03583, опубл. 8.02.2024, бюл. № 2. – 3 с.

7. Патент України на корисну модель № 155449, МПК Н 03 М 7/04. Генератор еквівалентних кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 04388, опубл. 28.02.2024, бюл. № 9. – 3 с.

8. Патент України на корисну модель № 155648, МПК Н 03 М 13/01. Аналізатор кодів / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. – № U 2023 04863, опубл. 20.03.2024, бюл. № 12. – 3 с.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір:

9. Комп'ютерна програма «Інструмент генерації кодів одичної відстані» / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 122830. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 11.01.2024 р.

10. Комп'ютерна програма «Програма формування кодів із заданими властивостями» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 128425. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 24.07.2024 р.

11. Комп'ютерна програма «System of distinct representatives» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 129600. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 3.09.2024 р.

12. Комп'ютерна програма «Програма визначення еквівалентності кодів» / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко. Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 129601. – Зареєстр. в Держ. орг. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» 3.09.2024 р.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

13. Ярещенко В. В. Кодування для зменшення енергії руху даних / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: зб. наук. праць з матеріалами XIII Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку – Харків – Жиліна, 26–27 квітня 2023 р.). – Харків, 2023. – Т. 1. – С. 49.

14. Ярещенко В. В. Метод формування та оцінки енергоефективних кодів / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні

комплекси (ІРТК-2023): зб. наук. праць з матеріалами XVI Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 23–24 травня 2023 р.). – Київ: НАУ, 2023. – С. 352–354.

15. Косенко В. В. Коды одиначной відстані / В. В. Косенко, В. В. Ярещенко // Проблеми інформатизації: зб. наук. праць з матеріалами XI-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку – Харків – Бельсько-Бяла, 16–17 листопада 2023 р.). – Харків: Impress, 2023. – Т. 1. – С. 67.

16. Ярещенко В. В. Кодування з низьким енергоспоживанням / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: зб. наук. праць з матеріалами IX Всеукр. наук.-практ. конф. (Полтава, 10 листопада 2023 р.). – Полтава: НУПІ, 2023. – С. 67–68. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/12046>.

17. Ярещенко В. В. Граф-орієнтований алгоритм формування енергоефективних кодів / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: зб. наук. праць з матеріалами XIII Міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 23–24 травня 2024 р.). – Чернігів, 2024. – Т. 2. – С. 254.

18. Ярещенко В. В. Інваріантний підхід до класифікації двійкових кодів / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Зб. наук. праць з матеріалами 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 14–23 травня 2024 р.). – Полтава: НУПІ, 2024. – Т. 1. – С. 70–71. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/15765>.

19. Yareshchenko V. Equivalence of combinatorial configurations / V. Yareshchenko, V. Kosenko // Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами: зб. наук. праць з матеріалами Міжнар. наук.-практ. конф. (Коблево, 9–13 вересня 2024 р.). – Харків: ХНУРЕ, 2024. – С. 46–48. DOI: <https://doi.org/10.30837/ISRRM.2024.09>.

20. Ярещенко В. В. Каталоги кодів з одиначною відстанню / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи: зб. наук. праць з матеріалами III Міжнар. наук. конф. (Ужгород, 4 жовтня 2024 р.). – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. – С. 141–146.

21. Ярещенко В. В. Типові структури кодів одиничної відстані / В. В. Ярещенко, В. В. Косенко // Наукові відкриття та фундаментальні наукові дослідження: світовий досвід: зб. наук. праць з матеріалами V Міжнар. наук. конф. (Полтава, 8 листопада 2024 р.). – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. – С. 270–274.

22. Kosenko V. V. A system of typical representatives of binary-decimal codes with a unit distance / V. V. Kosenko, V. V. Yareshchenko // Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society : Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference (Dnipro, November 7–8, 2024). – Dnipro : FOP Marenichenko V.V., 2024. – P. 20–22.

23. Yareshchenko V. V. Software tools for codes with specified properties research and development / V. V. Yareshchenko, V. V. Kosenko // Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference (Dnipro, November 14–15, 2024). – Dnipro : FOP Marenichenko V.V., 2024. – P. 50–51.

24. Yareshchenko V. Alternative Gray codes / V. Yareshchenko // Проблеми інформатизації: зб. наук. праць з матеріалами. XI-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку – Харків – Жиліна, 21–22 листопада 2024 р.). – Харків, 2024. – Т. 2. – С. 38.

ДОДАТОК Д

Відомості про апробацію результатів дисертації

1. Тринадцята міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління», Баку – Харків – Жиліна, 26–27 квітня 2023 р., дистанційна.
2. Шістнадцята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2023)», Київ, 23–24 травня 2023 р., дистанційна.
3. Одинадцята міжнародна науково-практична конференція «Проблеми інформатизації», Баку – Харків – Бельсько-Бяла, 16–17 листопада 2023 р., дистанційна.
4. X Всеукраїнська міжнародна науково-практична конференція НУПП, Полтава, 10 листопада 2023 р., очна.
5. XIII міжнародна науково-практична конференція, Чернігів, 23–24 травня 2024 р., дистанційна.
6. 76-а наукова конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів НУПП, Полтава, 14–23 травня 2024 р., очна.
7. Тридцять четверта Всеукраїнська конференція «Нові технології в машинобудуванні», Харків, 4–7 вересня 2024 р., дистанційна.
8. Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами», Коблево, 9–13 вересня 2024 р., дистанційна.
9. III Міжнародна наукова конференція «Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи», Ужгород, 4 жовтня, 2024 р., дистанційна.
10. V Міжнародна наукова конференція «Наукові відкриття та фундаментальні наукові дослідження: світовий досвід», м. Полтава, 8 листопада, 2024 р., дистанційна.
11. 2nd International Scientific and Practical Internet Conference «Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society», Dnipro, November 7–8, 2024, дистанційна.

12. 4th International Scientific and Practical Internet Conference «Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development», Dnipro, November 14–15, 2024, дистанційна.

13. Одинадцята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації», Баку – Харків – Жиліна, 21–22 листопада 2024 р., дистанційна.

ДОДАТОК Е

Копії свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір



Рис. Е. 1. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір
«Інструмент генерації кодів одиначної відстані»



Рис. Е. 2. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір
«Програма формування кодів із заданими властивостями»



Рис. Е. 3. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір
«System of distinct representatives»



Рис. Е. 4. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір
«Програма визначення еквівалентності кодів»

ДОДАТОК Ж

Копії патентів України на корисну модель



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **153728** (13) **U**
 (51) МПК
H03M 7/16 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2023 01178	(72) Винахідник(и): Косенко Віктор Васильович (UA), Яреценко Владислав Валерійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 21.03.2023	(73) Володілець (володільці): Косенко Віктор Васильович, вул. Ак. Павлова, 305, кв. 17, м. Харків-168, 61168 (UA), Яреценко Владислав Валерійович, вул. Дружби, 16, с. Велика Бузова, Миргородський р-н, Полтавська обл., 38041 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 17.08.2023	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 16.08.2023, Бюл.№ 33	

(54) ПЕРЕТВОРЮВАЧ КОДІВ**(57) Реферат:**

Перетворювач кодів містить три входи, три виходи, два елементи НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ, причому перший вхід з'єднаний з першими входами першого та другого елементів НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ, другий вхід з'єднаний з другим виходом, вихід першого елемента НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ з'єднаний з першим виходом, вихід другого елемента НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ з'єднаний з третім виходом. Додатково містить елемент АБО та елемент І, причому другий вхід з'єднаний з першим входом елемента І та першим входом елемента АБО, третій вхід з'єднаний з другим входом елемента І та другим входом елемента АБО.

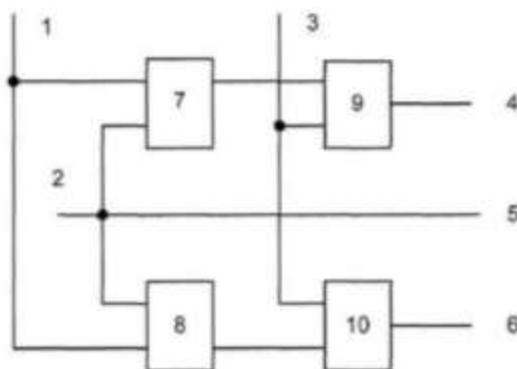


Рис. Ж. 1. Копія патенту України на корисну модель
 «Перетворювач кодів»

UA 153728 U



УКРАЇНА

(19) UA (11) 155281 (13) U
 (51) МПК
 Н03М 7/16 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2023 03583	(72) Винахідник(и): Косенко Віктор Васильович (UA), Ярещенко Владислав Валерійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 24.07.2023	(73) Володілець (володільці): Косенко Віктор Васильович, вул. Академіка Павлова, 305, кв. 18, м. Харків-168, 61168 (UA), Ярещенко Владислав Валерійович, вул. Дружби, 16, с. Велика Бузова, Миргородський р-н, Полтавська обл., 38041 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 08.02.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 07.02.2024, Бюл.№ 6	

(54) ФОРМУВАЧ ЗБАЛАНСОВАНИХ КОДІВ

(57) Реферат:

Формувач збалансованих кодів містить чотири входи, чотири виходи та додатково містить два дешифратори, три елементи НІ, два елементи І, чотири елементи АБО. Причому перший вхід з'єднаний з першими входами першого та другого дешифраторів. Другий вхід з'єднаний з другими входами першого та другого дешифраторів, з першим входом першого елемента І та через перший елемент НІ з першим входом другого елемента І. Третій вхід з'єднаний з третім входом першого дешифратора, другим входом другого елемента І та через другий елемент НІ з другим входом першого елемента І. Четвертий вхід з'єднаний з третім входом другого дешифратора, з третім входом другого елемента І та через третій елемент НІ з третім входом першого елемента І. Входи першого елемента АБО з'єднані з третім, четвертим, п'ятим та сьомим виходами першого дешифратора. Входи другого елемента АБО з'єднані з виходами елементів І, з шостим та сьомим виходами першого дешифратора, та з шостим та сьомим виходами другого дешифратора. Входи третього елемента АБО з'єднані з другим, третім, восьмим виходами першого дешифратора, та з третім та восьмим виходами другого дешифратора. Входи четвертого елемента АБО з'єднані з другим, третім, п'ятим виходами першого дешифратора та з другим та п'ятим виходами другого дешифратора. Вихід першого елемента АБО з'єднаний з першим виходом. Вихід другого елемента АБО з'єднаний з другим виходом. Вихід третього елемента АБО з'єднаний з третім виходом. Вихід четвертого елемента АБО з'єднаний з четвертим виходом.

UA 155281 U

Рис. Ж. 2. Копія патенту України на корисну модель
 «Формувач збалансованих кодів»



УКРАЇНА

(19) UA (11) 155449 (13) U
 (51) МПК
 Н03М 7/04 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2023 04388	(72) Винахідник(и): Косенко Віктор Васильович (UA), Ярещенко Владислав Валерійович (UA)
(22) Дата подання заявки:	18.09.2023	(73) Володілець (володільці): Косенко Віктор Васильович, вул. Ак. Павлова, 305, кв. 18, м. Харків-168, 61168 (UA), Ярещенко Владислав Валерійович, вул. Дружби, 16, с. Велика Бузова, Миргородський р-н, Полтавська обл., 38041 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	29.02.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію:	28.02.2024, Бюл.№ 9	

(54) ГЕНЕРАТОР ЕКВІВАЛЕНТНИХ КОДІВ**(57) Реферат:**

Генератор еквівалентних кодів містить вхід запуску, двійковий лічильник, вихідну шину, блок керування, другу вихідну шину, перший блок пам'яті, другий блок пам'яті, третій блок пам'яті, схему порівняння, регістр, перший блок перетворення, другий блок перетворення. При цьому вхід запуску з'єднаний з входом запуску блока керування, перший вихід блока керування з'єднаний з входом двійкового лічильника, другий вихід блока керування з'єднаний з керуючим входом схеми порівняння, третій вихід блока керування з'єднаний з керуючим входом першого блока пам'яті, четвертий вихід блока керування з'єднаний з керуючим входом другого блока пам'яті, п'ятий вихід блока керування з'єднаний з керуючим входом регістра, перша вихідна шина блока керування з'єднана з першою групою входів першого блока перетворення, друга вихідна шина блока керування з'єднана з першою групою входів другого блока перетворення, виходи двійкового лічильника з'єднані з входами першого блока пам'яті та першою групою входів другого блока пам'яті, виходи першого блока пам'яті з'єднані з другою групою входів першого блока перетворення, виходи першого блока перетворення з'єднані з другою групою входів другого блока перетворення, виходи другого блока перетворення з'єднані з другою групою входів другого блока пам'яті та входами регістра, виходи регістра з'єднані з першою групою входів схеми порівняння та входами третього блока пам'яті, виходи третього блока пам'яті з'єднані з першою вихідною шиною та другою групою входів схеми порівняння, вихід якої з'єднаний з керуючим входом третього блока пам'яті, виходи другого блока пам'яті з'єднані з другою вихідною шиною.

UA 155449 U

Рис. Ж. 3. Копія патенту України на корисну модель
 «Генератор еквівалентних кодів»



УКРАЇНА

(19) UA (11) 155648 (13) U
 (51) МПК
 Н03М 13/01 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2023 04863</p> <p>(22) Дата подання заявки: 16.10.2023</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 21.03.2024</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 20.03.2024, Бюл.№ 12</p>	<p>(72) Винахідник(и): Косенко Віктор Васильович (UA), Яреценко Владислав Валерійович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): Косенко Віктор Васильович, вул. Ак. Павлова, 305, кв. 18, м. Харків-168, 61168 (UA), Яреценко Владислав Валерійович, вул. Дружби, 16, с. Велика Бузова, Миргородський р-н, Полтавська обл., 38041 (UA)</p>
---	---

(54) АНАЛІЗАТОР КОДІВ

(57) Реферат:

Аналізатор кодів містить блок керування, блок пам'яті, вхід запуску, вихід готовності результату, $n+1$ групу інформаційних виходів, два мультиплексори, n елементів I , n елементів НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ, n двійкових лічильників, суматор. Вхід запуску з'єднаний з входом запуску блока керування. Вихід готовності результату з'єднаний з першим виходом блока керування. Перша група інформаційних виходів блока керування з'єднана з адресними входами першого мультиплексора. Друга група інформаційних виходів блока керування з'єднана з адресними входами другого мультиплексора. Виходи блока пам'яті з'єднані з інформаційними входами першого мультиплексора та другого мультиплексора. i -й вихід першого мультиплексора з'єднаний з першим входом i -го елемента НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ, i -й вихід другого мультиплексора з'єднаний з другим входом i -го елемента НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ. Другий вихід блока керування з'єднаний з першими входами елементів I , вихід i -го елемента НЕРІВНОЗНАЧНІСТЬ з'єднаний з другим входом i -го елемента I . Вихід i -го елемента I з'єднаний з рахунковим входом i -го двійкового лічильника. Третій вихід блока керування з'єднаний з керуючими входами двійкових лічильників. Виходи i -го двійкового лічильника з'єднані з i -тою групою входів суматора та i -тою групою інформаційних виходів. Виходи суматора з'єднані з $n+1$ -тою групою інформаційних виходів ($i=1, \dots, n$; n - кількість розрядів).

UA 155648 U

Рис. Ж. 4. Копія патенту України на корисну модель
 «Аналізатор кодів»