

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СИДОР АНДРІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 004.62:656.072

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА ПРОЦЕСОРИ РОЗПІЗНАВАННЯ БАГАТОМІРНИХ
ОБРАЗІВ У ХЕММІНГОВОМУ ПРОСТОРИ**

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

05 – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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



Сидор А.І.

Науковий керівник: **Николайчук Ярослав
Миколайович**, доктор технічних наук, професор

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

вчений секретар спеціалізованої вченої ради К 58.082.02

Яцив В.В.



Тернопіль – 2019

Зміст

Вступ.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСВІДУ РОЗРОБКИ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ У ХЕММІНГОВОМУ ПРОСТОРИ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	21
1.1 Загальні положення та класифікація методів розпізнавання образів.....	21
1.2 Аналіз метрик розпізнавання одномірних образів у Хеммінговому просторі.....	24
1.3 Математичні основи методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі.....	27
1.4 Перетворення модульної арифметики теоретико-числового базису Крестенсона	33
1.5 Дослідження структурних рішень існуючих пристроїв кореляційного опрацювання сигналів у якості компонентів спецпроцесорів розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі.....	39
1.6 Перспективи розвитку теоретичних засад методів розпізнавання образів. Постановка завдань дослідження.....	48
1.7 Висновки до першого розділу.....	52
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ОДНОМІРНИХ ТА БАГАТОМІРНИХ ОБРАЗІВ У ХЕММІНГОВОМУ ПРОСТОРИ	53
2.1 Теоретичні засади оцінки Хеммінгової віддалі на основі лінійної та квадратичної Евклідової відстані та аналітики різних взаємкореляційних функцій.....	53
2.2 Методу опрацювання сигналів двовимірного Хеммінгового простору основі перетворень модульної арифметики теоретико-числового базису Крестенсона.....	58
2.3. Метод визначення Хеммінгової віддалі між характеристиками образів представлено кодами унітарного ТЧБ.....	61
2.4 Метод визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами.....	65

2.5	Метод визначення Хеммінгової віддалі образів з різною кількістю параметрів.....	67
2.6	Висновки до другого розділу.....	70
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ КОДУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ХЕММІНГОВОЇ ВІДДАЛІ ДЛЯ СИСТЕМ СИМВОЛІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ.....		
3.1.	Метод оцінки Хеммінгової віддалі між образами на основі оцінки характеристик структурної складності та інформативності.....	71
3.2	Метод оцінки розширеної Хеммінгової віддалі для просторових об'єктів.....	76
3.3	Аналіз кодування та визначення Хеммінгової віддалі для реалізації розпізнавання дорожніх знаків.....	81
3.3.1	Категорії попереджувальних знаків та знаків пріоритету.....	84
3.3.2	Категорія заборонних та наказових знаків.....	100
3.3.3	Категорія знаків сервісу.....	115
3.4	Алгоритми та функціональні схеми спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі, між сигналами та цифровими даними.....	121
3.5	Висновки до третього розділу.....	129
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА МІКРОЕЛЕКТРОННА РЕАЛІЗАЦІЯ УДОСКОНАЛЕНИХ СПЕЦПРОЦЕСОРІВ ОЦІНКИ ХЕММІНГОВОЇ ВІДДАЛІ МІЖ ОЦИФРОВАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБРАЗІВ.....		
4.1.	Пристрій додавання багаторозрядних двійкових чисел.....	130
4.2.	Пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами.....	139
4.3.	Швидкодіючий спецпроцесор визначення Хеммінгової віддалі між оцифрованими сигналами у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона.....	145
4.4.	Різницево-модульний квадратор.....	154
4.5.	Реалізація компонентів та утилітів мікропроцесорних структур розроблених спецпроцесорів на ПЛІС.....	161
4.6	Висновки до четвертого розділу.....	170
	Основні результати та висновки.....	171
	Література.....	174
	Додатки.....	189

АНОТАЦІЯ

Сидор А.І. Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти» – Тернопільський національний економічний університет, Міністерство освіти і науки України, Тернопіль, 2019.

Підготовка здійснювалась на кафедрі спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету Міністерства освіти і науки України.

Спеціалізована вчена рада К 58.082.02 при Тернопільському національному економічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Дисертація присвячена розробці методів та процесорів розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі.

У дисертаційній роботі виконано аналіз досвіду розробки методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі. Розроблена класифікація методів розпізнавання образів та аналіз метрик розпізнавання одномірних образів у Хеммінговому просторі. Викладені математичні основи та перспективи розвитку теоретичних засад методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі. Дослідженні структурні рішення існуючих пристроїв кореляційного опрацювання сигналів у якості компонентів спецпроцесорів розпізнавання багатомірних образів.

Розроблений метод та теоретичні засади оцінки Хеммінгової віддалі на основі лінійної та квадратичної Евклідової відстані та аналітики різних взаємкореляційних функцій. Розроблено метод опрацювання сигналів двовимірного Хеммінгового простору на основі перетворень модульної арифметики теоретико-числового базису Крестенсона. Розроблено метод визначення Хеммінгової віддалі між характеристиками образів представленого кодами унітарного ТЧБ. Розроблено метод визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами, в якому здійснюється конвеєрне перетворення сигналів у паралельні унітарні коди, коди Хаара, коди Радемахера та накопичення модульних різниць у багаторозрядному двійковому суматорі базису Радемахера. Удосконалено метод визначення Хеммінгової віддалі образів з різною кількістю

параметрів. Розроблені методи кодування та визначення Хеммінгової віддалі для систем символічних зображень: оцінки Хеммінгової віддалі між образами на основі оцінки характеристик структурної складності та інформативності та оцінки розширеної Хеммінгової віддалі для просторових об'єктів, які базуються на аналізі структурної складності компонентів зображень. Здійснений аналіз кодування та визначення Хеммінгової віддалі для реалізації розпізнавання дорожніх знаків різних категорій. Розроблені алгоритми та функціональні схеми спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі, між сигналами та цифровими даними.

Розроблені структури та алгоритми роботи удосконалених спецпроцесорів оцінки Хеммінгової віддалі між сигналами та оцифрованими характеристиками образів. Розроблена структура та здійснена мікроелектронна реалізація на ПЛІС пристрою додавання багаторозрядних двійкових чисел, який визначає усереднене значення модульних різниць між оцифрованими сигналами. Реалізована на ПЛІС структура пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами та досліджені характеристики його апаратної та часової складності. Розроблений швидкодіючий спецпроцесор визначення Хеммінгової віддалі між оцифрованими сигналами у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона, який у порівнянні з відомими пристроями характеризується підвищеною на 2-3 порядки швидкодією. Розроблений та здійснена схемотехнічна реалізація різницево-модульного квадратора у якості компонента пристрою визначення Хеммінгової віддалі між сигналами.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в інформаційно-діагностувальній системі моніторингу стану ізоляції високовольтних кабелів у мережах 6-35 кВ "Альтра" у підприємстві ВАТ ЕК «Дніпрообленерго», в Управлінні патрульної поліції в Тернопільській області, в госпдоговірних науково-дослідних темах та навчальних процесі кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету, та навчальному процесі на кафедрі обчислювальної техніки Національного університету водного господарств та природокористування м. Рівне.

Ключові слова: Розпізнавання образів, Хеммінговий простір, спецпроцесори.

ABSTRACT

Sydor A.I. Methods and Processors for Recognizing Multidimensional Images in the Hemming Space. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for candidate of technical sciences degree (philosophy doctor) in specialty 05.13.05 "Computer systems and components" - Ternopil National University of Economics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil, 2019. Preparation was carried out at the Department of specialized computer systems of the Ternopil National Economic University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. Specialized Academic Council K 58.082.02 at the Ternopil National Economic University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation is devoted to the methods and processors development for the recognition of multidimensional images in the Hemming space.

In dissertation work the analysis of experience of working out of the methods for images recognition in the Hemming space is made. The classification of image recognition methods and analysis of recognition metrics for one-dimensional images in the Hemming space have been developed. The mathematical bases and prospects of development of theoretical foundations of image recognition methods in the Hemming space are described.

The method and theoretical foundations of Hemming distance estimation on the basis of linear and quadratic Euclidean distances and analytics of various interrelation functions are developed. The method of processing signals of a two-dimensional Hemming space on the basis of transformations of modular arithmetic of the theoretical-numerical basis of Krestenson is developed. The method of determining the Hemming distance between the images characteristics is developed by codes of unitary TBB. The method for determining the Hemming distance between analog signals, in which the conveyor transformation of signals into parallel unitary codes, the Haar codes, the Rademacher codes, and the accumulation of modulus differences in a multi-bit binary summator of the Rademacher basis are carried out, is developed. The method of determining the Hemming distance of images with different number of parameters is improved.

The methods of coding and determining the Hemming distance for symbolic image systems are developed: estimation of the Heming distance between the images based on the evaluation of the structural complexity and informativeness characteristics and the estimation of the extended Hemming distance for spatial objects, which are based on the analysis of the structural complexity of the components of images. The analysis of coding and definition of Hemming distance for implementation of recognition of road signs in different categories is carried out. The algorithms and functional schemes of special processors for determination of Heming distance, between signals and digital data are developed. The developed structures and algorithms of work of advanced special processors of estimation of Hemming distance between signals and digitized characteristics of images are developed. The structure and implemented microelectronic implementation on the FPGA of the device of adding multi-bit binary numbers, which determines the average value of modular differences between digitized signals. The structure of the device for determining the Heming distance between two signals is realized on the FPGA and the characteristics of its hardware and time complexity are investigated. A high-speed special processor was developed to determine the Heming distance between the digitized signals in the theoretical-numerical basis of Haar-Krestenson, which, in comparison with known devices, is characterized by an increase of 2-3 orders magnitude. A technical implementation of the difference-modulus quadrant as a component of the device for determining the Heming distance between the signals is developed and implemented. The results of the dissertation research are implemented in the information-diagnostic system for monitoring the state of isolation of high-voltage cables in the networks of 6-35 kV "Altra" in the enterprise of OJSC "EC" Dniprooblenergo ", in the Office of Patrol Police in the Ternopil region, in the scientific and research projects and educational processes of the department of specialized computer systems of the Ternopil National Economic University, and the educational process at the Department of Computer Science at the National University of Waterlord leaf and Nature meters. Exactly.

Keywords: Pattern Recognition, Hemming Space, Special Processors

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. **Сидор А.І.** Метод розпізнавання дорожніх знаків на основі оцінок Хеммінгової віддалі та структурної складності // *Науковий вісник НЛТЕУ України*. – 2018. – №7. – С.120-125.
2. **Сидор А.І.**, Люра О.П., Николайчук Я.М. Теоретичні засади та задачі розпізнавання гармонічних сигналів та образів на основі оцінки Хеммінгової віддалі // *Науковий вісник НЛТЕУ України*. – 2018. – №3. – С.131-136.
3. Круліковський Б.Б., **Сидор А.І.** Методи визначення Хеммінгової віддалі у кодах мультибазисних теоретико-числових перетворень // *Науковий вісник Хмельницького національного університету (технічні науки)*. – 2017 –№2 (247). – С. 181-185.
4. Возна Н.Я., **Сидор А.І.** Критерій структурної складності та оцінки розширеної Хеммінгової віддалі для просторових об'єктів // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2017 – №4. – С. 159-165.
5. Трембач Б.Р., Трембач Р.Б, **Сидор А.І.**, Возна Г.В. Структура та системні характеристики спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі реалізовані в різних теоретико-числових базисах // *Збірник наукових праць Математичне та комп'ютерне моделювання (технічні науки). Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка*. – 2017 – Випуск 15. – С. 244-249.
6. Круліковський Б.Б., **Сидор А.І.**, Заставний О.М., Николайчук Я.М. Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2016. – Вип. 26.3. - С. 361-367.
7. N. Vozna, Y. Nykolaichuk, O. Volynskyi, P. Humennyi, **A. Sydor**. Methods of Crypto Protection of Color Image Pixels in Different Code Systems // *CEUR Workshop Proceedings, ISSN 1613-0073. Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2018, Ceske Budejovice, Czech Republic, 2018*. – P.110-113. <http://ceur-ws.org/Vol-2300/Paper27.pdf> (включено до наукометричної бази Scopus).
8. Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці / Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі. С. 629-666. Николайчук Я.М., **Сидор А.І.**: *Монографія за загальною редакцією Я.М. Николайчука*. – Тернопіль: «Бескиди», 2017. – 919 с.

9. **Сидор А.І.**, Круліковський Б.Б., Возна Н.Я., Николайчук Я.М. Пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами. Патент України на корисну модель №127093, Бюл. №13, 2018.

10. **Сидор А.І.**, Возна Н.Я., Николайчук Я.М. Різницево-модульний квадратор. Патент України на корисну модель №132145, Бюл. №3, 2019.

11. Krulikovskiy B., **Sydor A.**, Zastavnyy, O., Nykolaichuk Y. Methods for multidimensional patterns recognition in Hamming space // *International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) Polyana, Lviv*, 2017. – P. 195-198. (включено до наукометричної бази Scopus).

12. Trembach B., **Sydor A.**, Trembach R., Kochan R. The Method of Applying Acoustic Signals in Vector and Two-Dimensional Hemming Spaces Given in Cartesian and in Polar Coordinates // *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24*, 2018. – P. 108-111. (включено до наукометричної бази Scopus).

13. **Сидор А.І.**, Возна Г.В. Методи кодування даних у Хеммінговому просторі та задачі розпізнавання образів // *Проблемно –наукова міжгалузева конференція "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства ЮПІС-2016"*, 25-27 квітня 2016 р., Надвірна-Яремче, Україна, 2016. – С.130-134.

14. **Сидор А.І.**, Николайчук Я.М., Возна Г.В. Задача та процесор розпізнавання образів у Хеммінговому просторі // *VIII-а міжнародна школа-семінар "Теорія прийняття рішень" Ужгород*, 2016. – С. 243-244.

15. **Сидор А.І.**, Возна Г.В. Засоби цифрового опрацювання сигналів в задачах розпізнавання образів та спецпроцесор визначення Хеммінгової віддалі // *Матеріали конференції "Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електроніка"*, Рівне, 2016. – С. 165-168.

16. **Сидор А.І.**, Трембач Б.Р, Возна Г.В. Методи ідентифікації джерел акустичних сигналів у двохвимірному Хеммінговому просторі // *Всеукраїнська конференція з міжнародною участю "Сучасні комп'ютерні інформаційні технології"(АСІТ) Тернопіль*, 2017. – С. 86-89.

17. **Сидор А.І.** Метод розпізнавання дорожніх знаків категорії “попереджувальні знаки” на основі оцінок Хеммінгової віддалі та структурної складності // *Проблемно-наукова міжгалузєва конференція «Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства» (ЮПИС 2018) 23-25 травня 2018 року, м. Надвірна.* – С. 140-146.

ВСТУП

Дисертаційна робота присвячена розробці методів та процесорів розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі.

Актуальність теми. Розвиток теорії та оптимізація рішення задач розпізнавання образів в реальному масштабі часу є актуальною науковою задачею. Об'єктами досліджень при цьому є одновимірні та багатовимірні параметри технологічних процесів, мовні сигнали, двовимірні зображення, тривимірні об'єкти цифрової голографії, томографії, радіолокації та ін.

Одним з перспективних напрямків теоретичних досліджень та реалізації алгоритмів розпізнавання образів є побудова асоціативних та кореляційних спецпроцесорів опрацювання сигналів у Хеммінговому просторі.

Цьому сприяють дослідження структурних складностей та значень Хеммінгової віддалі багатомірних об'єктів, особливостей їх функціонування, отримання, перетворення та зберігання інформації, що обумовлює необхідність побудови та використання відповідних моделей даних. Комп'ютерне моделювання таких процесів, а також побудова спеціалізованих процесорів розширює можливості успішного вирішення широкого класу задач опрацювання та розпізнавання образів.

Впровадження таких спецпроцесорів передбачає досягнення більшої швидкодії опрацювання структуризованих та інтегрованих даних, ідентифікацію їх характеристик та розпізнавання певного класу станів промислових об'єктів управління.

Фундаментальні дослідження по вирішенню даного класу задач провели відомі вчені: Р. Хеммінг американський математик [1], його роботи мали великий вплив на розвиток інформатики та телекомунікацій. До його наукових здобутків належить розробка коду Хеммінга (в якому використані матриці Хеммінга), числа Хеммінга і відстань Хеммінга [1], Л. Ванга Дж. Мендель розробили нечітку нейронну мережу Ванга-Менделля [2], Л.А. Заде американський математик і логік азербайджанського походження, засновник теорії нечітких множин і нечіткої логіки [3], професор Каліфорнійського університету Берклі, Ердал Арікан (американсько-турецький науковець професор кафедри електротехніки та електроніки Білкентського університету) винайшов полярні коди, систему

кодування, яка забезпечує математичну основу для вирішення проблеми пропускну здатності каналу Шеннона [4], Роберт Кальдербанк (Угорщина) (співробітник лабораторії Белла США) відкрив кодування просторово-часового коду для систем переривання інформації [5, 6, 7], Майкл Лабі (США) очолював команду, яка винайшла коди Торнадо та LT-коди, які використовувались у системах опрацювання та передавання інформації [8], Тобі Бергер (США) американський теоретик відомий своїми науковими здобутками в галузі розпізнавання образів: теорії інформації, випадкових полях, мережах зв'язку, стиснення даних, перевірці підпису, узгодженій обробці сигналів та квантовій теорії інформації які застосовуються у системах розпізнавання образів [9], Аміт Кумар Гупта та Яш Пал Сінгх – індійські науковці, що досліджували застосування оцінки Хеммінгової віддалі у нейронних мережах розпізнавання образів [10]. Важливий внесок у вирішення задач розробки високопродуктивних спецпроцесорів розпізнавання образів і опрацювання інформаційних потоків здійснено науковцями: О.В. Палагіном [11, 12, 13], А.О. Мельником [14], В.П. Тарасенком, Я.М. Николайчуком [15, 16, 17], Г.Ф. Кривулею [18, 19], Р.Б. Дунцем [20, 21], А.В. Дроздом, В.А. Головком.

Теорія розпізнавання образів є важливим інструментом інформаційної технології опрацювання сигналів та ідентифікації станів складних об'єктів управління. Серед різних підходів побудови алгоритмів розпізнавання образів широке застосування отримали методи розпізнавання одномірних образів у Хеммінговому просторі (ХП). Перспективним напрямком розвитку теорії та вдосконалення методів розпізнавання образів у ХП є кодування багатомірних об'єктів у його вузлах та розширення теоретичних засад шляхом вдосконалення методів кодування багатомірних даних на основі різних теоретико-числових базисів.

Задачі розпізнавання образів стосуються обробки інформації в просторі, оскільки об'єкти водних ресурсів розподіленні на певній території і потребують сумісного опрацювання даних інших об'єктів, які можуть забруднювати водні середовища на інших об'єктах.

У сучасних моніторингових системах розподілених об'єктів управління до яких належить, наприклад, моніторинг водних ресурсів певного географічного регіону, постає задача діагностування моніторингових даних у неабстрактних вузлах ХП. Поняття неабстрактного ХП при моніторинговому скануванні географічної території полягає в тому, що віддалі між вузлами не є однаковими і не відображаються у вигляді квадратів. Таким чином даний ХП математично трансформується в абстрактний ХП, який представляється у вигляді двомірної решітчастої функції без ідентифікації різних віддалей між вузлами, що спрощує математику задач розпізнавання образів у ХП згідно класичної теорії матриць.

Актуальною науковою задачею є створення високопродуктивних багаторозрядних спецпроцесорів, що визначають Хеммінгову віддаль між двома сигналами $x(t)$ та $y(t)$ або їх цифровими кодами у різних теоретико-числових базисах (ТЧБ). При побудові компонентів таких процесорів однією з найважливіших задач оптимізації їх системних характеристик є досягнення максимальної швидкодії. Важливим компонентом при цьому є багаторозрядний суматор двійкової системи числення. Він є базовим елементом в акумуляторах, арифметико-логічних пристроях та пристроях модульної арифметики: квадраторах, векторно-матричних перемножувачах та пристроях модульного експоненціювання процесорів шифрування даних [22].

В той же час існуючі методи формалізації ХП практично не дозволяють розв'язувати задачі розпізнавання багатомірних образів. Розв'язання такої задачі обмежене швидкістю процесорних засобів, що зазвичай, використовують двійкову систему числення теоретико-числового базису Радемахера.

Незважаючи на широкий спектр спеціалізованих процесорів для опрацювання сигналів та цифрових даних, які випускаються фірмами Altera, Analog Devices, Cirrus Logic, Fujitsu, MagnaChip (Hynix), Intel, Motorola, National Semiconductor, MAXIM, Xilinx, Philips, ST Microelectronics, Hewlett-Packard, Texas Instruments [23-27], вони характеризуються надлишковою універсальністю, що не дозволяє максимально спростити їх структуру та підвищити швидкістю в умовах цільової проблемної орієнтації для конкретного вузького класу задач. До класу

таких спеціалізованих процесорів відносяться програмно-апаратні засоби кореляційного, спектрального аналізу та розпізнавання образів.

Науковою школою проф. Я.М. Николайчука [17] розроблені теоретичні основи проектування та вдосконалення спецпроцесорів, що використовуються при розпізнаванні образів в різних теоретико-числових базисах: Хаара, Крестенсона, Радемахера, Галуа, та інші.

Фундаментальний вклад в розвиток теорії розпізнавання образів покладений Хеммінгом та вченими-розробниками теорії, методології та техніки кореляційного опрацювання сигналів [1].

Основні аспекти розпізнавання образів, що застосовуються для створення засобів розпізнавання і опрацювання цифрових сигналів досліджено науковцями: А.Й. Наконечним [28-30], В.П. Бабаком [31], Р. Блейхутою [32], Л.В. Вариченком, В.К. Задіракою [33-35], А.І. Солониною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлені в дисертаційній роботі дослідження виконані згідно плану наукових досліджень на факультеті Комп'ютерних інформаційних технологій кафедрою спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету за темами:

- кафедри СКС «Розробка теоретичних засад методів формування та цифрового опрацювання даних у розподілених спеціалізованих комп'ютерних системах», державний реєстраційний номер – 0112U008458 (термін виконання: 01.2013 – 12.2018);

- НДР «Розробка теорії, методології та алгоритмів структуризації образно-кластерних моделей моніторингу станів електричних підстанцій високовольтних ЛЕП», державний реєстраційний номер – 0116U006792 (термін виконання: 2017);

- НДР «Авторський нагляд за розробкою схемних рішень та випробувань дослідних взірців пристрою релейного захисту в мережах 6-10 КВ», державний реєстраційний номер – 0117U000141 (термін виконання: 2017).

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає у вдосконаленні методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі та розробці високопродуктивних спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі у різних теоретико-числових базисах. Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити принципи, теоретичні основи та методи розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі та провести аналіз досвіду розробки спецпроцесорів для розпізнавання образів у Хеммінговому просторі.

2. Розробити метод опрацювання сигналів двовимірного Хеммінгового простору, у вузлах якого існують багатомірні об'єкти на основі кодування решітчастих даних у теоретико-числовому базисі Крестенсона.

3. Розробити метод визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами, шляхом конвеєрного формування цифрових даних сигналів у паралельних унітарних кодах та інвертованих паралельних кодах Хаара.

4. Розробити систему кодування визначення оцінок Хеммінгової віддалі для дорожніх знаків.

5. Удосконалити метод визначення Хеммінгової віддалі образів з різною кількістю інформаційних параметрів.

6. Розвинути метод оцінки Хеммінгової віддалі в одновимірному та двовимірному просторі на основі лінійної та квадратичної Евклідової відстані та аналітики різних взаємкореляційних функцій.

7. Розробити принципові схемотехнічні рішення різницево-модульного квадратора у якості швидкодіючого компонента пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона.

8. Розробити структурні, схемотехнічні рішення, дослідити системні характеристики та реалізувати у мікроелектронному виконанні на ПЛІС пристрій визначення Хеммінгової віддалі між характеристиками образів, заданих кодами теоретико-числового базису Радемахера, та пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами на основі паралельних унітарних кодів.

Об'єкт дослідження – процеси розпізнавання багатомірних образів на основі методів та спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі

Предмет дослідження – методи та засоби опрацювання оцифрованих сигналів високопродуктивними спецпроцесорами розпізнавання образів, що реалізують оцінки Евклідової віддалі у Хеммінговому просторі.

Методи дослідження. Базуються на використанні теорії інформації для формування кодових портретів розпізнавання образів, теорії чисел для формування оцінок Хеммінгової віддалі між образами та представлення їх інформаційних ознак у системах числення різних теоретико-числових базисів, теорії синтезу та аналізу компонентів та процесорів обчислювальних засобів, комп'ютерної логіки та теорії цифрового опрацювання даних. Розробка технічних засобів здійснюється з використанням методів схемо- системотехніки, мікроелектронного та імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше розроблено:

1. Метод опрацювання сигналів двовимірного Хеммінгового простору, у вузлах якого існують багатомірні об'єкти на основі кодування решітчастих даних у теоретико-числовому базисі Крестенсона, шляхом кодування багатомірних образів у системі залишкових класів, який забезпечує перетворення представлень багатомірних образів в одномірній системі координат, що, на відміну від відомих методів, створює можливість параметричного опрацювання даних, представлених в багатомірному просторі в кодах одновимірного Хеммінгового простору, що значно підвищує швидкодію обчислень, спрощує методи та процесори розпізнавання багатомірних образів.

2. Метод визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами, шляхом конвеєрного формування цифрових даних сигналів у паралельних унітарних кодах та інвертованих паралельних кодах Хаара, що, у порівнянні з відомими методами, дозволяє зменшити складність обчислень у базисі Радемахера різницево-модульних кодів, а також забезпечує підвищення швидкодії визначення Хеммінгової віддалі.

3. Система кодування та визначення оцінки Хеммінгової віддалі для дорожніх знаків, шляхом експертних оцінок інформативних характеристик ознак дорожніх знаків у вигляді бінарних кодів різної розрядності, на основі яких

отримані функціональні характеристики оцінок Хеммінгової віддалі стандартної системи дорожніх знаків, що дозволяє, у порівнянні з відомими методами, автоматизувати процес розпізнавання розширеної системи категорій дорожніх знаків при руху транспортних засобів.

Удосконалено: Метод визначення Хеммінгової віддалі образів з різною кількістю інформаційних параметрів, шляхом запропонованої аналітичної оцінки математичного визначення Хеммінгової віддалі, що, на відміну від відомих методів, дозволяє розширити можливості розпізнавання образів з різною кількістю характеристичних даних.

Отримав подальший розвиток: Метод оцінки Хеммінгової віддалі в одновимірному та двовимірному просторі на основі лінійної та квадратичної Евклідової відстані згідно аналітики різних взаємкореляційних функцій, що, у порівнянні з відомими методами, дозволяє здійснити розпізнавання образів з меншою обчислювальною складністю.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Розроблена та реалізована система кодування дорожніх знаків на основі оцінок Хеммінгової віддалі, яка, у порівнянні з існуючими системами, характеризується розширенням числа категорій об'єктів для комп'ютеризованого розпізнавання, що дозволило визначити числові оцінки Хеммінгової віддалі класифікованих груп категорій дорожніх знаків: попереджувальні, пріоритету, заборонні, наказові та сервісу. На основі отриманих оцінок встановлено максимальні (11 біт) та мінімальні (1 біт) модульно-різницеві оцінки Хеммінгової віддалі структурних характеристик дорожніх знаків усередині кожної категорії. Це дозволило сформулювати рекомендації щодо покращення структурних ознак державної системи дорожніх знаків, а також удосконалити системні характеристики, апаратну та часову складності спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі між сигналами.

2. Розроблена та здійснена мікроелектронна реалізація на ПЛІС структури пристрою додавання багаторозрядних двійкових чисел у якості спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі між характеристиками образів, заданих кодами теоретико-числового базису Радемахера, що, у порівнянні з відомими пристроями, характеризується розширеними функціональними можливостями, оскільки

забезпечується визначення усередненого значення суми модульних різниць вибірки двох потоків двійкових чисел, незалежно від того, яке з чисел більше або менше.

3. Розроблена функціональна схема та здійснена мікроелектронна реалізація на ПЛІС принципової структури пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами шляхом конвеєрного перетворення аналогових сигналів у паралельні унітарні коди більшого та меншого амплітудних значень сигналів на основі логічного опрацювання та формування відповідних паралельних інверсних кодів Хаара, дешифрованих у відповідні прямі та інверсні коди базису Радемахера, які додаються між собою та логічною одиницею молодшого розряду накопичуючого багаторозрядного двійкового суматора, що, у порівнянні з відомими пристроями, в унітарному базисі характеризується підвищеною в $2^n / n$ (n – розрядність АЦП) разів швидкодією.

4. Розроблена та здійснена мікроелектронна реалізація різницево-модульного квадратора у якості швидкодійного компонента пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона згідно квадратичної оцінки Евклідової відстані, який, у порівнянні з відомими пристроями, характеризується підвищеною швидкодією на 1-3 порядки при розрядності представлення аналогових сигналів двійковими кодами в діапазоні 4-12 біт.

Теоретичні та практичні результати роботи використано та впроваджено:

- В інформаційно-діагностувальній системі моніторингу стану ізоляції високовольтних кабелів у мережах 6-35 кВ “Альтра” у підприємстві ВАТ ЕК «Дніпрообленерго»;

- В Управлінні патрульної поліції в Тернопільській області;

- На кафедрі «Спеціалізованих комп'ютерних систем» Тернопільського національного економічного університету при викладанні дисциплін: «Цифрова обробка сигналів і зображень», «Низові комп'ютерні системи управління»;

- На кафедрі «Обчислювальної техніки» Національного університету водного господарства та природокористування при викладанні дисциплін: «Теорія інформації та кодування», «Мікропроцесорні системи»;

- В науково-дослідних роботах кафедри «Спеціалізованих комп'ютерних систем» Тернопільського національного економічного університету.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові і практичні результати роботи одержано автором самостійно й опубліковано, зокрема, в одноосібно підготовлених працях [1, 17]. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать основні ідеї, теоретична та практична розробка положень, відображених у характеристиці наукової новизни отриманих результатів, а саме: [6, 8, 11, 13, 15] – запропоновано метод опрацювання сигналів двовимірного Хеммінгового простору, у вузлах якого існують багатовимірні об'єкти, на основі кодування решітчастих даних у теоретико-числовому базисі Крестенсона; [4, 6, 7, 8, 10, 14] – викладені та досліджені теоретичні основи методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі, здійснені розрахунки та побудовані діаграми розширеної оцінки Хеммінгової віддалі для просторових об'єктів, що дозволило розширити сферу застосування оцінки Хеммінгової віддалі; [3, 8, 16] – запропонована функціональна структура спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі між кодами, представленими в теоретико-числовому базисі унітарному, Радемахера, Хаара, що дозволило вдосконалити принципи визначення Хеммінгової віддалі в різних теоретико-числових базисах; [5, 9, 12] – запропонований спецпроцесор сканування та визначення Хеммінгової віддалі між кодами, представленими у двійковому коді Радемахера, що дозволяє зменшити часову складність в 16 разів, у порівнянні з відомими пристроями; [2, 9] – запропонована кореляційна оцінка Хеммінгової віддалі на основі розрахунку квадратичної евклідової відстані між двома значеннями фазних струмів, зсунутих у часі на половину періоду промислової частоти 50 Гц.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на проблемно-науковій міжгалузевій конференції “Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства (ЮПС-2016)” (Надвірна-Яремче, 2016); VIII-ій міжнародній школі-семінарі “Теорія прийняття рішень” (Ужгород, 2016); міжнародній науково-практичній конференції молодих науковців, аспірантів та студентів “Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електроніка” (Рівне, 2016); 14-тій міжнародній

конференції “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)” (Поляна, Львів, 2017); Всеукраїнській конференція з міжнародною участю “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології ”(ACIT) (Тернопіль, 2017); Міжнародній науковій конференції “Питання оптимізації обчислень” (ПОО-XLIV) (Кам’янець-Подільський, 2017); 14-й міжнародній конференції “Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)” (Львів-Славськ, 2018); Міжнародній науковій конференції ADVANCED COMPUTER INFORMATION TECHNOLOGIES (ACIT) (Ceske Budejovice, Czech Republic, 2018); Проблемно-науковій міжгалузевій конференції «Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства» (ЮПІС 2018) (Надвірна, 2018).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, у тому числі: 7 статей у провідних фахових виданнях (одна з них одноосібна), 2 патенти України на корисну модель, співавтор однієї колективної монографії, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 3 публікації включено до наукометричної бази Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 200 сторінок, у тому числі 150 сторінок основного тексту, 100 рисунків та 55 таблиць, список використаної літератури налічує 161 бібліографічних найменування. Дисертація містить 7 додатків, розміщених на 12 сторінках.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ДОСВІДУ РОЗРОБКИ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ У
ХЕММІНГОВОМУ ПРОСТОРИ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**1.1 Загальні положення та класифікація методів розпізнавання образів.**

Образ – класифікаційне групування в системі класифікації, яке об'єднує (виділяє) певну групу об'єктів за деякою ознакою [36, 37]. Образи мають характерні властивості, що виявляється в тому, що ознайомлення з кінцевим числом явищ з однієї і тієї ж множини дає можливість дізнаватися яке завгодно велике число його представників. В класичній постановці задачі розпізнавання універсальна множина розбивається на частини-образи. Кожне відображення якого-небудь об'єкта на органи сприйняття системи розпізнавання, незалежно від його положення відносно цих органів, прийнято називати зображенням об'єкта, а множину таких зображень, що об'єднані якими-небудь загальними властивостями, представляють собою образи [37].

Розпізнавання образів (об'єктів, сигналів, процесів, ситуацій чи явищ) – це задача ідентифікації об'єкта або визначення його властивостей по зображенню (оптичне розпізнавання), по аудіозапису (акустичне розпізнавання) чи по інших характеристиках (наприклад, розпізнавання гармонічних сигналів) [38].

Методика віднесення елемента до якого-небудь образу є вирішальним правилом. Метрики відображають спосіб визначення відстані між елементами універсальної множини. Чим менша ця відстань, тим більш схожими є об'єкти. Елементи образу задаються у вигляді набору чисел, а метрика – у вигляді функції. Від вибору представлення образів і реалізації метрики залежить ефективність програми, один алгоритм розпізнавання з різними метриками буде помилятися з різною частотою [37].

Образи можуть бути представлені бінарними та багаторівневими векторними кодами, двовимірними та багатовимірними матрицями згідно виразів (1.1) [37].

$$Q_x = (a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_i, \dots, a_0), Q_{xxx} = \left\| a_{ijk} \right\|;$$

$$Q_{xx} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n1} & \dots & a_{nm} \end{vmatrix}. \quad (1.1)$$

Спосіб кодування елементів образу безпосередньо впливає, як на обчислювальну, так і апаратну складність розпізнавання, це необхідно враховувати при розв'язанні задач ідентифікації і розпізнавання образів.

Загальна структура системи розпізнавання та етапи в процесі її розробки показані на рисунку 1.1 [37].

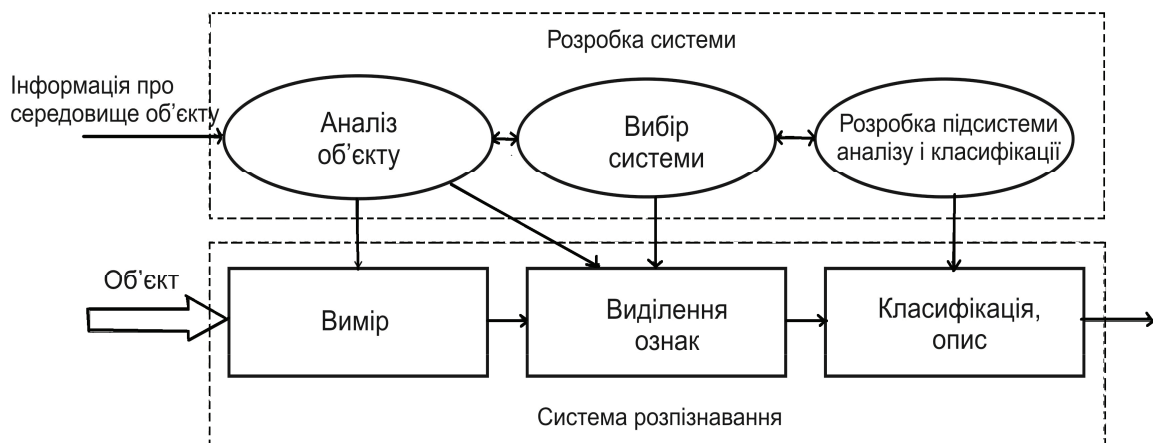


Рисунок 1.1 – Структура системи розпізнавання

Важливими є наступні типи задач розпізнавання [39]:

- розпізнавання – віднесення пред'явленого об'єкта по його опису до одного із заданих класів (навчання з учителем);
- автоматична класифікація – розбиття множини об'єктів ситуацій, явищ по їх опису на систему непересічних класів (таксономія, кластерний аналіз, самонавчання);
- вибір інформативного набору ознак при розпізнаванні;
- приведення вихідних даних до зручного для розпізнавання вигляду;
- динамічне розпізнавання і динамічна класифікація – задачі 1 і 2 для динамічних об'єктів;

– прогнозування – суть попередній тип класифікації, в якому рішення повинно відноситись до деякого моменту в майбутньому [39,40].

Задачі розпізнавання складаються з двох етапів [37]:

- перетворення вихідних даних до зручного для розпізнавання вигляду;
- розпізнавання (вказання приналежності об'єкта визначеному класу).

У випадку виконання задачі по розпізнаванню образів потрібно:

- використовувати аналогію об'єкта та встановлювати основні правила, такі що об'єкт класифікується у одні класи або у класи з різними типами;
- використовувати набір ознак, що класифікуються у вигляді формальних описів, а також вони можуть бути встановлені алгоритмом розпізнавання;
- використовувати методи побудовані на класичній математиці та формальній теорії.

Основні процеси розпізнавання образів подані на рисунку 1.2 [37]

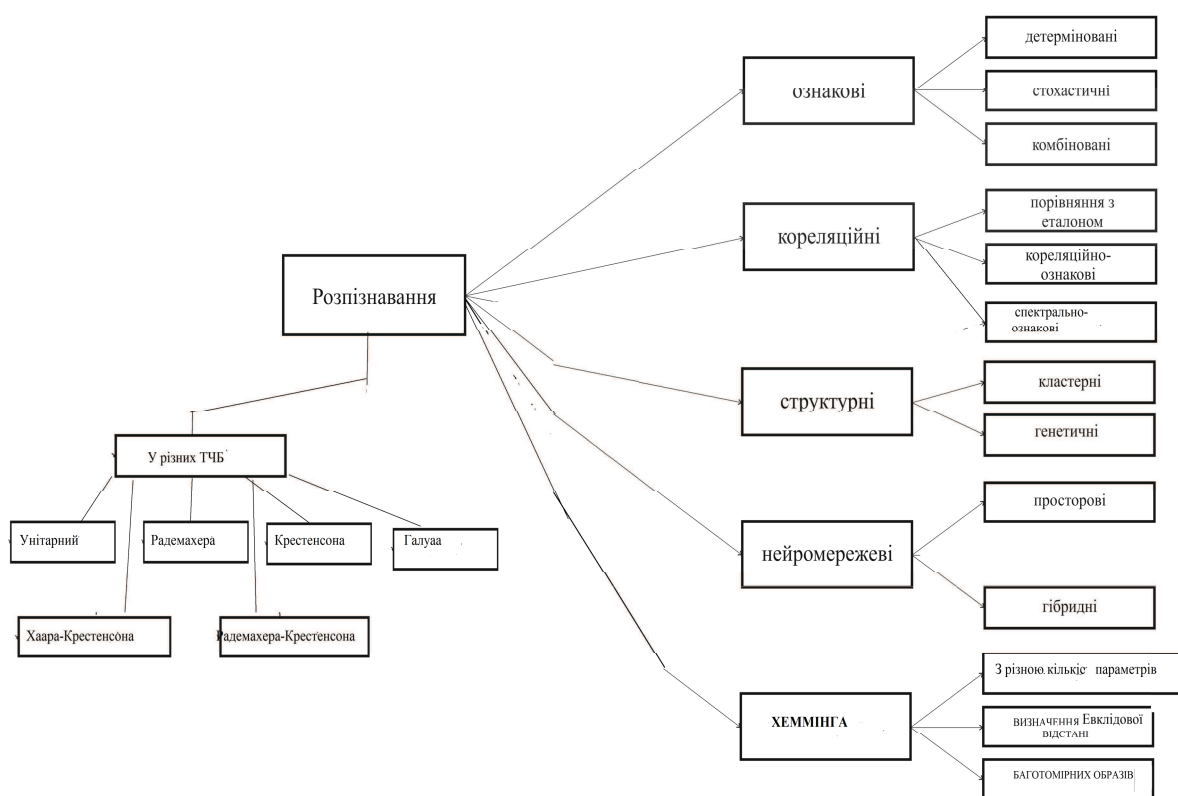


Рисунок 1.2 – Класифікація методів розпізнавання образів.

Класично, виділяють наступні методи розпізнавання образів [41-43]:

- перебору, в цьому випадку проводиться порівняння з базою даних, де для кожного виду об'єктів представлені всі можливі модифікації відображення;
- аналіз та диференціація компонентів образу;
- використання штучних нейронних мереж;

Таблиця 1.1 – Формалізація методів розпізнавання одномірних образів

№	Тип оцінки	Формула
1	відстані Мінковського	$d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^z (x_{ik} - x_{jk})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$
2	метрика Мінковського	$d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^z x_{ik} - x_{jk} ^p \right)^{\frac{1}{p}}$
3	Sup-метрика	$d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^z x_{ik} - x_{jk} ^\infty \right)^{\frac{1}{\infty}}$
4	відстань Махаланобіса	$d_{ij} = (X_i - X_j)^T S^{-1} (X_i - X_j)$
5	відстань Хеммінга	$d_{ij} = \sum_{k=1}^z x_{ik} - x_{jk} $
6	Квадратична Евклідова відстань	$d_{ij} = \sqrt{\sum (x_{ik} - x_{jk})^2}$
7	Відстань Чебешева	$d_{ij} = \max \sum x_{ik} - x_{jk} $

З кластерного аналізу відомо [46], що «відстанню між об'єктами» (тобто мірою схожості, близькості об'єктів між собою за всією сукупністю використовуваних ознак) може слугувати деяка величина d_{ij} , яка задовольняє наступним аксіомам:

- 1) $d_{ij} > 0$ (позитивність відстані);
- 2) $d_{ij} = d_{ji}$ (симетрія);
- 3) $d_{ij} + d_{jk} > d_{ik}$ (нерівність трикутника);
- 4) якщо d_{ij} не дорівнює 0, то i не дорівнює j (розрізнюваність нетотожних об'єктів);
- 5) якщо $d_{ij} = 0$, то $i = j$ (нероздільність тотожних об'єктів).

Замість звичайної Евклідової відстані ефективно використовують її квадрат. Крім того, у ряді випадків, використовується «зважена» Евклідова відстань, при обчисленні якої для окремих доданків використовуються вагові коефіцієнти.

Узагальнені ступеневі відстані Мінковського використовують будь-які числа «р», обґрунтоване значення якого конкретизується в окремих випадках розпізнавання образів.

При $p=2$ отримується звичайна Евклідова відстань [47]. Отже, вираз для узагальненої метрики Мінковського є поданий у таблиці 1.1, №2 [45].

Таким чином, манхеттенська відстань є сумою модулів різниць відповідних ознак об'єктів. Спрямувавши p до нескінченності, отримують метрику «домінування», або Sup-метрику (таблиця 1.1, №3) [45].

Метрика Мінковського фактично є великим сімейством метрик, що включає і популярніші метрики. Проте, існують методи обчислення відстані між об'єктами, що принципово відрізняються від метрик Мінковського. Важливішою з них є, так звана відстань Махаланобіса, яка має достатньо специфічні властивості. Вираз для цієї метрики поданий у таблиці 1.1, №4 [45].

У таблиці 1.1 через X_i і X_j позначені вектор-стовпці значень змінних для i -того і j -того об'єктів. Символ T у виразі позначає операцію транспонування вектора. Символом S позначена загальна внутрішньо-групова дисперсійно-коваріаційна матриця. Символ “-1” над S означає обернену матрицю S [48].

На відміну від метрики Мінковського і Евклідової метрики, відстань Махаланобіса через матрицю дисперсій-коваріацій S пов'язана з кореляціями змінних. Коли кореляції між змінними дорівнюють нулю, відстань Махаланобіса еквівалентна квадрату Евклідової відстані [45].

У разі використання дихотомічних (що мають всього два значення) якісних ознак широко використовується зважена відстань Хеммінга (таблиця 1.1, №5), що дорівнює числу неспівпадань значень відповідних ознак для i -го і j -го об'єктів [45].

Аналіз досвіду застосування різних методів розпізнавання образів у різних сферах опрацювання сигналів та цифрових даних, зроблений на основі опублікованих джерел, дозволяє констатувати наступне [49]:

1. Відомі методи вузькоспеціалізовані і не характеризуються універсальністю до різних образів;

2. Кореляційні методи найбільш ефективні, але по визначенню ряду авторів вважаються низько швидкісними та апаратно-складними, оскільки передбачають складну попередню статистичну обробку образів, в тому числі обчислення математичного сподівання, дисперсії, автокореляційної функції;

3. Відомі методи розпізнавання в Хеммінговому просторі недостатньо ефективні, оскільки використовуються для образів, які описуються бінарними векторами, а також не враховують можливість застосування різних аналітичних

виразів взаємкореляційних функцій та можливостей кодування даних у різних ТЧБ.

Успіхи у розробці високопродуктивних швидкодіючих спецпроцесорів кореляційного опрацювання сигналів на основі різних ТЧБ [50-53], потужні можливості сучасної мікроелектроніки та САПР створюють широкі можливості розвитку теорії та ефективного застосування методів розпізнавання багаторівневих образів у Хеммінговому просторі, що визначає високий рівень актуальності розв'язання цих задач на основі спецпроцесорів та кодових систем різних ТЧБ [15].

1.3 Математичні основи методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі

Математичною основою оцінок Хеммінгової віддалі є теорія статистичного кореляційного та спектрального аналізу. В теоретичному аспекті оцінки Хеммінгової віддалі між образами згідно відомих метрик є частковими випадками названих класів аналізів. Більш широкі можливості названих теоретичних основ опрацювання сигналів та даних є наявність операції зсуву між характеристиками образів представлених інформаційними масивами даних. Цій властивостям відповідають обчислення авто- та взаємкореляційних функцій між характеристиками образів. У частковому випадку коли відсутня операція зсуву між масивами цифрових характеристик, які представляють образи виконується аналітичні та обчисленні операції у статистичних методах опрацювання даних згідно оцінок Баєсса, коефіцієнтів регресії, коваріації.

Теоретичні засади регресійного кореляційного та спектрального аналізу викладено в роботах Нормаа Дрейпера, Гарри Смита [54], П.С. Сеньо [55];

Кореляційного аналізу викладено в роботах Николайчука Я. М. [15], Вентцеля А.Д [56], Грибанова В.І., Васелова Г.П., Андрєєва В.Н [57], Ж. Макса [58];

Спектрального аналізу викладено в роботах Бабака В.П., Белецького А.Я., Приставки А.Ф, Приставки Ф.А [59], А. Й. Наконечного, Р.А. Наконечного, В.А. Павлиша [60].

Загальна методологія побудови моделей джерел інформації розпізнавання образів у Хеммінговому просторі подана в роботі Я. М. Николайчук [15] де класифіковані наступні методи [61-63]:

- 1) геометричні методи;
- 2) статистичні методи (метод Байеса);
- 3) метод дискримінантних функцій;
- 4) кореляційний метод;

Геометричні методи. Будь-який об'єкт, що характеризується N ознаками може бути описаний у N -мірному метричному просторі Π вектором $a\{a_0, a_1, \dots, a_i, \dots, a_{N-1}\}$, де a_i – i -та координата вектора, яка виражає значення i -го параметру ОК в цьому просторі. Для ОК в просторі Π існує повна група образів $M : e_k\{e_0, e_1, \dots, e_i, \dots, e_{N-1}\}$, $k = 1, \dots, m$. Для ідентифікації стану об'єкта з одним із еталонних або оцінки їх неспівпадання використовується метрика, введена в просторі Π . Для зручності будемо вважати вектори a і e_k точками A і E простору Π .

Найбільш відомим є евклідовий простір, в якому введена метрика:

$$d_\varepsilon = |AE_k|_\varepsilon = \sqrt{(e_0 - a_0)^2 + (e_1 - a_1)^2 + \dots + (e_{N-1} - a_{N-1})^2}. \quad (1.2)$$

Існують багато інших способів введення метрик в N -мірному векторному просторі. Прикладом може служити, так звана, метрика Мінковського:

$$d_M = |AE_k|_M = |e_0 - a_0| + |e_1 - a_1| + \dots + |e_{N-1} - a_{N-1}|. \quad (1.3)$$

В багатьох відношеннях метрика Мінковського простіша за Евклідову [63] і легше реалізовується автоматизованих системах.

Якщо векторний простір побудований над основним полем F , яке містить тільки два елементи – 0 і 1, то такий простір називається Хеммінговим H , а введена в ньому метрика (1.3) – Хеммінговою відстанню:

$$d_H = |AE_k|_H = |e_0 - a_0| + |e_1 - a_1| + \dots + |e_{N-1} - a_{N-1}|. \quad (1.4)$$

В просторі H координати точок можуть приймати два значення – 0 і 1, абсолютні величини яких $|0| = 0$ і $|1| = 1$. Метрика Хеммінга може бути введена для векторних просторів з полем F , яке містить більше двох елементів [62]. В такому випадку d_H визначається згідно (1.2), але необхідно прийняти, що:

$$|a_i| = \begin{cases} 0, & \text{якщо } a_i = 0; \\ 1, & \text{якщо } a_i \neq 0. \end{cases}$$

Очевидно, що Хеммінгова відстань між двома точками рівна кількості неспівпадаючих координат цих точок.

При визначенні оцінка Хеммінгової відстані згідно (1.3) вважається, що координати мають рівноцінну вагу. При необхідності врахування різної семантичної значимості координат вводиться вагова функція w_i . Тоді d_H визначається як:

$$d_H = |AE|_H = w_0|e_0 - a_0| + w_1|e_1 - a_1| + \dots + w_{N-1}|e_{N-1} - a_{N-1}|. \quad (1.5)$$

Для поля F , яке містить більше двох елементів, існує більш загальна метрика, яка враховує не тільки сам факт неспівпадання координат точок, але й наскільки сильно ці координати відрізняються [62, 63]. Ця метрика називається метрикою ЛІ. Вона вводиться для векторного поля F , абсолютна величина елементів якого визначається як $|a_i| = a_i$ або, як показано в [64]:

$$|a| = \begin{cases} a_i, & \text{якщо } 0 \leq a_i \leq m/2; \\ m - a_i, & \text{якщо } m/2 < a_i \leq m - 1, \end{cases}$$

де m – кількість елементів поля F .

Самі метрики при цьому визначаються за виразом (1.4) або виразом (1.5) – при врахуванні різної семантичної ваги координат.

Незалежно від метрики, що використовується об'єкт a ідентифікується з тим еталоном e_k , для якого $d = \min$.

Метод Байєса. Даний метод використовується, якщо існує повна група еталонних образів $A: A_1, A_2, \dots, A_M$ з відомими апіорними розподілами ймовірностей $P(A_1), P(A_2), \dots, P(A_M)$, $\sum_{i=1}^M P(A_i) = 1$ [56, 65]. При реалізації події, яка полягає в появі об'єкту b_j , визначається умовна ймовірність:

$$P(A_i/b_j) = \frac{P(A_i)P(b_j/A_i)}{P(b_j)}, \quad (1.6)$$

де умовні ймовірності $P(b_j/A_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$; $j = 1, 2, \dots, T$ вважаються заданими.

З врахуванням того, що A – повна група, попередня формула записується у вигляді:

$$P(A_i/b_j) = \frac{P(A_i)P(b_j/A_i)}{\sum_{i=1}^M P(A_i)P(b_j/A_i)}. \quad (1.7)$$

Формули (1.6) і (1.7) в теорії ймовірності носять назву “правило Байєса”, звідси походить назва методу.

На основі порівняння всіх апостеріорних ймовірностей $P(A_i/b_j)$, об'єкт b_j відносять до того класу, для якого значення ймовірності є максимальним.

Метод дискримінантних функцій [66]. На множині еталонів визначаються дискримінантні функції $g_i(x)$ і розділюючі поверхні, які знаходяться з рівняння:

$$g_i(x) = g_j(x).$$

За ідентифікаційну ознаку в методі дискримінантних функцій взято знак різниці:

$$\text{sgn}[g_i(x) - g_j(x)]. \quad (1.8)$$

Якщо (1.7) рівне 1, то об'єкт x відносять до i -го класу, якщо (1.8) рівне -1 , то x відносять до j -го класу.

Кореляційний метод. Якщо порівняти Хеммінгову модель з модульною функцією взаємкореляції, то очевидно, що вони еквівалентні. В такому разі для ідентифікації можна використати інші оцінки кореляції між об'єктом та еталонами:

$$\begin{aligned} XK &= \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} e_l \cdot x_l; & XC &= \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} (e_l - x_l)^2; \\ X\check{F} &= \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \check{z}(e_l, x_l); & X\hat{F} &= \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \hat{z}(e_l, x_l); \\ X\check{F}^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \check{z}^2(e_l, x_l); & X\hat{F}^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \hat{z}^2(e_l, x_l). \end{aligned}$$

В загальному випадку модель розпізнавання образів на основі кореляційних оцінок запишемо у вигляді:

$$X = \frac{1}{l} \sum_{l=1}^{N-1} w_l * (e_l * x_l)^* ; \quad (1.9)$$

де $*$ – ознака операцій множення, віднімання, модулю, піднесення до квадрату, “менше (більше) з двох”, “менше (більше) з двох” до квадрату.

Потрібно відмітити, що при використанні виразу (1.9) образ об'єкту x_i ідентифікується з еталонним образом e_j з групи еталонів E , при $X = \max$, якщо в

(1.9) використані оцінки $K_{xe}, R_{xe}, \check{F}_{xe}, \check{F}_{xe}^2$ і при $X = \min$, якщо – оцінки

$$C_{xe}, G_{xe}, \hat{F}_{xe}, \hat{F}_{xe}^2.$$

Крім названих методів широке застосування у галузі розпізнавання образів отримали спектральні методи які характеризуються більш складними алгоритмами обчислень і можуть бути реалізовані сучасними потужними обчислювальними засобами та спецпроцесорами мікроелектроніки із застосуванням математики різних теоретико-числових базисів та модульної арифметики системи залишкових класів.

Математична оцінка коефіцієнта регресії, яка використовується для вирішення задач розпізнавання двохвимірних образів визначається згідно рівняння [55],

$$R(x, y) = \rho(x, y) \frac{\sqrt{D_x}}{\sqrt{D_y}},$$

де x та y – характеристики двомірного образу;

$\rho(x, y)$ – кореляційне рівняння регресії ;

D_x, D_y – відповідні дисперсії масивів характеристик образів.

Застосування кореляційного рівняння регресії спрощує обчислення алгоритму розпізнавання образів шляхом визначення Хеммінгової віддалі між досліджуваною функцією та еталонною згідно виразу:

$$d_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{i,j=1}^m |\rho(x_{ij}, y_{ij}) - p(x_{0ij}, y_{0ij})|$$

де $p(x_{0ij}, y_{0ij})$ – еталонне кореляційне рівняння регресії;

m – число вибірки.

Застосування теоретичних засад кореляційного аналізу для розпізнавання образів реалізується на основі системи функцій авто та взаємкореляції [15-17, 67] які для дискретизованих характеристик образів представляються у загальному наступними рівнянням:

$$X = \frac{1}{l} \sum_{l=1}^{N-1} w_l * (e_l * x_l)^* ;$$

Теоретичні засади спектрального аналізу застосовуються в галузі розпізнавання образів шляхом перетворення їх оцифрованих та дискретизованих характеристик у функції спектрів на основі дискретно-косинусного перетворення Фурє швидкого перетворення Фурє , Вілвета перетворень та інших, які порівнюються з еталонними характеристиками об'єктів згідно оцінок Хеммінгової віддалі. У загальному випадку обчислення спектру згідно косинусного перетворення фуре та швидкого перетворення фуре описується наступними рівнянням:

$$G_x(f) = \sum_{k=1}^n \rho(j) \cdot e^{-j2\pi fk}$$

Широкі можливості застосування спектрального аналізу для розпізнавання образів створюються при застосуванні кодування характеристик образів та виконання обчислювальних операцій над ними у базисах Радемахера, Крестенсона, Хаара-Крестенсона [16-17, 67]

Оцінка Хеммінгової віддалі може також виконуватися шляхом визначення коефіцієнта взаємкореляції між автокореляційною функцією характеристик образу та базовою еталонною кореляційною функцією певного класу образу, а також визначення оцінки Хеммінгової віддалі модульною різницею між оцінкою спектру характеристик образу та оцінкою спектру певного класу образу.

Отже проведений аналіз дозволяє встановити [68], що відомі метрики оцінки Хеммінгової віддалі базуються на використанні двох обчислювальних функцій модульної різниці $|x_i - y_i|$, яка відповідає модульній коефіцієнту взаємкореляції $G_{xx}(0)$ та коефіцієнту структурної взаємкореляції $|x_i - y_i|^2$, що відповідає коефіцієнту структурної взаємкореляції w_j , а також знаковому коефіцієнту взаємкореляції $sign(x_i) - sign(y_i)$ при бінарному представленні характеристик образу значеннями 0 та 1. При цьому оцінки Хеммінгової віддалі при багаторівневому кодуванню характеристик образу практично нормалізуються не дисперсіями та математичними сподіваннями, а однаковими діапазонами представлення, тобто вважається, що дані характеристики мають рівномірний розподіл в діапазоні представлення.

1.4 Перетворення модульної арифметики теоретико-числового базису Крестенсона

Систему числення залишкових класів (СЗК) утворює ТЧБ Крестенсона [15].

Метод зменшення надмірного використання сигналів оснований СЗК використовує основи теорії діофантових рівнянь та залишків [95-97]:

$$x_i = a_i \cdot p + b_i,$$

де p – модуль; b_i – найменший невід'ємний залишок; a_i – ранг [15].

Тоді діофантове рівняння матиме наступний вигляд:

$$x_i \equiv b_i \pmod{p},$$

або операція прямого кодування по залишках:

$$b_i = \text{res } x_i (\text{mod } p),$$

де res – символ операції отримання залишку.

Зворотня операція [17]:

$$x_i = \overset{\vee}{E} \left[\frac{x_{i-1} - b_i}{p} + 0,5 \right] \cdot p + b_i,$$

де $\overset{\vee}{E}[\cdot]$ – цілочисельна функція з округленням до меншого цілого.

Умова однозначності кодування методом залишків виконується, якщо

$$\Delta x_{\max} \leq \frac{p-1}{2},$$

для $p = 5$, $\Delta x_{i \max} \leq 2$, $p = 7$, $\Delta x_{i \max} \leq 3$.

Ефект стиснення даних досягається за рахунок представлення інформаційних відліків відповідними залишками меншої розрядності.

Розрядність коду x_i визначається за формулою Хартлі:

$$n = \hat{E} [\log_2 A],$$

де n – розрядність двійкового коду для представлення величини x_i ;

$\hat{E}[\cdot]$ – цілочисельна функція з округленням до більшого цілого;

A – діапазон квантування сигналу $0 \leq x_i \leq A$.

Розрядність коду залишків b_i визначаємо за формулою:

$$n_z = \hat{E} [\log_2 p].$$

При перетворенні унітарних кодів x_i в СЗК, унітарний код x_i надходить на відповідні лічильники, що працюють по вказаних модулях P1, P2, P3. Тоді на виходах паралельних лічильників утворюється новий код у системі залишкових класів по відповідних вибраних модулях [15].

Однією з переваг використання аналого-цифрового перетворення (АЦП) в СЗК є утворення незалежних інформаційних розрядів, які дають можливість паралельної обробки таких розрядів [15, 98].

Метод залишків в основному використовується для кодування та опрацювання процесів із низькою динамікою [15].

Представлення даних в СЗК надає можливість виконувати паралельну обробку інформації без суттєвого ускладнення обчислювальних пристроїв [15].

Основною ознакою СЗК є простота реалізації та виконання прямих та зворотніх перетворень [99].

Застосування системи залишкових класів робить простішою розробку системи зібрання інформації, при цьому вона також надає можливість розв'язувати клас задач, які є невизначеними в позиційній системі числення [99].

Існує декілька основних типів кодування інформаційних потоків в СЗК:

1. Кодування інформаційних потоків в СЗК з довільним порядком реєстрації даних.

Суть даного методу полягає у тому, що кожне цифрове значення Y_{ij} , i -го виміру j -го каналу перемножують на базисне число B_j в результаті чого отримують нове значення $a_{ij} = Y_{ij} \cdot B_j$. Значення a_{ij} сумуються по модулю P і записують у вигляді:

$$N_{ik} = \text{res} \sum_{j=1}^k a_{ij} \pmod{P},$$

де k - число каналів [17].

Значення N_k однозначно відображає набір цифрових відліків $Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{ij}, \dots, Y_{ik}$. Однозначність виконується коли $0 \leq Y_{ij} = A_j \leq P_j - 1$, де: P_j - модулі перетворення СЗК, A_j - діапазон квантування цифрових відліків у j -му каналі [17].

Однозначне відновлення відліків Y_{ij} після передавання або збереження коду N_{ik} виконується на основі прямого перетворення в СЗК [17].

$$Y_{ij} = \text{res} N_{ik} \pmod{P_j}.$$

За допомогою оцінки Хартлі вираховується коефіцієнт стиснення інформації, за відношенням ентропії вхідних даних, де код цифрового відліку з довільним порядком фіксування супроводжується ідентифікаційним кодом номера каналу

$$k_c = \frac{I_{\text{ex}}}{I_{\text{СЗК}}} [17].$$

2. Каскадне кодування даних на основі методу залишків та СЗК [17].

Процеси кодування та декодування інформації методом залишків виконуються наступним чином. Початковий масив даних на обраному інтервалі часу представляється матрицею [17]:

$$Y_{ij} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{i1} & \dots & Y_{k1} & \dots & Y_{n1} \\ Y_{12} & \dots & Y_{i2} & \dots & Y_{k2} & \dots & Y_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{1k} & \dots & Y_{ik} & \dots & Y_{kk} & \dots & Y_{nk} \end{pmatrix}, \quad (1.10)$$

де k - число відліків ($n > k$);

Y_{ij} - цифровий відлік i -го вимірювання j -го каналу n .

Застосувавши метод залишків, матрицю (1.10) перетворюємо у матрицю залишків $\|b_{ij}\|$.

$$\|b_{ij}\| = \text{res} Y_{ij} (\text{mod } P_j), i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, k}, \quad (1.11)$$

де $P_j - 1 \geq 2|Y_{ij} - Y_{i-1,j}|_{\max}$ є умовою однозначності перетворень.

Вираз (1.23) відповідає лінійній формі:

$$Y_{ij} = a_{ij} \cdot P_j + b_{ij},$$

де $a_{ij} = \hat{E} \left[\frac{Y_{ij}}{P_j} \right]$ - ранг за модулем P_j відліку Y_{ij} .

Для однозначного відтворення цифрових значень матриці (1.10) за рекурентною формулою [17, 95]:

$$Y_{i+1,j} = \hat{E} \left[\frac{Y_{ij} - b_{i+1,j}}{P_j} \right] P_j + b_{ij}.$$

Необхідно матрицю залишків (1.11) доповнити вектором-строкою опорних рангів $a_{ij} (i \in \overline{1, k})$ і елементом X ,

$$\begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{i1} & \dots & b_{k1} & b_{k+1,1} & \dots & b_{n1} \\ b_{12} & \dots & b_{i2} & \dots & b_{k2} & b_{k+1,2} & \dots & b_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{1j} & \dots & b_{ij} & \dots & b_{kj} & b_{k+1,j} & \dots & b_{nj} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{1k} & \dots & b_{ik} & \dots & b_{kk} & b_{k+1,k} & \dots & b_{nk} \\ a_{1k+1} & \dots & a_{ik+1} & \dots & b_{k,k+1} & X_{k+1} & \dots & X \end{pmatrix},$$

де елементи утворюють поле довільних інформаційних повідомлень по $\text{mod } P_{k+1}$.

3. Нормалізована форма СЗК [17].

Наявність операції згортки N_k по модулю P_j при зростанні відношення ρ/P_j

у великорозрядних процесорах знижує можливості створення швидкодіючих програмно-апаратних засобів опрацювання даних. Аналогічно визначення залишку по модулю у зворотному перетворенні цілочисельної форми СЗК від суми добутків ускладнює реалізацію суматорів та знижує їх швидкодію. Цілочисельність надходження даних є не завжди вигідною, оскільки числа в процесорах, як правило, кодуються у нормалізованій формі з плаваючою або фіксованою комою. Одним з шляхів оптимізації та підвищення швидкодії процесорів СЗК є приведення її перетворень до нормалізованої форми [17, 96].

Умову нормування числа отримаємо розділивши ліву і праву частини виразу на:

$$\frac{N_k}{\rho} = \text{res} \sum_{j=1}^k b_j \frac{\rho}{P_j} \cdot m_j (\text{mod } \rho) / \rho.$$

У результаті отримується:

$$[N_k]_0 = \text{res} \sum_{j=1}^k [b_j]_0 \cdot m_j (\text{mod } 1),$$

де $[N_k]_0 = N_k / \rho$; $[b_j]_0 = b_j / P_j$; операція - виконується шляхом відкидання цілої частини результату сумування добутків $[b_j] \cdot m_j$.

Враховуючи, що нормування по модулю значення залишку отримується при рішенні рівняння:

$$[b_j]_0 = \text{res}[N_k]_0 \frac{\rho}{P_j} (\text{mod } 1)$$

Відновлення цілочисельного значення виконується згідно виразу:

$$b_j = \hat{E}[[b_j]_0 \cdot P_j],$$

цілочисельна функція з округленням до більшого цілого.

4. Досконалі форми СЗК [17].

Операцією, що збільшує часову складність алгоритмів перетворення в цілочисельній та нормалізованій СЗК, є процедура множення при отриманні парних добутків $b_j \cdot B_j$ та $[b_j] \cdot m_j$. Тому її виключення з аналітики названих перетворень дозволяє добитися суттєвих спрощень, як в алгоритмічному, так і в апаратурному аспектах [17].

Для рішення цієї задачі запишемо вираз для зворотнього перетворення СЗК з одиничними ваговими коефіцієнтами [17]:

$$N_k = \begin{cases} \text{res} \sum_{j=1}^k b_j (\pm 1) \frac{\rho}{P_j} (\text{mod } \rho), & \dot{N}_k \leq 0; \\ \rho - \text{res} \sum_{j=1}^k b_j (\pm 1) \frac{\rho}{P_j} (\text{mod } \rho), & \dot{N}_k > 0. \end{cases} \quad (1.12)$$

Зворотнє перетворення для таких СЗК у випадку (1.12) визначається виразом

$$\pm \dot{N}_k = \text{res} \sum_{j=1}^k b_j (\pm 1) \frac{\rho}{P_j} (\text{mod } \rho),$$

а пряме перетворення виконується згідно виразу [17]:

$$b_j = \begin{cases} \text{res} \dot{N}_k (\text{mod } P_j), & N_k \leq 0; \\ \text{res} (\rho - \dot{N}_k) (\text{mod } P_j), & N_k > 0. \end{cases}$$

Дана форма системи залишкових функцій має певні переваги над іншими тому, що при переведенні з СЗК в десяткову систему числення необхідно здійснювати пошук оберненого елемента за модулем.

1.5 Дослідження структурних рішень існуючих пристроїв кореляційного опрацювання сигналів у якості компонентів спецпроцесорів розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі. Постановка завдань дослідження.

Існує велике число різних структурних варіантів побудови кореляційних спецпроцесорів на основі різної елементної бази кодових систем теоретико-числових базисів та аналітичних виразів кореляційних функцій [15].

Цифрові кореляційні процесори широко використовуються у різних галузях цифрового опрацювання сигналів. Важливими системними характеристиками таких процесорів є наступні [69-70]:

- максимальна швидкодія;
- мінімальна апаратна, алгоритмічна та часова складність;
- висока інформативність.

Висока ефективність застосування кореляційного опрацювання сигналів створює обґрунтовані перспективи їх використання для розпізнавання образів, що представлені бінарними векторами, тому розробка нових методів побудови такого класу спецпроцесорів є актуальною науково-технічною задачею.

Найбільш широке застосування, для розпізнавання аналогових сигналів $x(t)$ та $y(t)$ отримали цифрові корелятори на основі мультиплікативної (коваріаційної)

$$\text{функції } K_{i,i-j} = \frac{1}{n} \sum_{\substack{i=1 \\ j=0}}^n x_i \cdot y_{i-j} .$$

В роботі [71] приведені структурні схеми кореляторів для визначення імпульсних характеристик об'єктів (рисунок.1.3).

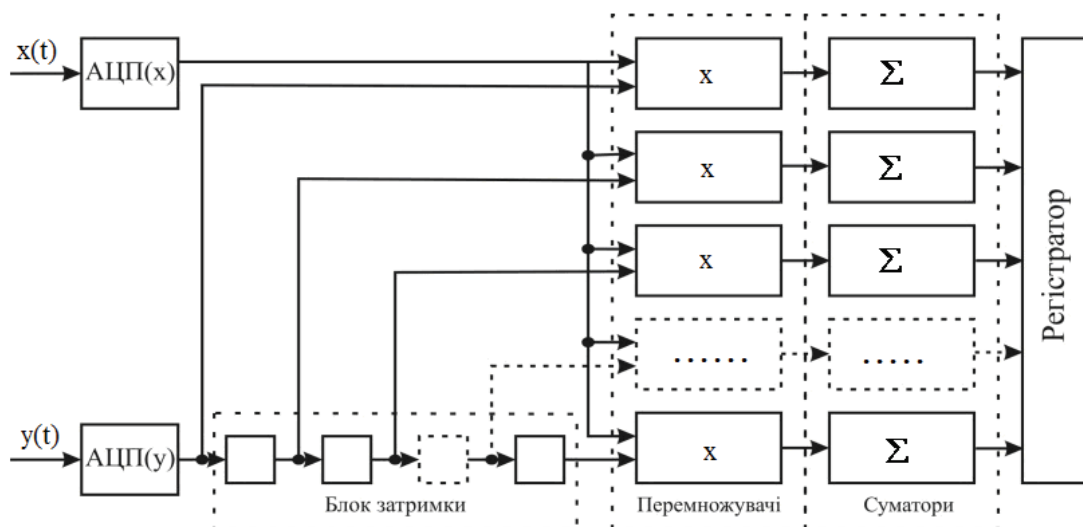


Рисунок 1.3 – Блок-схема системи визначення імпульсних характеристик об'єктів

В якості елементної бази описаних кореляторів використовуються аналого-частотні логічні (АВЛ) елементи, що зумовлює низьку швидкодію та високу апаратну складність таких пристроїв.

Серія цифрових кореляторів, структури яких приведені нижче [72-79], реалізована на основі обчислення різних кореляційних функцій та змінного кроку дискретизації, що дозволило вилучити зі структури багатоканальний реєстр зсуву даних.

- Цифровий автокорелятор паралельного типу (рисунок. 1.4):

$$K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j}$$

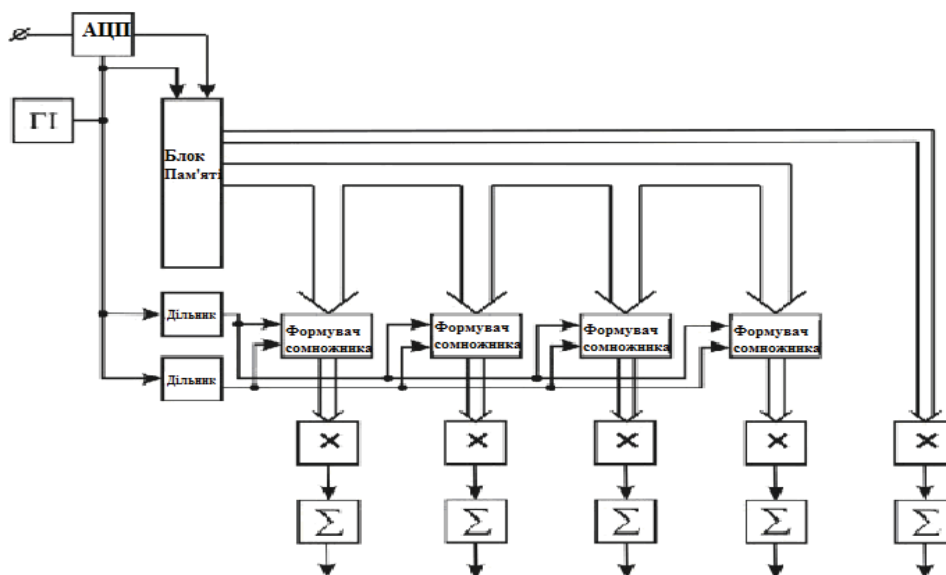


Рисунок 1.4 –Цифровий автокорелятор паралельного типу.

- Пристрій для обчислення похідної структурної функції (рисунок 1.5):

$$C'_{xx}(j) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{N-1} [(x_i - x_{L_i})^2 - (x_i - x_{K_i})^2] \text{ зі змінним кроком дискретизації.}$$

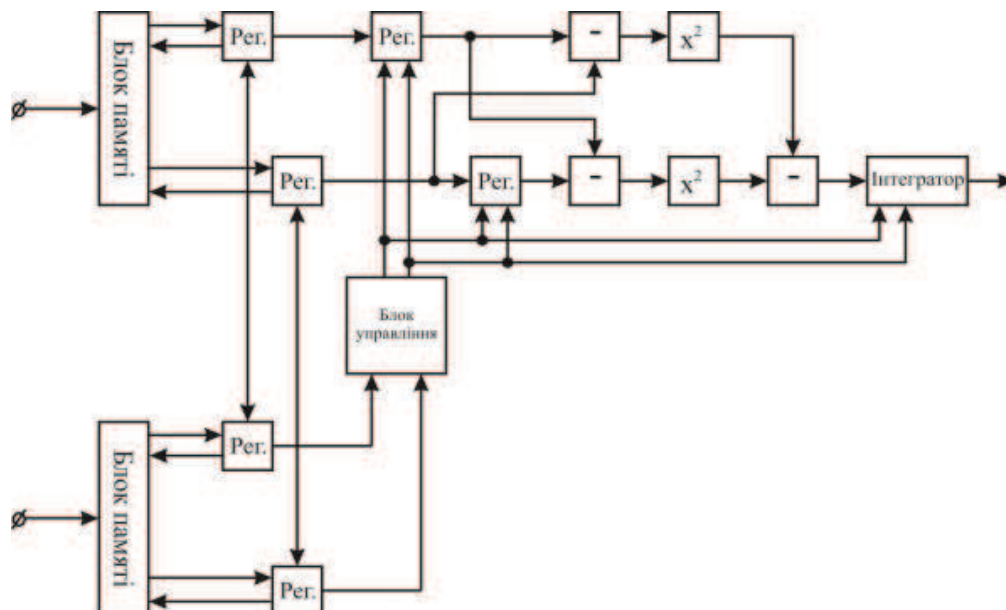


Рисунок 1.5 – Пристрій для обчислення похідної структурної функції.

- Цифровий автокорелятор (рисунок 1.6): $K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j}$, зі змінним

кроком дискретизації.

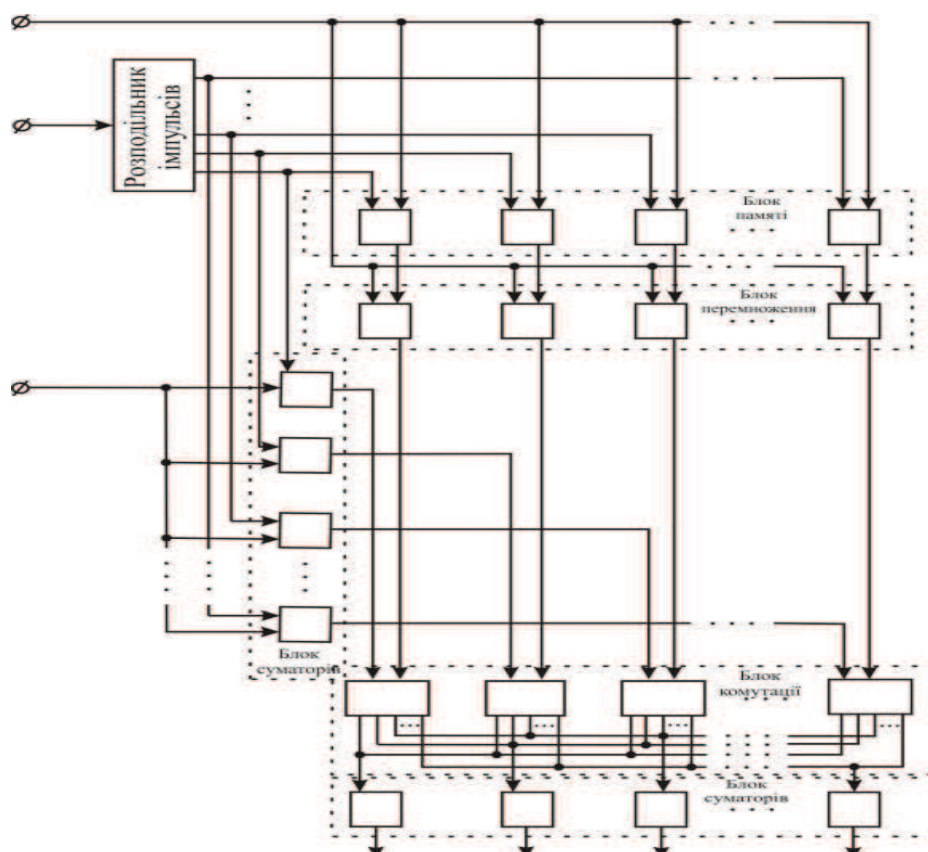


Рисунок 1.6 – Цифровий автокорелятор.

- Автокорелятор (рисунок 1.7): $\rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{R_{xx}(0)}$

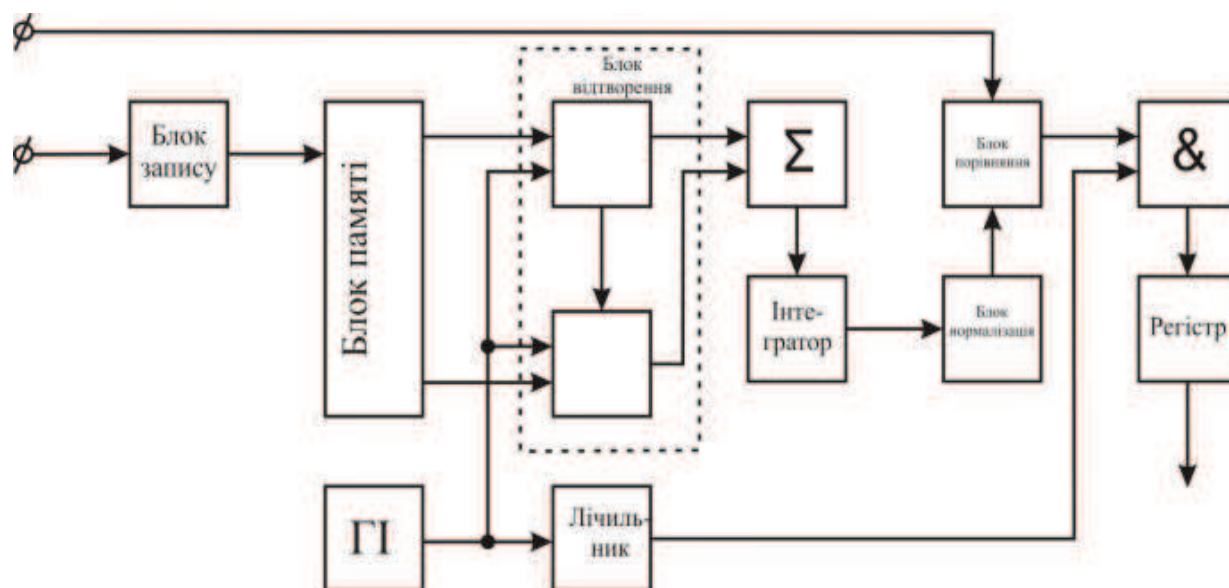


Рисунок 1.7 – Автокорелятор.

- Цифровий автокорелятор (рисунок 1.8): $K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j}$

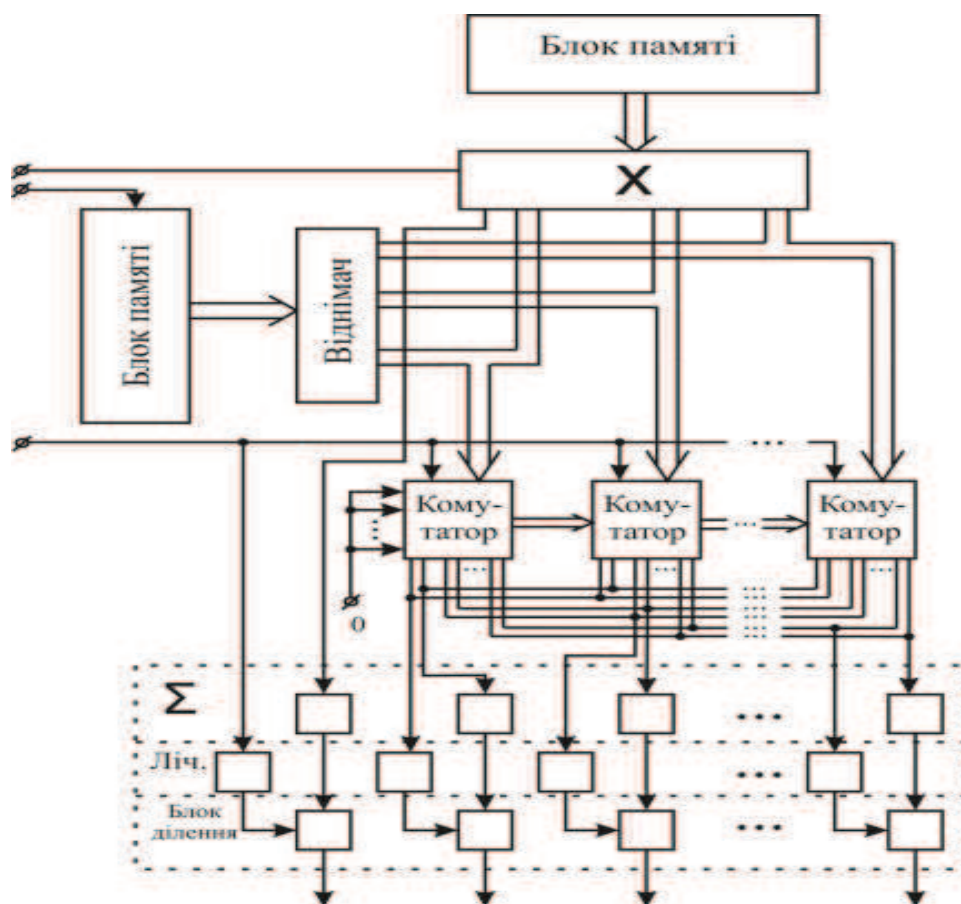


Рисунок 1.8 – Цифровий автокорелятор.

Структура та аналітика цифрових кореляторів зарубіжних розробників представлена нижче [75-78].

- Диференціальний корелятор для системи зв'язку розповсюдження спектру (Greg A. Nease, Peter K. Cripps, Agilis Corporation, Calif.) (рисунок 1.9): Корелятор розповсюдження спектру,

$$H_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(x_i) \cdot \text{sign}(x_{i+j})$$

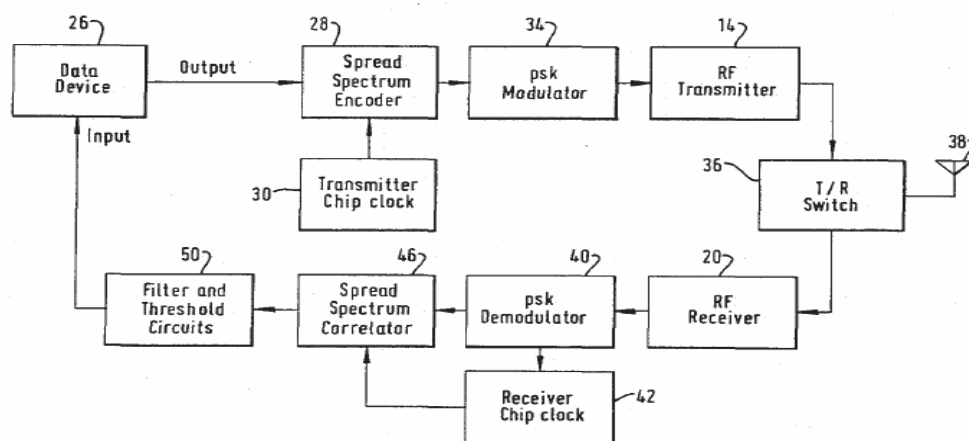


Рисунок 1.9 – Корелятор розповсюдження спектру.

- Електронний корелятор (Jenoptik Jena G.m.b.H., Werner Marckwardt)

(рисунок 1.10): $H_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(x_i) \cdot \text{sign}(x_{i+j})$, $H_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(x_i) \cdot \text{sign}(y_{i+j})$

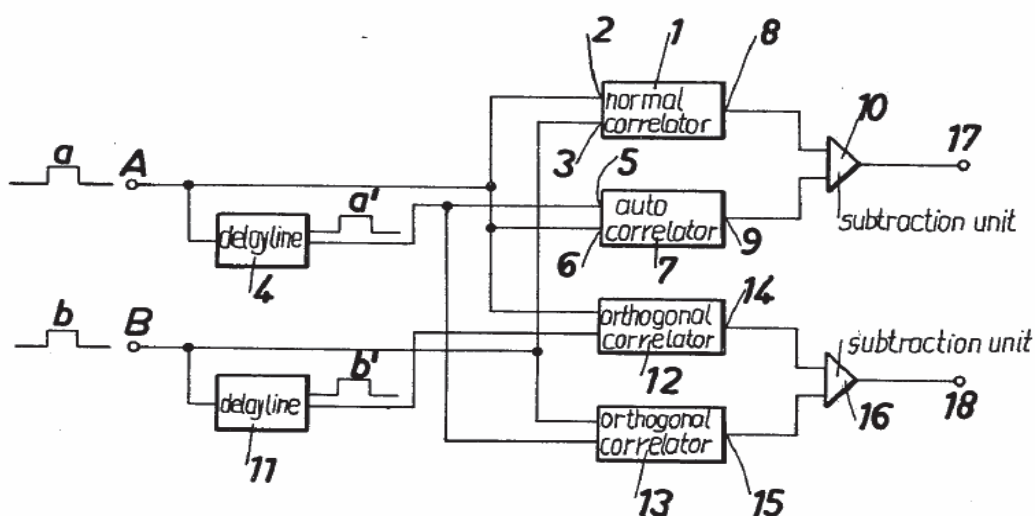


Рисунок 1.10 – Електронний корелятор.

- Корелятор, синхронізатор, що постачається з корелятором, та стрічковий спектра для швидкої частоти, що поставляється з синхронізатором (Keiji Takakusaki, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.) (рисунок 1.11): $\rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{D_x}$.

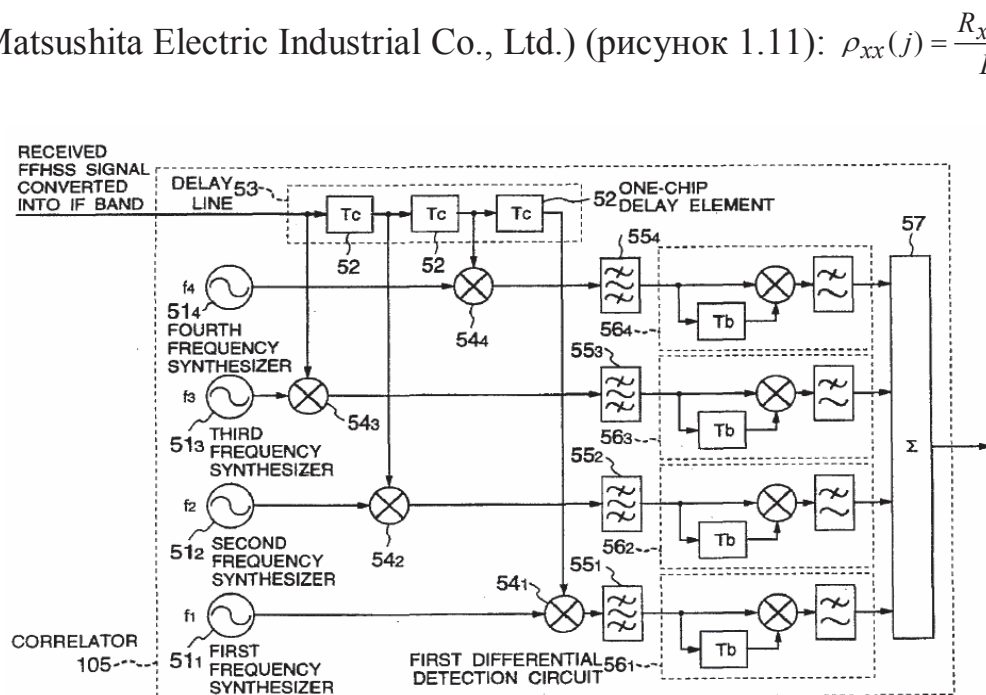


Рисунок 1.11 – Корелятор, синхронізатор, що постачається з корелятором, та стрічковий спектра для швидкої частоти, що поставляється з синхронізатором.

- Програмувальний корелятор (рисунок 1.12) (Drew E. Sunstein, 19 Parkhurst

Dr., Nashua, N.H. 03060): $H_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(x_i) \cdot \text{sign}(y_{i+j})$

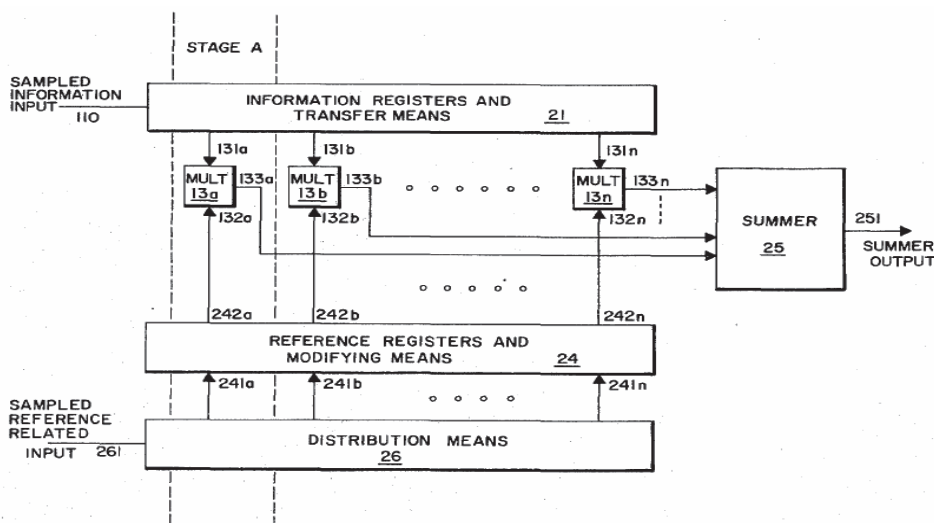


Рисунок 1.12 – Програмувальний корелятор.

Відома складність реалізації швидкодіючих перемножувачів [79-80], які є базовим компонентом цифрових кореляторів обумовила розвиток такого класу спецпроцесорів на основі унітарного ТЧБ. Це дозволило підвищити регулярність архітектури таких спецпроцесорів та забезпечити високий рівень паралелізму операцій та реалізацію операцій множення в кожному каналі на основі простих логічних схем «І» та «Виключаюче АБО».

Далі в тексті приведені структури даного класу цифрових кореляторів, які реалізують алгоритми обчислення таких функцій автокореляції, як: структурної, модульної та еквівалентної, а також матрично-модульної взаємкореляційної функції у різних ТЧБ [81-83].

- Пристрій для обчислення модульної функції (унітарний ТЧБ) (рисунок 1.13): $G_{xx}(j) = \text{res}(\sum_{i=1}^n |x_i - x_{i+j}|) \text{ mod } P$

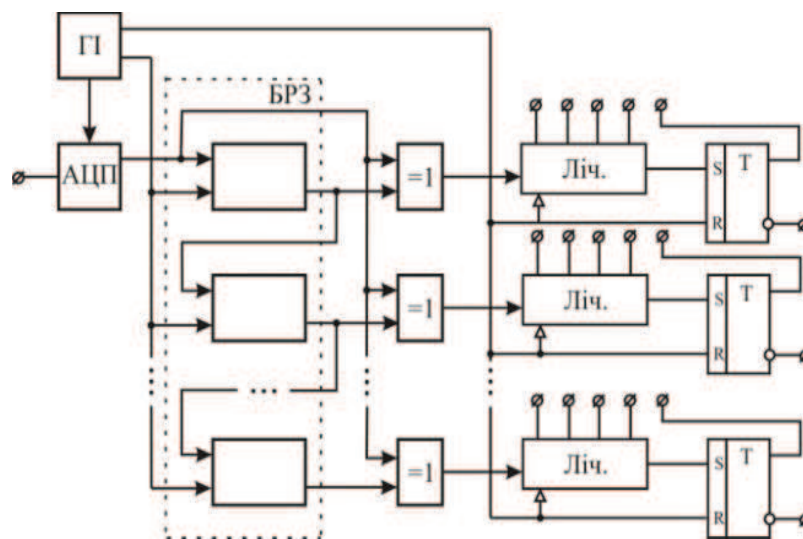


Рисунок 1.13 – Пристрій для обчислення модульної функції.

- Пристрій для обчислення структурної функції (унітарний ТЧБ) (рисунок 1.14): $C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+j})^2$

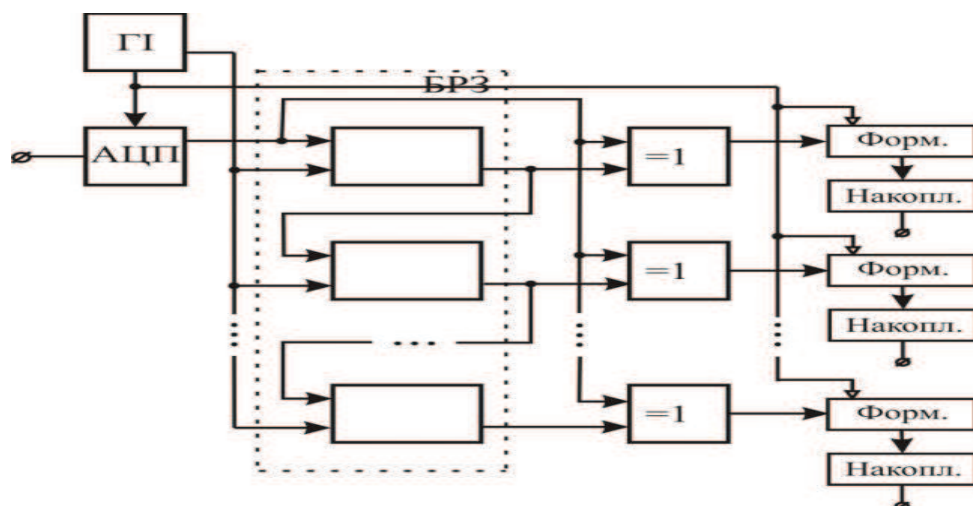


Рисунок 1.14 – Пристрій для обчислення структурної функції.

- Пристрій для обчислення функції еквівалентності (ТЧБ Хаара) (рисунок

$$1.15): F_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_{xx}$$

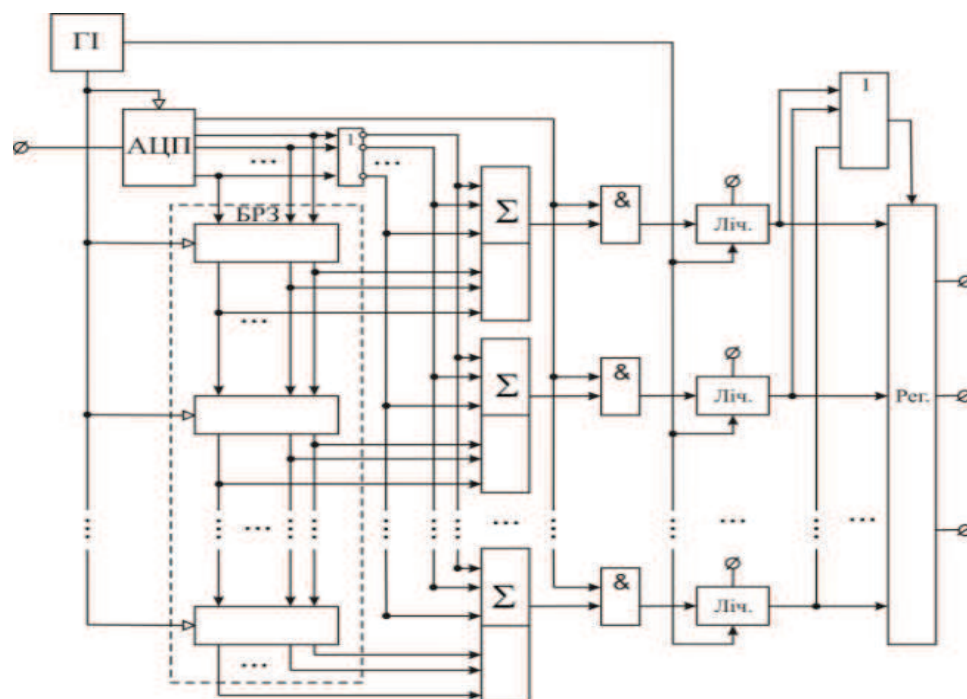


Рисунок 1.15 – Пристрій для обчислення функції еквівалентності.

- Модульно-матричний цифровий корелятор (унітарний ТЧБ) (рисунок 1.16):

$$C_{xy}(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

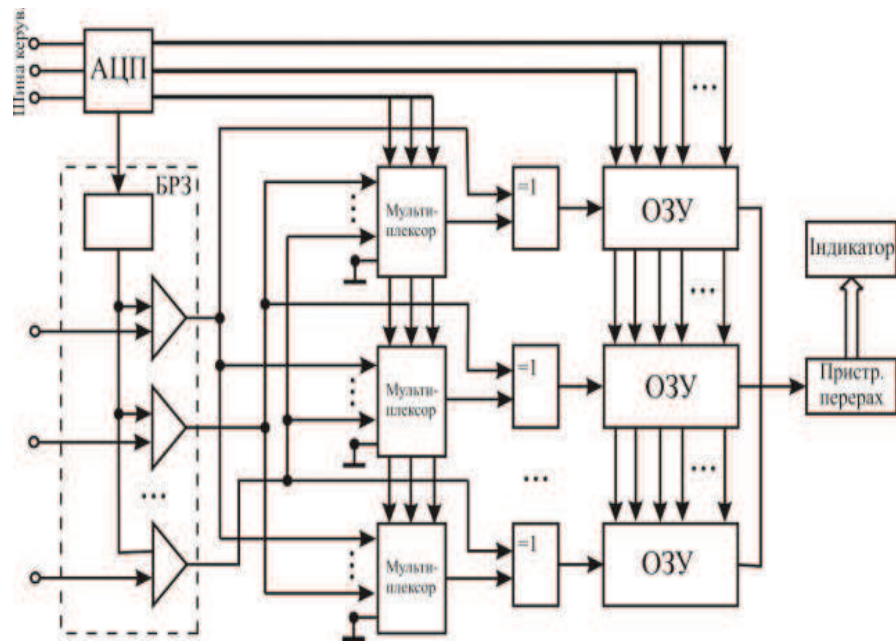


Рисунок 1.16 – Модульно-матричний цифровий корелятор.

Перевагою таких структур цифрових кореляторів є паралельне формування унітарного коду на виході АЦП, зсув інформації в регістрі даних, логічне перемноження цифрових даних та їх сумування в накопичуючих суматорах.

Проведений аналіз розробок цифрових кореляторів вітчизняних та відомих зарубіжних фірм показує [84-86], що такі спецпроцесори можуть виконувати цифрове опрацювання даних на основі дискретних автокореляційних та взаємкореляційних функцій знакового та мультиплікативного типу. Це обумовлює обмежені функціональні можливості відомих цифрових кореляторів, які призначені виключно для обчислення значень кореляційних функцій, не володіють асоціативною пам'яттю і не передбачають реалізацію функцій розпізнавання образів. Крім того, в основному, структури описаних кореляторів базуються на основі опрацювання двійкових кодів ТЧБ Радемахера, що суттєво обмежує можливості спрощення їх апаратної складності та підвищення швидкодії.

Проведений аналіз кореляційних та спектральних методів розпізнавання аналогових сигналів та їх реалізація на основі відповідних спецпроцесорів дозволяє зробити наступні висновки:

1. Серед алгоритмів кореляційного опрацювання сигналів є найбільш прості, які базуються на визначенні інтегральних характеристик модульних $|x_i - y_i|$ та

квадратично-рінецевих оцінок $(x_i - y_i)^2$, які відповідають відомим оцінкам Хеммінгової віддалі між образами згідно лінійної та квадратичної Евклідової відстані.

2. Найбільш простими структурними характеризуються кореляційні спецпроцесори на основі опрацювання бінарних (знакових) характеристик сигналів $\text{sign } x_i$ та $\text{sign } y_i$, які приймають значення “0”, “+1” та “-1”, що спрощує виконання операцій множення над такими характеристиками сигналів $x(t)$ та $y(t)$ шляхом реалізації логічних операцій над символом $\text{sign } x_i$ та $\text{sign } y_i$.

3. Застосування унітарної та двійкової арифметики при реалізації обчислень та структур спецпроцесорів кореляційного розпізнавання образів суттєво зменшує їх швидкодію і таким чином обмежує можливості їх застосування у сучасних інформаційних системах, які потребують високої і часто надвисокої швидкодії обчислень при оцінці Хеммінгової віддалі між багато розрядними та багатомірними характеристиками образів.

1.6 Перспективи розвитку теоретичних засад методів розпізнавання образів

Виконай аналіз метрик розпізнавання образів у Хеммінговому просторі та їх застосування для опрацювання аналогових сигналів та характеристик об’єктів у різних галузях знань та промисловості дозволяє встановити наступні переваги [87-88]:

- 1) Серед відомих метрик найпростішою алгоритмічною складністю характеризується оцінка Евклідової відстані у лінійному просторі на основі інтегрально-модульно різницевого аналітичного виразу;
- 2) оцінка Хеммінгової відстані може бути визначена згідно аналітики однієї з наступних взаємкореляційних функцій представлених у таблиці 1.2:

Таблиця 1.2 – Оцінка Хеммінгової відстані згідно аналітики взаємкореляційних функцій

Номер	Назва	Позначення	Взаємодія характеристик об'єктів	Об'єм вибірки
1	знакова	$H_{xy}(j)$	$sign^o x \cdot sign^o y$	1024
2	релейна	$P_{xy}(j)$	$x^o \cdot sign^o y$	1024
3	коваріаційні	$K_{xy}(j)$	$x \cdot y$	512
4	кореляційна	$R_{xy}(j)$	$x^o \cdot y^o$	512
5	нормована кореляційна	$\rho_{xy}(j)$	$\frac{R_{xy}(j)}{D_x \cdot D_y}$	512
6	структурна	$C_{xy}(j)$	$(x_i - y_i)^2$	256
7	модульна	$G_{xy}(j)$	$ x_i - y_i $	256
8	еквівалентності	$F_{xy}(j)$	$\vee z = (x_i \vee y_i)$	128

Серед названих функцій взаємкореляції найбільшою швидкістю обчислень характеризується знакова, релейна та функція еквівалентності. У той же час для отримання відповідної точності обчислень об'єм вибірки для перших двох функцій у чотири рази більший по відношенню до функції еквівалентності. Перевагою знакової та релейної функції взаємкореляції є отримання центрованих та нормованих результатів в діапазоні ± 1 , а для нормування функції еквівалентності потрібно виконувати операцію ділення на математичне сподівання M_x . Серед інших взаємкореляційних функцій найпростішим алгоритмом обчислень характеризується модульна функція $G_{xy}(j)$, яка характеризується достатньо високою точністю обчислень при об'ємі вибірки $n = 256$, оскільки при зростанні зсуву j вона асимптотично наближається до значення вибіркового математичного сподівання. При цьому застосування даної функції для оцінки Хеммінгової відстані згідно лінійної Евклідової відстані виконується без відповідного нормування відносно математичних сподівань M_x та M_y , які по замовчуванню вважаються

однаковими а при цифровому кодуванні характеристик x_i та y_i у двійкових кодах базису Радемахера вважається кратним 2^k . Тобто операція нормування виконується шляхом відкидання молодших двійкових розрядів у інтегральній сумі модульних різниць.

3) на основі коефіцієнтів взаємкореляції, які відповідають значенням взаємкореляційній функції при $j = 0$, можуть бути побудовані оцінки Хеммінгової віддалі між сигналами та характерами об'єктів.

Функціональні обмеження відомих метрик визначення Хеммінгової віддалі [89]:

1. Відомі методи вузькоспеціалізовані і не характеризуються універсальністю до різних образів [89].

2. Кореляційні методи найбільш ефективні, але по визначенню ряду авторів вважаються низько швидкодіючими та апаратно складними, оскільки передбачають попередню статистичне опрацювання образів, в тому числі обчислення математичного сподівання, дисперсії та автокореляційної функції [89].

3. Відомі методи розпізнання в Хеммінговому просторі недостатньо ефективні, оскільки використовуються для образів, які описуються бінарними векторами, а також не враховують можливість застосування різних аналітичних виразів взаємкореляційних функцій та можливостей кодування даних у різних ТЧБ [89].

4. Відомі метрики, що реалізуються в базисі Радемахера не дозволяють виконувати оцінку Евклідової відстані у багатомірному Хеммінговому просторі.

5. Відсутні теоретичні засади та методи визначення Хеммінгової віддалі для одномірних об'єктів з різним числом характеристик [89].

Таким чином проведений аналіз теоретичних засад та методів розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі та перспективних архітектур реалізації пристроїв обчислення кореляційних функцій у різних ТЧБ дозволяє виконати постановку наступних науково-технічних задач, що вирішуються у дисертаційній роботі:

1. Дослідити принципи теоретичних основ та методи розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі та провести аналіз досвіду розробки спецпроцесорів для розпізнавання образів у Хеммінговому просторі.

2. Розробити метод опрацювання сигналів двовимірного Хеммінгового простору, у вузлах якого існують багатомірні об'єкти на основі кодування решітчастих даних у теоретико-числовому базисі Крестенсона.

3. Розробити метод визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами, шляхом конвеєрного формування цифрових даних сигналів у паралельних унітарних кодах та інвертованих паралельних кодів Хаара.

4. Розробити метод та систему кодування визначити оцінки Хеммінгової віддалі для дорожніх знаків.

5. Удосконалити метод визначення Хеммінгової віддалі образів з різною кількістю інформаційних параметрів.

6. Розвинути метод оцінки Хеммінгової віддалі в одновимірному та двовимірному просторі на основі лінійної та квадратичної Евклідової відстані та аналітики різних взаємкореляційних функцій.

7. Розробити принципові рішення Різницево-модульного квадратора у якості швидкодіючого компонента пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона.

8. Розробити структурні, схемотехнічні рішення, дослідити системні характеристики та реалізувати у мікроелектронному виконанні на ПЛІС пристрій додавання багаторозрядних двійкових чисел у якості компонента спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі між характеристиками образів заданих кодами теоретико-числового базису Радемахера та пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами.

Висновки до першого розділу.

1. У першому розділі виконано аналіз досвіду розробки методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі, який дозволив класифікувати та формалізувати теоретичні основи та особливості застосування метрик Мінковського, Sup-метрики, відстані Махаланобіса, відстані Хеммінга, Квадратичної Евклідової відстані та відстані Чебешева.

2. Викладені математичні основи теоретичних засад методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі. Показано що оцінка Хеммінгової відстані у вигляді модульної різниці між характеристиками образів згідно лінійної та квадратичної Евклідової віддалі характеризується найбільш простими алгоритмами обчислень і може бути ефективно застосована при розробці та створенні відповідних компонентів спецпроцесорів розпізнавання образів.

3. Дослідженні структурні рішення існуючих пристроїв кореляційного опрацювання сигналів у якості компонентів спецпроцесорів розпізнавання багатомірних образів та визначені перспективи розвитку такого класу обчислювальних засобів для опрацювання цифрових даних у комп'ютерних моніторингових системах.

4. Здійснена постановка завдань досліджень.

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ БАГАТОМІРНИХ
ОБРАЗІВ У ХЕММІНГОВОМУ ПРОСТОРИ**2.1 Теоретичні засади оцінки Хеммінгової віддалі на основі лінійної та квадратичної Евклідової відстані та аналітики різних взаємкореляційних функцій**

Відома аналітика класичних авто- та взаємкореляційних функцій, які використовуються в кореляційних методах розпізнавання образів наведена в таблиці 2.1 [44].

Таблиця 2.1 – Аналітика класичних авто- та взаємкореляційних функцій

Назва	Аналітичний вираз	Інтеграл
1	2	3
знакові	$H_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(x_i) \times \text{sign}(x_{i+j})$ $H_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(x_i) \times \text{sign}(y_{i+j})$	A. Greg E. Drew
релейні	$P_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times \text{sign}(x_{i+j})$ $P_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times \text{sign}(y_{i+j})$	Стілетса Т.
коваріаційні	$K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times x_{i+j}$ $K_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times y_{i+j}$	K. Janschek
кореляційні	$R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i \times \dot{x}_{i+j}$ $R_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i \times \dot{y}_{i+j}$	Ш. Фур'є

1	2	3
Нормованої кореляції	$\rho_{xy} = \frac{1}{n} \frac{R_{xy}(j)}{\sqrt{D_x} \cdot \sqrt{D_y}}$	К. Tahahusaki
структурні	$G_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+j})^2$ $G_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_{i+j})^2$	Кологорова А.М.
модульні	$G_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_{i+j} $ $G_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - y_{i+j} $	Тихонова А.М.
еквівалентності	$F_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \check{Z}_{xx}$ $F_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \check{Z}_{xy}$	Николайчука Я.М.

Наступні аналітика використовується при розрахунку авто- і взаємо пов'язаних між собою функцій [90]:

$$\text{- знаку: } \text{sign}(\dot{x}_i) = \begin{cases} +1, \dot{x}_i \geq 0 \\ 0, \dot{x}_i = 0 \\ -1, \dot{x}_i < 0 \end{cases} \quad \text{sign}(\dot{y}_{i+j}) = \begin{cases} +1, \dot{y}_{i+j} \geq 0 \\ 0, \dot{y}_{i+j} = 0 \\ -1, \dot{y}_{i+j} < 0 \end{cases} ;$$

$$\text{- центрування: } \dot{x}_i = x_i - M_x, \dot{y}_i = y_i - M_y ;$$

$$\text{- математичного сподівання: } M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, M_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i ;$$

$$\text{- дисперсії: } D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2, D_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - M_y)^2 ;$$

$$\text{- еквівалентності: } \check{Z}_{xy} = \begin{cases} x_i, x_i < y_{i+j} \\ y_{i+j}, x_i \geq y_{i+j} \end{cases}, \check{Z}_{xx} = \begin{cases} x_i, x_i < x_{i+j} \\ x_{i+j}, x_i \geq y_{i+j} \end{cases} .$$

Розпізнавання образів може виконуватися на основі обчислення функцій взаємкореляції між автокореляційною та базисною функцією теоретико-числового

базису Фур'є, Радемахера, Галуа та Крестенсона. Приклади ортогональних функцій названих базисів наведено на рисунок 2. 1.

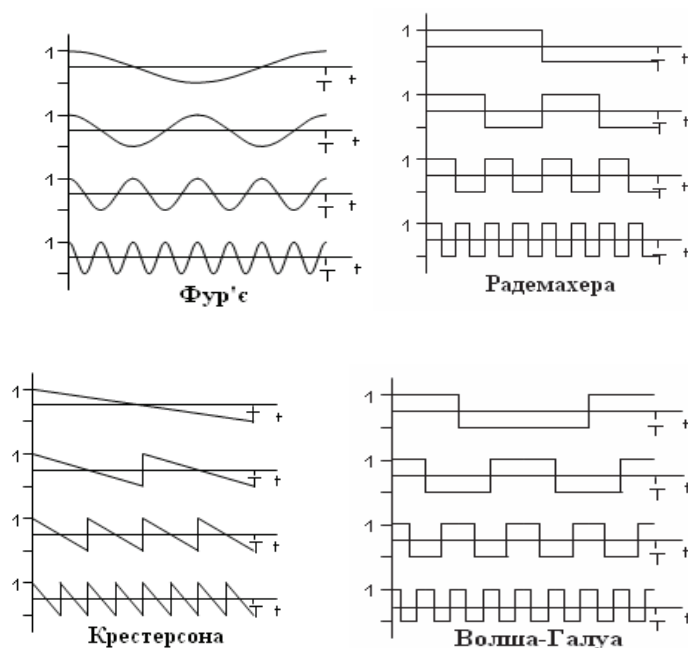


Рисунок 2.1 – Системи ортогональних функцій ТЧБ.

Аналітика виразу алгоритмів розпізнавання образів на основі спектральних функцій [44, 49] обчислених на основі різних ТЧБ викладені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Спектральний розрахунок на основі кореляції функцій

1	2	3	4
Крестенсона			
H_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(H_{xx}(j)) \times \text{sign}(cr(j))$	P_{xx}	$S(w) = \frac{P_{xx}(j)}{Dx}, cr(j)$
P_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{xx} \times \text{sign}(cr(j))$	C_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{xx}(j) - cr(j))^2$
K_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{xx}(j) \times cr(j)$	G_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{xx}(j) - cr(j) $
R_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{xx}(j) \times cr(j)$	F_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \check{Z}_{xx} \frac{F_{xx}}{M_{xx}}, cr(j)$
Радемахера			
H_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(H_{xx}(j)) \times \text{sign}(rad(j))$	P_{xx}	$S(w) = \frac{P_{xx}(j)}{Dx}, har(j)$
P_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{xx} \times \text{sign}(rad(j))$	C_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{xx}(j) - rad(j))^2$

1	2	3	4
K_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{xx}(j) \times rad(j)$	G_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{xx}(j) - rad(j) $
R_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{xx}(j) \times rad(j)$	F_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \check{Z}_{xx} \frac{F_{xx}}{M_{xx}}, rad(j)$
Хаара			
H_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n sign(H_{xx}(j)) \times sign(har(j))$	P_{xx}	$S(w) = \frac{P_{xx}(j)}{D_x}, har(j)$
P_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{xx} \times sign(har(j))$	C_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{xx}(j) - har(j))^2$
K_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{xx}(j) \times har(j)$	G_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{xx}(j) - har(j) $
R_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{xx}(j) \times har(j)$	F_{xx}	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \check{Z}_{xx} \frac{F_{xx}}{M_{xx}}, har(j)$

Вирішення науково-прикладної задачі вдосконалення методів розпізнавання образів шляхом розрахунку різних мультиплікативних, модульних, квадратичних та еквівалентних коефіцієнтів взаємкореляції між характеристиками образів дозволяє значно розширити можливості побудови алгоритмів обчислень та методів образів представлених цифровими даними з врахуванням вагових коефіцієнтів їх інформативності на основі наступних аналітичних виразів представленими в таблиці 2.2, де застосовна наступна система символів.

Для прикладу у тьохсимвольному атрибуті перший символ X – ознака цифрової оцінки Хеммінгової віддалі, а два наступні символи відповідно представляють типи кореляційних функцій відповідно: G – модульна; K – коваріаційна; C – структурна; F – еквівалентності, причому функція еквівалентності можуть бути представлені наступними ознаками характеристик образів: \hat{F}^2 – більше квадратичне еквівалентне з двох; \check{F} , \hat{F} – менше та більше еквівалентне з двох, операція еквівалентності реалізується шляхом порівняння квадратів центрованих, модулів центрованих та нецентрованих характеристик образів. Де x та e – цифрові характеристики образів, w – ваговий коефіцієнт 1-го образу, N – кількість ознак образу

Таблиця 2.3 – Алгоритми розпізнавання Хеммінга

$XGG = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_l - e_l - x_l $	$X\tilde{F}\tilde{F} = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{z}(w_l, \tilde{z}(e_l, x_l))$	$X\tilde{F}^2 C = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} (w_l - \tilde{z}^2(e_l, x_l))^2$
$XKK = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_l \cdot e_l \cdot x_l$	$XCK = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_l \cdot (e_l - x_l)^2$	$XG\tilde{F} = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{z}(w_l, e_l - x_l $
$X\hat{F}^2 C = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} (w_l - \hat{z}^2(e_l, x_l))^2$	$XK\tilde{F} = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{z}(w_l, e_l \cdot x_l)$	$XKG = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_l - e_l \cdot x_l $
$X\tilde{F}K = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_l \cdot \tilde{z}(e_l, x_l)$	$XC\tilde{F} = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{z}(w_l, (e_l - x_l)^2)$	$XCG = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_l - (e_l - x_l)^2 $
$X\hat{F}K = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_l \cdot \hat{z}(e_l, x_l)$	$X\tilde{F}G = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_l - \tilde{z}(e_l, x_l) $	$X\tilde{F}^2 K = \frac{1}{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_l \cdot \tilde{z}^2(e_l, x_l)$

Аналітичні вирази процесів та алгоритмів розпізнавання образів на основі різних взаємкореляційних функцій у двомірному Хеммінговому просторі наведені у таблиці 2.4 [44].

Таблиця 2.4 – Аналітичні вирази оцінки двомірного Хеммінгового простору

$XGG = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} w_{ij} - e_{ij} - x_{ij} $	$XG\tilde{F} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \tilde{z}(w_{ij}, e_{ij} - x_{ij})$
$XKG = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} w_{ij} - e_{ij} \cdot x_{ij} $	$XCG = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} w_{ij}, (e_{ij} - x_{ij})^2 $
$X\tilde{F}G = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} w_{ij} - \tilde{z}(e_{ij}, x_{ij}) $	$X\hat{F}G = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} w_{ij} - \hat{z}(e_{ij}, x_{ij}) $
$XKG = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} w_{ij} - e_{ij} \cdot x_{ij} $	$XCG = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (w_{ij} - e_{ij} - x_{ij})^2$
$X\hat{F}^2 G = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} w_{ij} - \hat{z}^2(e_{ij}, x_{ij}) $	

Алгоритм роботи удосконаленого методу розпізнавання образів на основі різних взаємкореляційних функцій у двомірному Хеммінговому просторі наступний:

1. Представлення образу, що розпізнається у вигляді авто та взаємкореляційних функцій.

2. Здійснення розпізнавання образів на основі обчислень функцій взаємкореляції між автокореляційною та базисною функцією в теоретико-числових базисах Фур'є, Радемахера, Галуа та Крестенсона.

3. Представлення отриманого аналітичного виразу алгоритмів розпізнавання образів у вигляді спектральних функцій обчислених на основі різних теоретико-числових базисах.

4. Проведення спектральний розрахунку на основі кореляції функцій.

5. Застосування алгоритму Хеммінга у одновимірному Хеммінговому просторі.

6. Застосування аналітичних вирази процесів та алгоритмів розпізнавання образів на основі різних взаємкореляційних функцій у двовимірному Хеммінговому просторі.

Математичні вирази розпізнавання образів у двовимірному ХП, які будуються на основі обчислень модульної різниці, не містять алгоритмічно складних операцій: множення, центрування та інші, що створює перспективу застосування цих задач для побудови високопродуктивних спецпроцесорів [91-94].

2.2 Метод опрацювання сигналів двовимірного Хеммінгового простору на основі перетворень модульної арифметики теоретико-числового базису Крестенсона

Важливою задачею є кодування багатомірних об'єктів діагностування (ОД), які представляють багатомірні вектори у вузлах двовимірної площини у вигляді моделі багатоканального ОД у Хеммінговому просторі. Синтез стандартизованої матриці формування пакетів багатомірних даних дозволяє формалізувати процеси розпізнавання образів у Хеммінговому просторі [44, 49, 97-98] (рисунок 2.2).

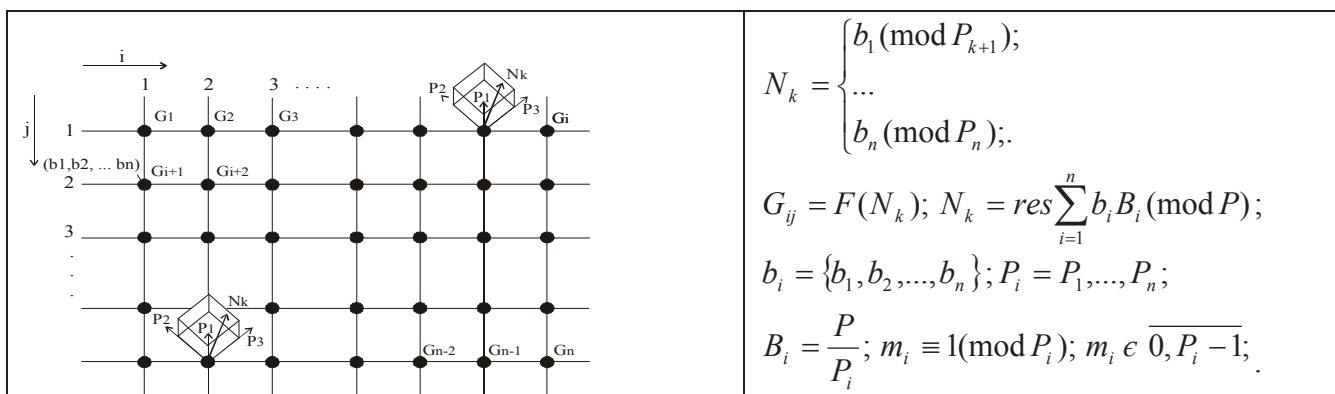


Рисунок 2.2 – Синтезована матриця двовірному ХП формування багатомірних даних на основі їх побудови у теоретико-числовому базисі Крестенсона

Заданий багатомірний вектор простору N_k має вигляд:

$$N_k = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_k\}, \quad (2.1)$$

де b_i – значення i – го параметру.

Існують різні методи перетворення багатовимірному простору в одновимірний на базі використання різних базисів чисел. При використанні базису Радемахера для такого перетворення вибирається система базисів:

$$\{a^0, a^1, a^2, \dots, a^n\} \quad (2.2)$$

де a – модуль системи числення.

При використанні двійкового числення $a_i = 2$.

Таким чином кожне значення b_i може дорівнювати “0” або “1”.

При використанні інших систем числень, наприклад $a = 8$, $a = 10$, $a = 16$ відповідно число значень b_i буде дорівнювати 8, 10, 16.

Такий спосіб кодування багатовимірному ДІ передбачає однакове число розрядів для кодування b_i , що рідко можна спостерігати на практиці.

При цьому може виникати суттєва надлишковість подання даних, якщо окремі ординати багатовимірному простору потребують

меншого числа розрядів, тобто $b_i \ll a^i$.

Один із недоліків можна виключити при кодуванні інформаційних станів в ТЧБ Крестенсона.

Виберемо таку систему простих модулів P_i , для яких будуть виконуються умови:

$$b_i \leq P_i - 1.$$

При даній умові, використавши перетворення СЗК над послідовністю (2.1), одержимо:

$$N_k = \text{res} \sum_{i=1}^n B_i \cdot b_i \pmod{\wp},$$

де $\wp = \prod_{i=1}^n P_i$, $0 \leq N_k \leq \wp - 1$,

$$B_i = \frac{\wp}{P_i} \cdot m_i \equiv 1 \pmod{P_i},$$

де m_i – задовольняють умові $0 \leq m_i \leq P_i - 1$.

Приклад Представлення тривимірного об'єкта в ТЧБ Крестенсона зображений на рисунку 2.3:

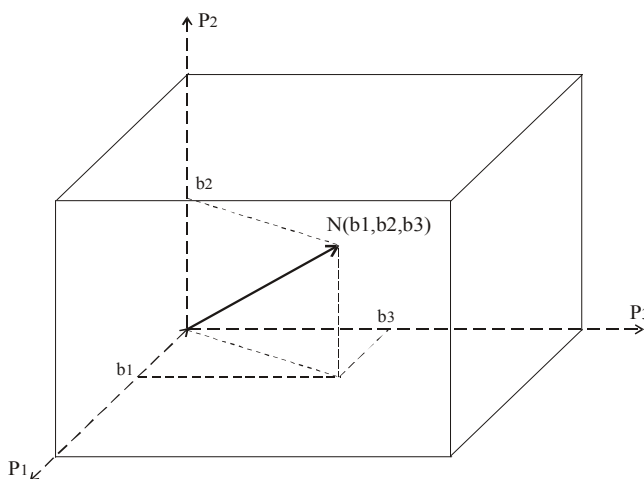


Рисунок 2.3 - Кодування тривимірного ДІ у базисі Крестенсона.

Даний метод кодування багатомірних ДІ, на відміну від декартових координат, дозволяє виключити надлишковість кодування в тривимірному просторі, яка виникає при виконанні умови (2.2).

В результаті отримуємо двовимірну площину з векторами N_{ijk} .

Ефективності кодування джерела інформації підвищується шляхом розширенням системи модулів для кодування i та j ознак;

Перетворення залишкових класів в системі модулів матиме наступний вигляд [tdi]:

$$N_{kij} = \text{res} \left(\sum_{i=1}^{k+2} b_i \cdot \beta_i \pmod{\wp^*} \right),$$

де \wp^* – розширений модуль

$$P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k, P_{k+1}, P_{k+2},$$

$$\text{де } \begin{cases} 0 < P_{k+1} \leq \alpha - 1 \\ 0 < P_{k+2} \leq \beta - 1 \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, \alpha, \quad j = 1, 2, \dots, \beta.$$

Такий метод дозволяє переходити від багатовимірного представлення параметрів об'єкту до одновимірного [15, 99].

2.3 Метод визначення Хеммінгової віддалі між характеристиками образів представлено кодами унітарного ТЧБ.

Найбільш широко застосованою на практиці оцінкою Хеммінгової віддалі є метрики бінарної різниці [100]:

$$d = \sum_{i=1}^n e_i |x_i - y_i|,$$

де x_i, y_i – кодовані атрибути масивів даних, які представляють об'єкти, що підлягають розпізнаванню згідно оцінки Хеммінгової віддалі;

e_i – ваговий коефіцієнт інформативності пари атрибутів образів що розпізнаються, $i \in \overline{1, n}$ п число пар атрибутів у вузлі Хеммінгового простору (ХП);

d_{ii} – числова оцінка Хеммінгової віддалі представлена у кодах відповідного ТЧБ [44-101].

У виключній більшості реалізацій кодування даних та обчислення Хеммінгової віддалі d_{ii} виконується на універсальних процесорах у двійковій системі числення ТЧБ Радемахера [101].

При невеликій розрядності бінарних кодів x_i та y_i виконання операції $|x_i - y_i|$ в унітарному ТЧБ реалізуються на основі операцій модульного додавання згідно структури виразів:

$$\begin{array}{cccccc}
 x_i & a_{n-1} & a_{n-2} & \dots\dots\dots & a_1 & a_0 \\
 & \oplus & \oplus & \dots\dots\dots & \oplus & \oplus \\
 y_i & b_{n-1} & b_{n-2} & \dots\dots\dots & b_1 & b_0 & ; \quad a_i \oplus b_i = c_i
 \end{array}$$

$$c_{n-1} \quad c_{n-2} \quad \dots\dots\dots \quad c_1 \quad c_0 = \sum_{i=0}^{n-1} (a_i \oplus b_i)$$

При реалізації оцінки Хеммінгової віддалі незалежно від застосованого коду ТЧБ необхідне виконання наступних функцій [22,101]:

1. Логічне порівняння атрибутів кодових представлень x_i та y_i ;
2. Визначення суми, числа співпадань значень атрибутів x_i та y_i ;
3. Шифрування коду отриманої суми у відповідному ТЧБ.

Функціональна структура спецпроцесора, який реалізує процедуру визначення Хеммінгової віддалі згідно структури виразів наведених вище представлена на рисунок 2.4.

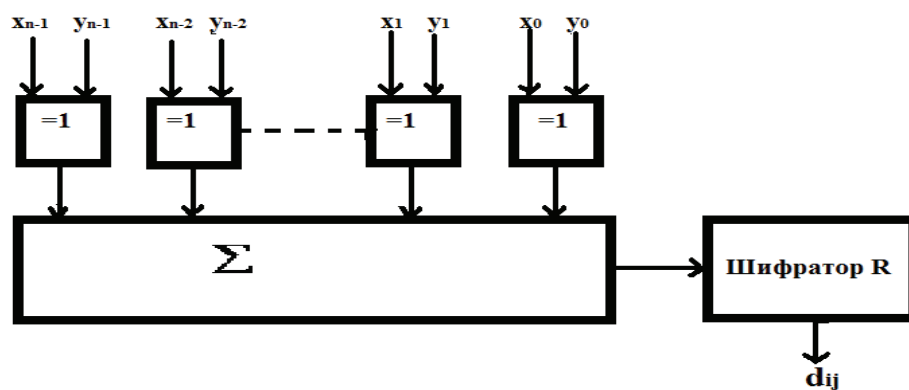


Рисунок 2.4 – Функціональна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі в унітарному теоретико-числовому базисі

Компонентами такого спецпроцесора є елементи “Виключаюче АБО”[49], суматор Σ , який перетворює унітарний число-імпульсний код у код Хаара ($U \rightarrow H$) та шифратор, який перетворює код Хаара у двійковий код Радемахера ($H \rightarrow R$) [101].

В залежності від застосовуваної структури логічного елемента “Виключаюче АБО” затримка сигналів може складати від 1 до 3 мікротактів, а апаратна складність від 2 до 5 логічних елементів, що відповідно впливає на швидкодію спецпроцесора оцінки Хеммінгової віддалі [102].

Оцінка часової складності суматора, який виконує міжбазисне перетворення $(U \rightarrow H)$ при заданому n рівна її розрядності U -коду $\tau_{\xi} = nv$, а апаратна складність $A_{\xi} = 3nV$ [103]. Часова складність шифратора, який перетворює коди Хаара у двійковий код (тобто виконує перетворення $H \rightarrow R$) на багатоходових логічних елементах І-НЕ $\tau_{\omega} = 1v$, а апаратна складність $A_{\omega} = \log_2 nV$.

Реалізація спецпроцесора оцінки Хеммінгової віддалі на основі представлення вхідних атрибутів x_i та y_i в унітарному ТЧБ, застосування однофазних логічних елементів “Виключаюче АБО”, суматора $(U \rightarrow H)$ та шифратора $(H \rightarrow R)$ характеризується наступною часовою та апаратною складністю згідно виразів: $A_{HV} = A_{=1} + A_{\xi} + A_{\omega}$, $\tau_{HV} = \tau_{=1} + \tau_{\xi} + \tau_{\omega}$, де A_{HV}, τ_{HV} – відповідно апаратна та часова складність спец процесора, $A_{=1}, \tau_{=1}$ – відповідно апаратна та часова складність логічного елемента “Виключаюче АБО”, A_{ξ}, τ_{ξ} – відповідно апаратна та часова складність суматора, $A_{\omega}, \tau_{\omega}$ – відповідно апаратна та часова складність шифратора.

Дані характеристики спецпроцесора Хеммінгової віддалі залежні від розрядності вхідних атрибутів n представленні в таблиці 2.5 і таблиці 2.6, а їх відповідні графіки на рисунках 2.5, 2.6 відповідно.

Таблиця 2.5 – Апаратна складність реалізації спецпроцесора Хеммінгової віддалі

n	8	16	32	64	128	256	512
$A_{=1}$	16÷40	32÷80	64÷160	128÷320	256÷640	512÷1280	1024÷2560
A_{ξ}	24	48	96	192	384	768	1536
A_{ω}	3	4	5	6	7	8	9
A_{HV}	43÷67	84÷132	165÷261	326÷518	647÷931	1288÷2056	2569÷4105

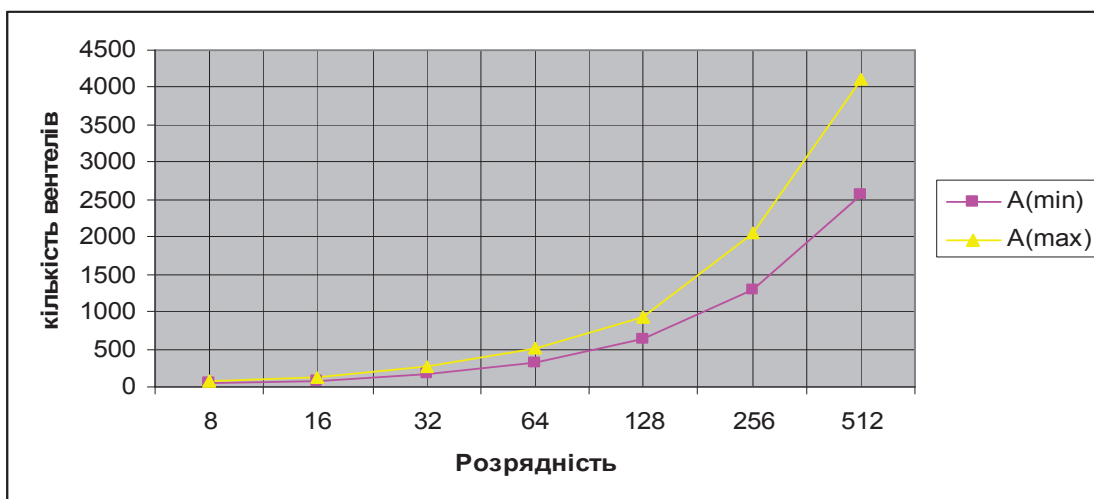


Рисунок 2.5 – Апаратна характеристики спецпроцесора Хеммінгової віддалі залежні від розрядності вхідних атрибутів n .

Таблиця 2.6 – Часова складність реалізації спецпроцесора Хеммінгової віддалі

n	8	16	32	64	128	256	512
$\tau_{=1}$	$8 \div 24$	$16 \div 48$	$32 \div 96$	$64 \div 192$	$128 \div 384$	$256 \div 768$	$512 \div 1536$
τ_{ξ}	8	16	32	64	128	256	512
τ_u	1	1	1	1	1	1	1
τ_{HV}	$17 \div 33$	$33 \div 65$	$65 \div 129$	$129 \div 257$	$257 \div 513$	$513 \div 1025$	$1025 \div 2049$

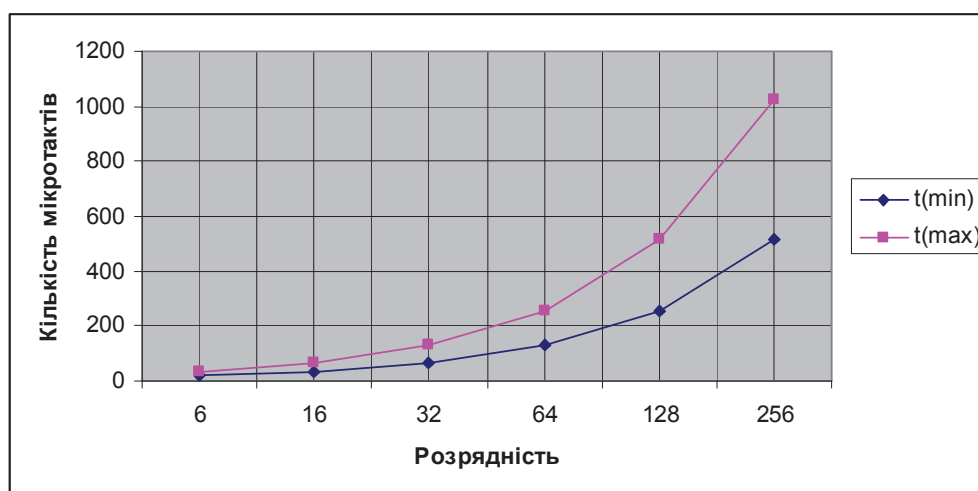


Рисунок 2.6 – Часова характеристики спецпроцесора Хеммінгової віддалі залежні від розрядності вхідних атрибутів n .

Результати чисельного експерименту показують, що розроблений метод визначення Хеммінгової віддалі між характеристиками образів представленого кодами унітарного ТЧБ, характеризується найбільш простими алгоритмами оцінки Хеммінгової віддалі на основі визначення суми результатів логічних операцій “Виключаюче АБО” над бітовими послідовностями унітарних кодів.

2.4 Метод визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами

Даний метод оцінки Хеммінгової віддалі між сигналами призначений для опрацювання нецентрованих цифрових кодів сигналів, рівномірно дискретизованих у часі та квантованих по амплітуді з однаковим математичним сподіванням, які належать до класу стаціонарних випадкових сигналів [104-116].

Формалізація даного методу описується наступною послідовністю функціоналів.

$$F_{SH} = \begin{cases} F_1[S_1] = F_3[U] \\ F_2[S_2] = F_4[U] \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F_5 = F_3[U] \vee F_4[U] \Rightarrow F_7[H_7] \Rightarrow F_9(R_9) \\ F_6 = F_3[U] \wedge F_4[U] \Rightarrow F_8[H_8] \Rightarrow F_{10}(R_{10}) \end{cases} \Rightarrow \\ \Rightarrow F_{11}[F_9[R_9] + F_{10}[R_{10}] + 1] \Rightarrow F_{12}[F_{11} + F_{12}]$$

де F_{SH} – інтегральна оцінка Хеммінгової віддалі між сигналами згідно квадратичної

Евклідової відстані $F_{SH} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$, $0 \leq x_i \leq 2^n$, $0 \leq y_i \leq 2^n$, $M_x = M_y$;

F_1, F_2 – відповідні аналогові сигнали: $x(t) = S_1, y(t) = S_2$;

F_3, F_4 – формування відповідних паралельних унітарних кодів (U– кодів);

F_5, F_6 – логічне опрацювання паралельних унітарних кодів вхідних аналогових сигналів та визначення більшого з них реалізацією логічної операції “АБО” та меншого з них реалізацією логічною операцією “Г”;

F_7, F_8 – формування відповідних сигналам S_1 та S_2 паралельних інверсних кодів ТЧБ Хаара;

F_9, F_{10} – перетворення коду Хаара більшого з двох у прямий двійковий код ТЧБ Радемахера, а меншого з двох кодів Хаара в інверсний двійковий код базису Радемахера;

2.5 Метод визначення Хеммінгової віддалі образів з різною кількістю параметрів.

У випадку коли об'єкт має однакову кількість параметрів за допомогою теорії знаходження Хеммінгової віддалі та кодування структурних ознак об'єкта можна однозначно і швидко ідентифікувати зображення. Однак при розпізнаванні об'єктів із різною кількістю параметрів (наприклад різних категорій знаків для кодування яких використовується різна кількість параметрів) виникає проблема знаходження розширеної оцінки Хеммінгової віддалі. Для вирішення такої задачі необхідно вдосконалити стандартні формули визначення Хеммінгової віддалі. Здійснимо модифікацію існуючих формул для знаходження Хеммінгової віддалі для об'єктів з однаковою кількістю параметрів під розпізнавання об'єктів з різною кількістю параметрів [128-130]. Виконаємо розв'язок наступної задачі:

Нехай потрібно оцінити значення Хеммінгової віддалі між двома образами X та Y коли число елементів чи ознак є різними, тобто задані масиви даних $\{x_i\}$, $i \in \overline{1, n}$ та $\{y_j\}$, $j \in \overline{1, m}$, причому у загальному випадку $n \neq m$.

Для вказаних масивів даних необхідно визначити оцінку сумарної різниці між площами двох двовимірних фігур: наприклад квадрата – $x_i \Rightarrow \square$, та кола – $y_j \Rightarrow \bigcirc$ причому виконуються наступні умови: $0 \leq y_i = \text{var} \leq 100$ а $x_j = \text{const} = 100$.

Розглянемо запропонований приклад, який наочно демонструє можливу реалізацію умов цієї задачі (рисунок 2.7).

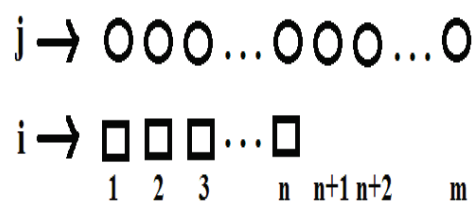


Рисунок 2.7 – Зміна кількості параметрів для запропонованих об'єктів.

Модифікуємо спочатку загальну формулу для знаходження Хеммінгової віддалі під умови поставленої задачі. У такому випадку Хеммінгова оцінка сумарної різниці площ фігур x_i та y_j буде мати наступне значення:

$$d = \sum_{j,i=1}^n |x_i - y_j| + \sum_{j=n+1}^m |0 - y_j| \quad (2.11)$$

Як видно з формули (2.11), для знаходження Хеммінгової віддалі між такими класами об'єктів потрібно виконати ряд кроків. Спочатку розбиваємо всю множину значень на дві незалежні множини. В першу множину ввійдуть всі значення об'єкта, що має меншу кількість параметрів, а також частина значень параметрів другого об'єкта, яка рівна кількості параметрів першого об'єкта. В другу множину ввійде решта параметрів об'єкта з більшим числом об'єктів. Для першої множини знаходимо значення Хеммінгової віддалі, як для стандартних об'єктів з однаковою кількістю параметрів. Для другої множини обчислюємо Хеммінгову віддаль замінивши значення одного з параметрів на "0". Тоді знаходимо загальну Хеммінгову віддаль отримані значення для першої та другої множини.

Враховуючи попередній алгоритм згідно виразу (2.11), формула для оцінки сумарної площі фігур x_i та y_j буде рівна:

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^n (S_{x_i} + S_{y_i}) + \sum_{j=n+1}^m S_{y_j} .$$

В окремому випадку при однаковій кількості елементів – $n=m$ з однаковими значеннями площ – $x_i = y_j$, ми отримаємо модифіковану формулу для знаходження Хеммінгової віддалі:

$$d_{ij} = (2n + m - n) \cdot z_{ij}^v = 2n z_{ij}^v ,$$

де z_{ij}^v – менше з двох.

Можна запропонувати формулу, для оцінки відношення сумарних площ фігур x_i та y_j , які також наближені при сумарних оцінках до Хеммінгової віддалі:

$$V = \sum_{i=1}^n S_{x_i} / \sum_{j=m-n}^m S_{y_j} .$$

Покажемо аналіз формули, для знаходження оцінки Хеммінгової віддалі, для об'єктів з різною кількістю параметрів на наступному графіку.

Позначимо $|x_i - y_j| = \Delta_{ij}$ для виразу (2.11) отримаємо графіки залежності d від співвідношення значень i та $j = \text{const} = m_0$ (рисунок 2.8).

Таблиця 2.8 – Оцінки Хеммінгової віддалі для об'єктів з різною кількістю параметрів

d_{ij}	n
1	2
$0,1 + 9 * 0,9 = 8,2$	1
$0,2 + 8 * 0,9 = 7,4$	2
$0,3 + 7 * 0,9 = 6,6$	3
$0,4 + 6 * 0,9 = 5,8$	4
$0,5 + 5 * 0,9 = 5,0$	5
$0,6 + 4 * 0,9 = 4,2$	6
$0,7 + 3 * 0,9 = 3,4$	7
$0,8 + 2 * 0,9 = 2,6$	8
$0,9 + 1 * 0,9 = 1,8$	9
$0,5 + 9 * 0,5 = 5,0$	1
$1,0 + 8 * 0,5 = 5,0$	2
$1,5 + 7 * 0,5 = 5,0$	3
$2,0 + 6 * 0,5 = 5,0$	4
$2,5 + 5 * 0,5 = 5,0$	5
$3,0 + 4 * 0,5 = 5,0$	6
$3,5 + 3 * 0,5 = 5,0$	7
$4,0 + 2 * 0,5 = 5,0$	8
$4,5 + 1 * 0,5 = 5,0$	9

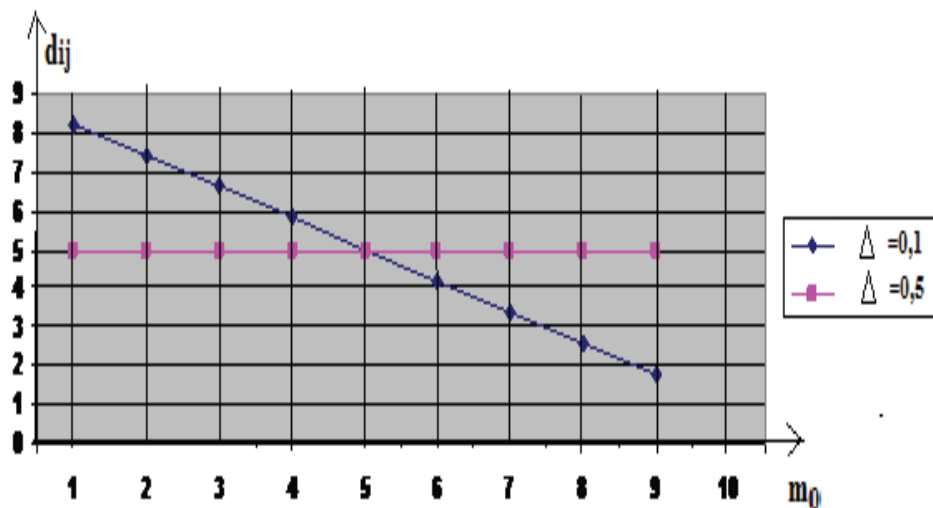


Рисунок 2.9 Графік зміни d_{ij} у залежності від n та Δ_{ij}

Удосконалений метод дозволив розширити функціональні можливості відповідних спецпроцесорів та сферу застосувань у прикладних задачах розпізнавання образів

Висновки до другого розділу

1. Розроблений метод та теоретичні засади оцінки Хеммінгової віддалі на основі лінійної та квадратичної Евклідової відстані та аналітики різних взаємкореляційних функцій, що дозволило сформулювати вимоги до алгоритмів та функціональних структур спецпроцесорів розпізнавання образів в одномірному та двомірному Хеммінгових просторах.

2. Розроблено метод опрацювання сигналів двовимірного Хеммінгового простору на основі перетворень модульної арифметики теоретико-числового базису Крестенсона, який дозволив упростити процеси розпізнавання образів шляхом переведення характеристик багатомірних образів в одномірний простір.

3. Розроблено метод визначення Хеммінгової віддалі між характеристиками образів представлено кодами унітарного ТЧБ, який характеризується найбільш простими алгоритмами оцінки Хеммінгової віддалі на основі визначення суми результатів логічних операцій “Виключаюче АБО” над бітовими послідовностями унітарних кодів.

4. Розроблено метод визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами, в якому здійснюється конвеєрне перетворення сигналів у паралельні унітарні коди, коди Хаара, коди Радемахера та накопичення модульних різниць у багаторозрядному двійковому суматорі базису Радемахера, що дозволило підвищити швидкодію процесорів визначення Хеммінгової віддалі у 2^n разів у порівнянні з представленням характеристик образів унітарними кодами.

5. Удосконалено метод визначення Хеммінгової віддалі образів з різною кількістю параметрів, що дозволило розширити функціональні можливості відповідних спецпроцесорів та сферу застосувань у прикладних задачах розпізнавання образів.

РОЗДІЛ 3

РОЗШИРЕННЯ ПОНЯТТЯ ХЕММІНГОВОЇ ВІДАЛІ ТА АНАЛІТИКА ОЦІНКИ
ХЕММІНГОВОЇ ВІДАЛІ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНИХ ВИРАЗІВ
ВЗАЄМОКОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ

3.1 Метод оцінки Хеммінгової віддалі між образами на основі оцінки характеристик структурної складності та інформативності

Теорія розпізнавання образів широко використовується у різних галузях знань, інформаційних та комп'ютерних системах, що застосовуються в біології, медицині, астрономії, навігації і т.д. [89].

Вирішення таких задач успішно досягається за допомогою розробки програмно-апаратних засобів оцінки розширеної Хеммінгової віддалі. Незважаючи на успіх застосування теорії Хеммінгового простору у різних галузях науки та техніки актуальною задачею є розробка критеріїв структурної складності певних класів образів та розробка методів визначення Хеммінгової віддалі на основі різницевої віддалі модульних одиниць структурної складності образів. Такий підхід дозволяє зменшити об'єм обчислень визначення Хеммінгової віддалі між окремими компонентами образів з різною оцінкою структурної складності образів [89, 131-133].

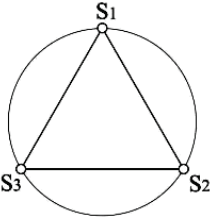
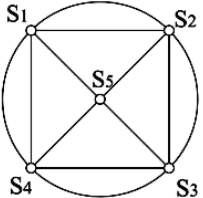
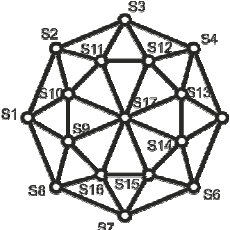
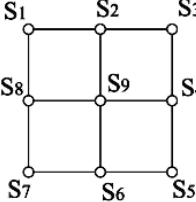
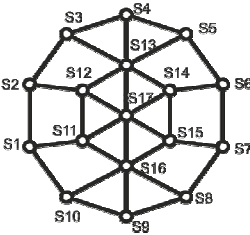
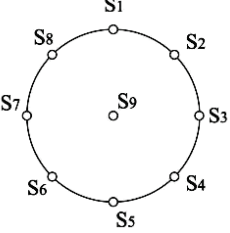
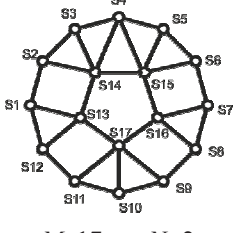
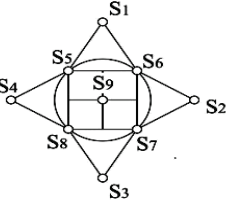
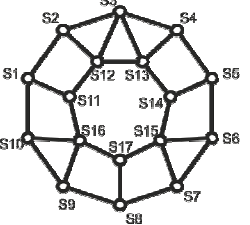
Розширена Хеммінгова віддаль може застосовуватися в різноманітних галузях знань, до яких відносять наступні теорії: сигналів, інформації, випадкових процесів, кодування моделей джерел інформації та руху даних, графічних образів, а також аудіо і відео зображень та схемотехніки [89].

Аналогічні задачі розрахунку розширеної оцінки Хеммінгової віддалі існують в джерелах інформації, які реалізуються двохвимірними масивами даних 2D, трьохвимірними масивами даних 3D, які представляють розв'язки томографії, голограм, кристалічних решіток та інше [89].

Відома загальна формула верхньої кодової віддалі між двомірними сигналами, яка має вигляд: $d_{ij} = \frac{\alpha \sqrt{\log_2 M}}{\sum E_i}$, де M – число сигналів, E – енергія кожного сигналу, d лінійна кодова віддаль у сигнальному просторі [89].

Прикладом оптимальних сигнальних просторів для сукупностей сигналів $M = 2^k$ та $M = 2^k + 1$ наведені у таблиці 3.1 [134-136].

Таблиця 3.1 – Характеристики ансамблів з числом $M=3,5,9,17$

Двомірні простори з числом сигналів $M=3,5,9$	d_{\min} d_{\max} d_c	$E_{1,2,\dots}$ E_m E_c	α_c ν_c	Двомірні простори з числом сигналів $M=17$	d_{\min} d_{\max} d_c	$E_{1,2,\dots}$ E_m E_c	α_c ν_c
I $M=3$ 	1,732	$E_{1,2,3} = 1,0$ $E_c = 1,0$ $E_m = 1,0$	0,662 0,5		0,434 2,0 1,217	$E_{1-8} = 1,0$ $E_{9-16} = 0,565$ $E_{17} = 0$ $E_c = 0,737$ $E_m = 1,0$	0,719 3,087
II $M=5$ 	1,0 2,0 1,365	$E_{1-4} = 1,0$ $E_5 = 0$ $E_c = 0,8$ $E_m = 1,0$	0,64 2 1,332	 $M=17$ $N=2$	0,482 2,0 1,241	$E_{1-8} = 1,0$ $E_{9-16} = 0,63$ $E_{17} = 0$ $E_c = 0,767$ $E_m = 1,0$	0,716 3,087
III $M=9$ 	0,707	$E_{1,3} = 0,707$ $E_{5,7} = 0,707$ $E_{2,4,6,8} = 1,0$ $E_9 = 0$ $E_c = 0,751$ $E_m = 1,0$	0,591 2,127	 $M=17$ $N=2$	0,5 2,0 1,25	$E_{1-10} = 1,0$ $E_{11-16} = 0,5$ $E_{17} = 0$ $E_c = 0,765$ $E_m = 1,0$	0,723 3,087
IV $M=9$ 	0,75 2,0 1,164	$E_{1-8} = 1,0$ $E_9 = 0$ $E_c = 0,882$ $E_m = 1,0$	0,58 2,127	 $M=17$ $N=2$	0,518 2,0 1,259	$E_{1-12} = 1,0$ $E_{13-17} = 0,46$ $E_c = 0,841$ $E_m = 1,0$	0,694 3,087
V $M=9$ 	0,53 2,0 0,996	$E_{1-4} = 1,0$ $E_{5-8} = 0,53$ $E_9 = 0$ $E_c = 0,63$ $E_m = 1,0$	0,465 2,0	 $M=17$ $N=2$	0,465 2,0 1,233	$E_{1-10} = 1,0$ $E_{11-17} = 0,536$ $E_c = 0,809$ $E_m = 1,0$	0,693 3,087

Відомий метод оцінки структурної складності схем комп'ютерної мікроелектроніки на основі ентропійного підходу, запропонований професором М.В.Черкаським [137-138].

Суть цього методу полягає у тому, що на основі досліджуваної структури будується матриця суміжності і обчислюється коефіцієнт структурної складності згідно виразу [89]:

$$S = -C \log_2 \frac{C}{r(r-1)},$$




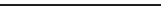



де C - кількість елементів матриці ідентичності системи,

r – розмір матриці.














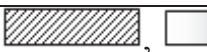

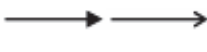

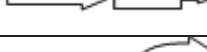

Недоліком такого критерію оцінки структурної складності є невизначеність розрахунків при аналізі регулярних та однорідних структур, коли виконується $\log_2 1$ [89].

Вирішення задачі оцінки структурної складності поліфункціональних даних (ПФД) на основі вагових коефіцієнтів оцінок інформативності викладено у роботах [139,140], де проблема оцінки коефіцієнта структуризованості відображуваних ПФД вирішена наступним чином. Експериментальним способом визначено коефіцієнт складності компонентів атрибутів поліфункціональних даних - α_i та присвоєно вагові коефіцієнти оцінок інформативності їх параметрів P_i (таблиця 3.2) [89]:

Таблиця 3.2 – Вагові коефіцієнти оцінок інформативності

№ п/п	Тип позначення елемента	Зміст елемента	Символи	α_i
1	2	3	4	5
1	l	Лінія		1
				1,5
				1,1
				1,1
				1,2
				1,2
				1,7

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5
2	<i>P</i>	Поворот		2
				2,2
				2,2
3	<i>x</i>	Пересічення		3
				3,1
4	<i>d</i>	Дотик		2
				2,2
5	<i>r</i>	Розгалуження		4
				4,2
				6,2
6	<i>h</i>	Спосіб заливки	 ,  , 	2
7	<i>z</i>	Направлений зв'язок		2
				3
				2,4
				2,5
				3,4
				3,5
8	<i>b</i>	Літера	<p><i>Aa...Яя, ..., Aa...Яя,</i> <i>Aa...Яя, ..., Aa...Яя,</i> <i>Aa...Яя, ..., Aa...Яя,</i> <i>Aa...Яя, ..., Aa...Яя,</i> <i>Aa...Яя, ..., Aa...Яя</i></p> <p>.....</p> <p><i>Aa...Zz, ..., Aa...Zz</i> <i>Aa...Zz, ..., Aa...Zz</i> <i>Aa...Zz, ..., Aa...Zz</i> <i>Aa...Zz, ..., Aa...Zz</i></p>	8-10

c	Цифра	1, 2, ... 0, ... 1, 2, ... 0	4
i	Індекс	1, 2, ... 0, a, A, , 1, 2, ... 0, a, A	4
s	Символ	©, ®, π, ψ, ω, &, %, @, §, Θ, №, ∑, ∫, ∞, ☺, ☼, ♪, ...	4
n	Знак	+, -, <, >, =, ±, ≡, ≈, ≠, ≤, ≥, (, “, {, !, ?, :, ;, ...	2

Враховуючи вказані показники, отримуємо коефіцієнт структурної складності

$$k_c = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i .$$

Враховуючи також функціонально-інформативну характеристику ПФД f_i та їх

суму $\sum_{j=1}^m f_j$ отримаємо кількісну, оптимальну оцінку функціонально-структурної

складності представлення компонентів складної системи у вигляді відношення [89, 141, 142]:

$$k_e = K \cdot \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i \Rightarrow \max ,$$

$$k_e = K \cdot \sum_{j=1}^m f_j \Rightarrow \max ; \quad (3.1)$$

K - ідентифікатор рівня ПФД ($K = n, \dots$ – відповідно для n -рівневих зображень).

При цьому рівень структуризації ПФД підвищується при максимізації відношення (3.1) [89, 143, 144].

3.2 Метод оцінки розширеної Хеммінгової віддалі для просторових об'єктів.

Розглянемо реалізацію методу розпізнавання образів на основі оцінки структурної складності (СС) на прикладі символіки гральних карт.

При розрахунку Хеммінгової оцінки СС для гральних карт базуємося на наступній симетрії числа однотипних елементів, які кодуються двійковими логічними ознаками (рисунок 3.1) [145, 146].

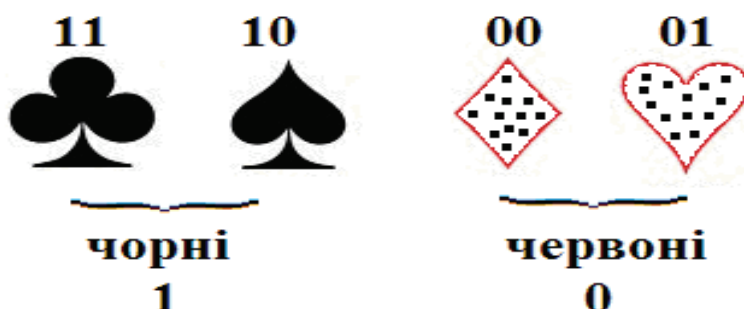


Рисунок 3.1 – Символічні базові зображення атрибутів гральних карт та їх двійкові коди.

На рисунку 3.2 запропонований спосіб кодування символіки гральних карт на основі яких можна показати Хеммінгову відстань між ними.

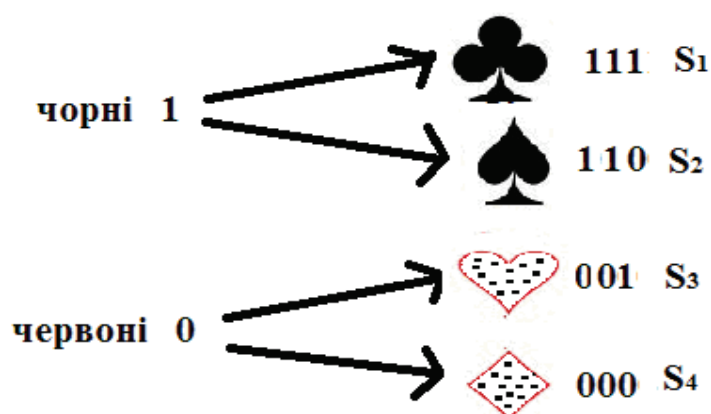


Рисунок 3.2 Система кодування символіки гральних карт.

Окрім кольору (k) фігури і типу фігури необхідно також закодувати кількість ввігнутих (vv) та випуклих (vp) елементів, які є компонентами досліджуваних символів тобто:

$$\heartsuit \Rightarrow 2vv + 2vp; \spadesuit \Rightarrow 4vv; \clubsuit \Rightarrow 3vv + 3vp; \spadesuit \Rightarrow 5vv + 2vp.$$

Формула для знаходження Хеммінгової віддалі для такого кодування матиме наступний вигляд: $H_{d_{ij}} = H_k + H_{vv} + H_{vp}$, $H_k = |k_1 - k_2|$, $H_{vv} = |vv_1 - vv_2|$, $H_{vp} = |vp_1 - vp_2|$.

З врахуванням кодування наведеного на рисунках 3.3, 3.4 розрахуємо Хеммінгову віддаль між незалежними парами символів (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Перший метод знаходження Хеммінгової віддалі.

№	Пара символів	H_k	H_{vv}	H_{vp}	$H_{d_{ij}}$
1	♥-♦	0-0	2-4	2-0	4
2	♥-♣	0-1	2-3	2-3	3
3	♥-♠	0-1	2-5	2-2	4
4	♦-♣	0-1	4-3	0-3	5
5	♦-♠	0-1	4-5	0-2	4
6	♣-♠	1-1	3-5	3-2	3

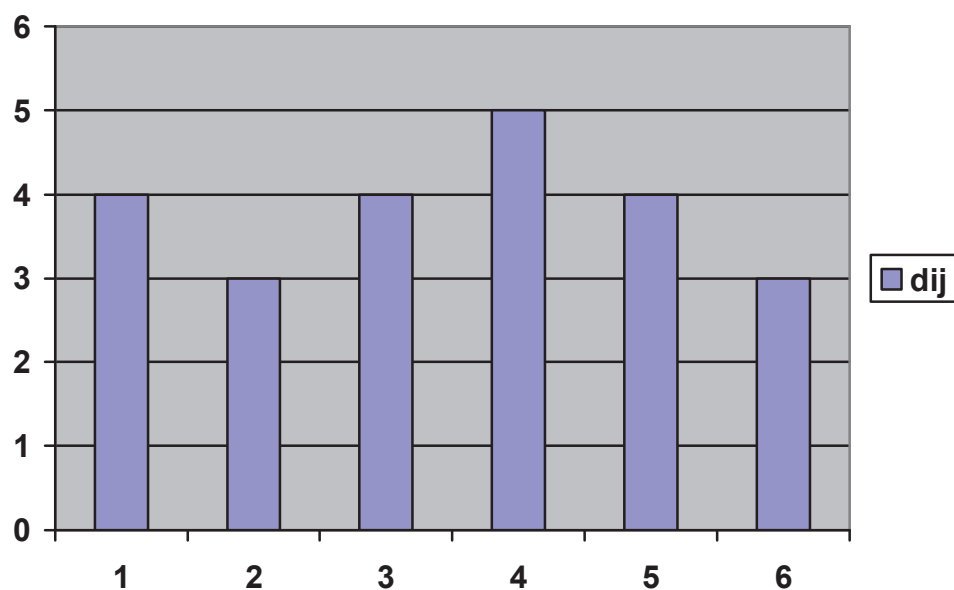


Рисунок 3.3 – Порівняльна діаграма оцінок Хеммінгової віддалі для пар символів наведених в таблиця 3.3.

Таке кодування досить часто буде давати однакову Хеммінгову віддаль. Щоб уникнути цього потрібно враховувати асиметрію і симетрію фігур. Якщо врахувати кількість елементів якими будуть відрізнятися вказані фігури отримаємо наступні оцінки Хеммінгової віддалі, які наведені у таблиця 3.4.

Таблиця 3.4 – Другий метод визначення Хеммінгової віддалі.

№	Пара символів	H_k	H_{vv}	H_{vp}	H_{as}	$H_{d_{ij}}$
1	♥-♦	0-0	2-4	2-0	4	8
2	♥-♣	0-1	2-3	2-3	10	13
3	♥-♠	0-1	2-5	2-2	11	15
4	♦-♣	0-1	4-3	0-3	6	11
5	♦-♠	0-1	4-5	0-2	5	9
6	♣-♠	1-1	3-5	3-2	7	10

Така оцінка розраховується за наступними формулами:

$$H_{d_{ij}} = H_k + H_{vv} + H_{vp} + H_{as}, \quad H_k = |k_1 - k_2|, \quad H_{vv} = |vv_1 - vv_2|, \quad H_{vp} = |vp_1 - vp_2|.$$

$$H_{as} = vv_1 + vv_2 + vp_1 + vp_2 - sp,$$

де sp – спільні елементи пар символів.

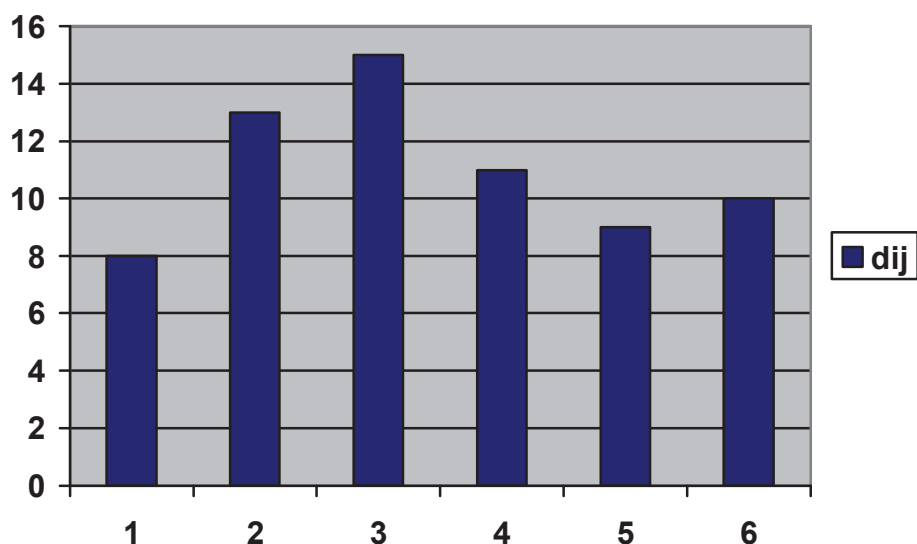


Рисунок 3.4 -Порівняльна діаграма оцінок Хеммінгової віддалі для пар символів наведених в таблиці 3.4.

Більш точнішу Хеммінгову віддаль отримаємо між цими 4-ма класами зображень маючи компоненти та два кольори \square червоний і \blacksquare чорний а також закодувавши ввігнуті та опуклі елементи вказаних фігур. Закодуємо логічними символами: 1 – чорний колір (к); 0 – червоний; наявність елементів ввігнутих вниз (vv-) символом 1 їх відсутність символом 0; наявність ввігнутих вгору (vv+) відповідно – 1, а їх відсутність відповідно – 0; відсутність випуклих елементів – 00, випуклі елементи (vp) вниз – 01, випуклі вгору – 10 і випуклі вбік – 11. Для

вказаного способу кодування елементів фігур отримаємо наступне кодування наведене в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Кодування символіки гральних карт

Символ	vp	vv+	vv-	k
♥	01	1	0	0
♦	00	1	1	0
♣	11	0	1	1
♠	10	0	1	1

Згідно вказаних атрибутів отримаємо наступні оцінки Хеммінгової віддалі, які наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Третій метод визначення Хеммінгової віддалі.

№	Пара символів	H_{vp}	H_{vv+}	H_{vv-}	H_k	$H_{d_{ij}}(2)$	$H_{d_{ij}}(10)$
1	♥-♦	01-00	1-1	0-1	0-0	01010	10
2	♥-♣	01-11	1-0	0-1	0-1	10111	23
3	♥-♠	01-10	1-0	0-1	0-1	11111	31
4	♦-♣	00-11	1-0	1-1	0-1	11101	29
5	♦-♠	00-10	1-0	1-1	0-1	10101	21
6	♣-♠	11-10	0-0	1-1	1-1	01000	8

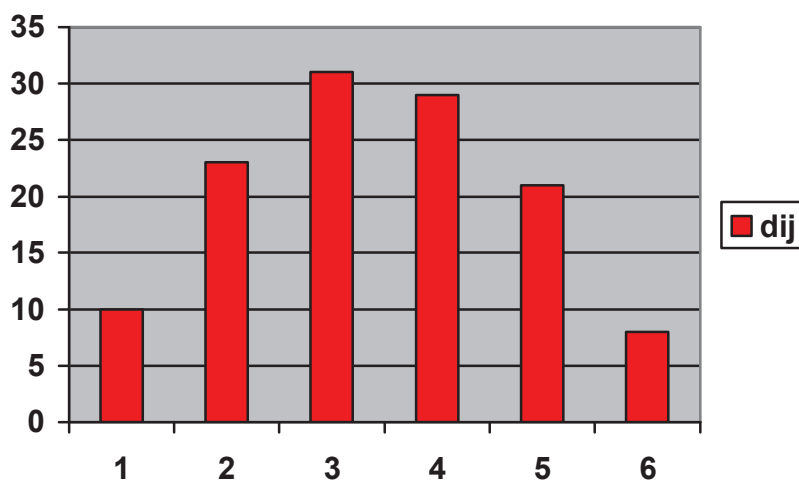


Рисунок 3.5 – Порівняльна діаграма оцінки Хеммінгової віддалі для пар символів наведених в таблиці 3.6.

З діаграми видно, що мінімальна Хеммінгова віддаль буде між ♣ і ♠, а максимальна – ♥ і ♠.

Доцільно використати більш просте кодування для вказаних фігур при якому не буде враховуватися колір а тільки кількість ввігнутих і випуклих елементів. Позначмо через 00 – 2_{vv}, 01 – 3_{vv}, 10 – 4_{vv}, 11 – 5_{vv}, 00 – 0_{vp}, 01 – 2_{vp}, 11 – 3_{vp}; Тоді коди елементів будуть наступними: ♥ 0 0 0 1; ♦ 1 0 0 0; ♣ 0 1 1 1; ♠ 1 1 0 1. Згідно вказаних атрибутів отримаємо наступну Хеммінгову віддаль наведену в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Четвертий метод визначення Хеммінгової віддалі.

№	Пара символів	H_{vv}	H_{vp}	$H_{d_{ij}}(2)$	$H_{d_{ij}}(10)$
1	♥-♦	00-10	01-00	1001	9
2	♥-♣	00-01	01-11	0110	6
3	♥-♠	00-11	01-01	1100	12
4	♦-♣	10-01	00-11	1111	15
5	♦-♠	10-11	00-01	0101	5
6	♣-♠	01-11	11-01	1010	10

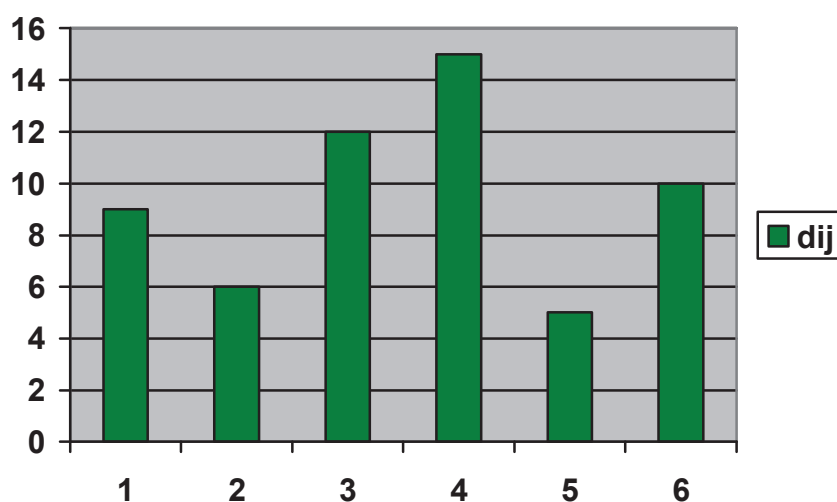


Рисунок 3.6 – Порівняльна діаграма оцінки Хеммінгової віддалі для пар символів наведених в таблиці 3.7.

З діаграми видно, що мінімальна Хеммінгова віддаль буде між ♦ і ♠, а максимальна – ♦ і ♣.

Використання 2 кольорів і 2 компонент при різних положеннях з врахуванням їх кількості, симетрії, асиметрії, число різних компонент структури складності по

числу компонент в загальному надає набір ознак, за допомогою яких можна однозначно закодувати фігури, при порівнянні яких отримаємо різну Хеммінгову віддаль для однозначного розпізнавання.

На рисунку 3.7 показана порівняльна діаграма запропонованих способів кодування атрибутів зображень символів гральних карт з якої видно, що перший спосіб простий в кодуванні, однак він досить часто дає однакову Хеммінгову віддаль, що може призвести до помилкового розпізнавання образу.

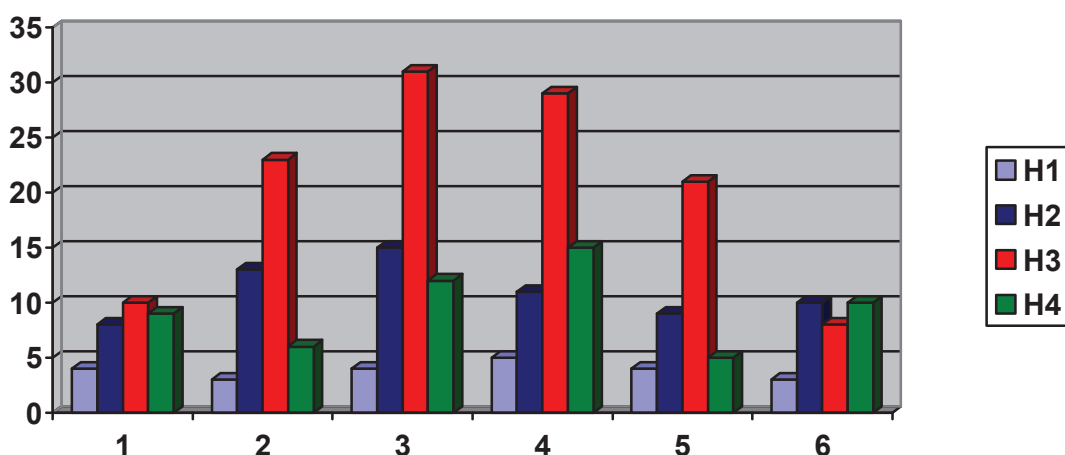


Рисунок 3.7 – Порівняльна діаграма запропонованих методів визначення Хеммінгової віддалі.

Другий спосіб кодування дає хорошу Хеммінгову віддаль, однак він потребує додаткових обчислень для кожної пари порівнювальних символів. Третій спосіб також дає хороші оцінки Хеммінгової віддалі, проте для його кодування необхідно використовувати більшу кількість пам'яті. Четвертий спосіб є простим в кодуванні і має хорошу Хеммінгову віддаль проте потребує додаткового підрахунку кількості елементів.

3.3 Аналіз кодування та визначення Хеммінгової віддалі для реалізації розпізнавання дорожніх знаків

Успішний розвиток інформаційних та комп'ютерних систем, програмних та апаратних засобів реалізації складних алгоритмів опрацювання даних створює сприятливі умови успішного вирішення складних задач розпізнавання образів у

промисловості, медицині навігації, моніторингу та захисту природних ресурсів та інші [147].

У зв'язку збільшенням числа та динаміки потоків транспортних засобів стає актуальною задачею автоматичного розпізнавання дорожніх знаків з метою зменшення числа ДТП, забруднення середовища, особливо при виникненні завад сприйняття та правильного розпізнавання знаків в умовах туману, дощу, пилу та інших.

Системи розпізнавання дорожніх знаків призначені для нагадування шоферам транспортних засобів про дотримання правил дорожнього руху. Через складність реалізації і чималу кількість дорожніх знаків, сучасні системи розпізнавання знаків працюють лише з обмеженою кількістю знаків, в першу чергу це знаки швидкісного режиму. Більшість систем розпізнає тільки знак обмеження швидкості і знак кінця обмеження швидкості. Якщо швидкість автомобіля перевищує дозволу, система подає сигнал про необхідність зменшити швидкість. Деякі найбільш сучасні модифіковані системи дозволяють також розпізнати знаки заборони обгону .

Системами розпізнавання образів в основному займаються найбільші виробники автомобілів. До популярних систем розпізнавання образів належать: Traffic Sign Recognition; Speed Limit Assist; Lane Departure Warning; Mercedes-Benz S-Class; Opel Eye. Стандартно систему розпізнавання образів позначають аббревіатурою RSR (Road Sign Recognition).

Не зважаючи на різні назви, комп'ютерні пристрої, які реалізують розпізнавання дорожніх знаків, для згаданих систем однакові. В склад системи розпізнавання дорожніх знаків входять: відеокамера, електронний блок керування, монітор для виводу інформації, пристрій для подачі звукового сигналу шоферу (рисунок 3.8) [148-150].

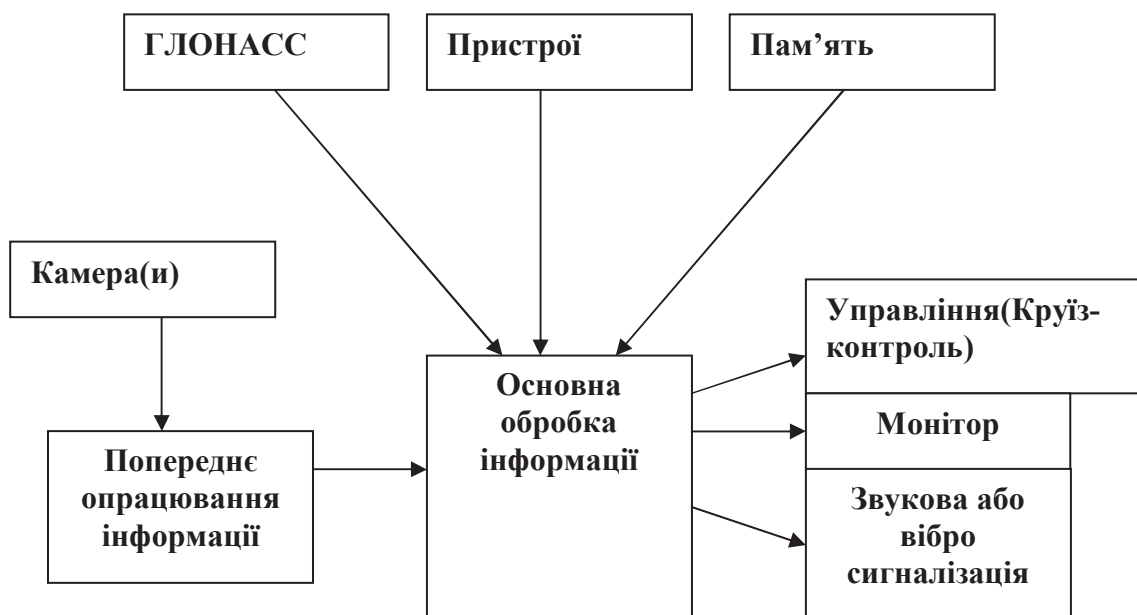


Рисунок 3.8 – Структурна схема системи розпізнавання дорожніх знаків.

Алгоритм роботи електронного блоку керування наступний:

- 1) Визначення місця знаходження дорожнього знаку;
- 2) Визначення форми дорожнього знаку;
- 3) Визначення кольору знаку;
- 4) Аналіз напису на знаку;
- 5) Опрацювання отриманої інформації;
- 6) Отримання інформації про швидкість автомобіля;
- 7) Порівняння швидкості автомобіля з дозволеною швидкістю
- 8) Вивід зображення дорожнього знаку на екран;
- 9) Повідомлення шофера звуковим сигналом про перевищення швидкості

Дорожні знаки є об'єктом структурної ідентифікації, що дозволить узагальнити та суттєво вдосконалити математику формування, передавання та цифрового опрацювання даних у розподілених комп'ютерних системах. Запропонований у роботах [1, 2, 3] критерій структурної складності, розроблений на основі вагових коефіцієнтів оцінок інформативності, дозволяє інтегрально оцінити структурну складність та інформаційну цінність будь-якого графічного зображення, що є необхідним для розвитку сучасних методів та засобів ідентифікації, перетворення та використання поліфункціональних інформаційних повідомлень. Тому, поряд з оцінкою Хеммінгової віддалі, визначимо коефіцієнт структурної складності груп дорожніх знаків.

Метою роботи є проведення аналізу структурної складності дорожніх знаків, а також знаходження оцінки Хеммінгової віддалі для різних категорій.

3.3.1 Категорія попереджувальних знаків та знаків пріоритету.

Першою категорією, що досліджується в даній роботі є категорія попереджувальних знаків (рисунок 3.9) [151].

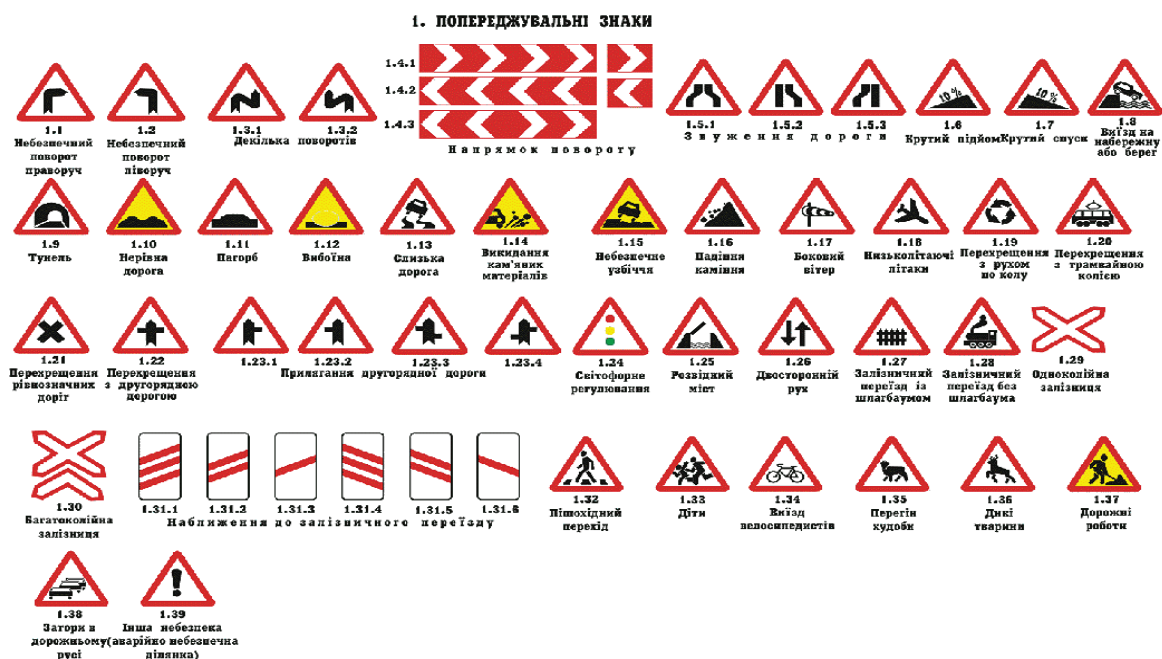


Рисунок 3.9 – Попереджувальні знаки

Розробку методу розпізнавання дорожніх знаків виконаємо шляхом розбиття категорії попереджувальні знаки на 4 менші підкатегорії виконавши 3-ох бітне кодування:

- перший біт – знаки що мають трикутну форму;
- другий біт – наявність ліній;
- третій біт – наявність кругів.

Згідно такого кодування отримаємо наступні категорії з кодами: код 000 – попереджувальні знаки форми (ПЗФ), код 101 – попереджувальні знаки ліній (ПЗЛ), код 110 або 111(можливі дві комбінації для даної категорії) – попереджувальні знаки круг (ПЗК), код 100 попереджувальні знаки решта (ПЗР) .

До групи ПЗФ ввійдуть знаки з наступними номерами: 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3, 1.29, 1.30, 1.31.1, 1.31.2, 1.31.3, 1.31.4, 1.31.5, 1.31.6.

До групи ПЗЛ ввійдуть знаки з наступними номерами: 1.1, 1.2, 1.3.1, 1.3.2, 1.5.1, 1.5.2, 1.5.3, 1.19, 1.21, 1.22, 1.23.1, 1.23.2, 1.23.3, 1.23.4, 1.26.

До групи ПЗК ввійдуть знаки з наступними номерами: 1.6, 1.7, 1.8, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16, 1.20, 1.24, 1.28, 1.32, 1.33, 1.34, 1.37, 1.38, 1.39.

До групи ПЗР ввійдуть знаки з наступними номерами: 1.9, 1.10, 1.11, 1.12, 1.17, 1.18, 1.25, 1.27, 1.35, 1.36.

Далі визначмо значення оцінок Хеммінгової віддалі, що є метрикою бінарної різниці [6]:

$$d_{ij} = \sum_{i,j=1}^n e_i |x_i - y_j|,$$

де x_i, y_i – кодовані атрибути масивів даних, які представляють об'єкти, що підлягають розпізнаванню згідно оцінки Хеммінгової віддалі;

e_i – ваговий коефіцієнт інформативності пари атрибутів образів що розпізнаються $i \in \overline{1, n}$;

n – число пар атрибутів у вузлі Хеммінгового простору (ХП);

d_{ii} – числова оцінка Хеммінгової віддалі представлена у кодах відповідного ТЧБ [7].

Значення отриманих оцінок Хеммінгової віддалі, для категорії попереджувальні знаки наведено в таблиці 3.8

Таблиці 3.8 – Оцінки Хеммінгової віддалі категорії попереджувальні дорожні знаки

Назва підгрупи	ПЗФ	ПЗЛ	ПЗК1	ПЗК2	ПЗР
ПЗФ	–	5	6	7	4
ПЗЛ	5	–	3	2	1
ПЗК1	6	3	–	–	2
ПЗК2	7	2	–	–	3
ПЗР	4	1	2	3	–

Розподіл значень оцінок Хеммінгової віддалі наведено на діаграмі (рисунок 3.10):

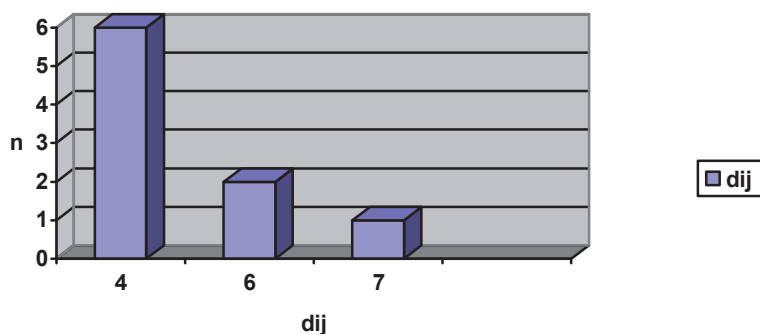


Рисунок 3.10 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії попереджувальні знаки.

На діаграмі зображено розподіл оцінок Хеммінгової віддалі в залежності від отриманих значень. В стовпчиках показано, яка кількість пар знаків порівняння має вказані значення оцінок Хеммінгової віддалі. Так з рисунку 3.9 видно, що є 6 пар знаків, які мають значення Хеммінгової віддалі від 1 до 4, 2 пари знаків – від 5 до 6 і 1 пара знаків має значення – 7. На інших діаграмах розподілу застосовується подібний принцип.

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 4;
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 7.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють здійснити розподіл даної категорії на менші підкатегорії зображення даної категорії.

Розглянемо тепер більш детально кожну з під категорій, закодуємо їхні елементи, а також обчислимо оцінку Хеммінгової віддалі.

Категорія ПЗФ.

Для кодування даної категорії використаємо 7-бітне кодування елементів:

- перший біт – знаки прямокутної форми;
- другий і третій біт – позначимо через 00 знаки без червоних ліній, 10 знаки з однією червоною лінією, 01 знаки з двома червоними лініями, 11 знаки з трьома червоними лініями;

- четвертий біт знаки у яких червона лінія знаходиться нижче зліва ніж справа;

- п'ятий біт знаки у яких червона лінія знаходиться нижче справа ніж зліва;

- шостий біт знаки у яких біла лінія напрямлена вліво;

- сьомий біт знаки у яких біла лінія напрямлена вправо.

Тоді отримаємо наступні коди для знаків групи ПЗФ (таблиця 3.9).

Таблиця 3.9 – Закодовані параметри ПЗФ.

Номер знаку	Код знаку	Структурна складність (k_c)
1.4.1	1000010	22
1.4.2	1000001	22
1.4.3	1000011	22
1.29	0000000	33
1.30	0000100	50
1.31.1	1111000	3
1.31.2	1101000	2
1.31.3	1011000	1
1.31.4	1110000	3
1.31.5	1100000	2
1.31.6	1010000	1

Значення оцінок Хеммінгової віддалі для категорії ПЗФ наведенні в таблиці

3.10

Таблиця 3.10 – Оцінки Хеммінгової віддалі категорії ПЗФ

№	1.4.1	1.4.2	1.4.3	1.29	1.30	1.31.1	1.31.2	1.31.3	1.31.4	1.31.5	1.31.6
1.4.1	-	3	1	66	70	58	42	26	50	34	18
1.4.2	3	-	2	65	69	57	41	25	49	33	17
1.4.3	1	2	-	67	71	59	43	27	51	35	19
1.29	66	65	67	-	4	120	104	88	112	96	80
1.30	70	69	71	4	-	124	108	92	116	100	84
1.31.1	58	57	59	120	124	-	16	32	8	24	40
1.31.2	42	41	43	104	108	16	-	48	24	8	56
1.31.3	26	25	27	88	92	32	48	-	40	56	8
1.31.4	50	49	51	112	116	8	24	16	-	16	32
1.31.5	34	33	35	96	100	24	8	32	16	-	48
1.31.6	18	17	19	80	84	40	56	48	32	48	-

Відповідні значення оцінок інформативності наведенні в таблиці 3.11

Таблиця 3.11 Оцінки інформативності категорії ПЗФ.

№	1.4.1	1.4.2	1.4.3	1.29	1.30	1.31.1	1.31.2	1.31.3	1.31.4	1.31.5	1.31.6
1.4.1	-	0,07	0,02	1,20	0,97	2,32	1,75	1,13	2,00	1,42	0,78
1.4.2	0,07	-	0,05	1,18	0,96	2,28	1,71	1,09	1,96	1,38	0,74
1.4.3	0,02	0,05	-	1,22	0,99	2,36	1,79	1,17	2,04	1,46	0,83
1.29	1,20	1,18	1,22	-	0,05	3,33	2,97	2,59	3,11	2,74	2,35
1.30	0,97	0,96	0,99	0,05	-	2,34	2,08	1,80	2,19	1,92	1,65
1.31.1	2,32	2,28	2,36	3,33	2,34	-	3,20	8,00	1,33	4,80	10,00
1.31.2	1,75	1,71	1,79	2,97	2,08	3,20	-	16,00	4,80	2,00	18,67
1.31.3	1,13	1,09	1,17	2,59	1,80	8,00	16,00	-	10,00	18,67	4,00
1.31.4	2,00	1,96	2,04	3,11	2,19	1,33	4,80	4,00	-	3,20	8,00
1.31.5	1,42	1,38	1,46	2,74	1,92	4,80	2,00	10,67	3,20	-	16,00
1.31.6	0,78	0,74	0,83	2,35	1,65	10,00	18,67	24,00	8,00	16,00	-

Відповідна діаграма розподілу оцінок інформативності зображена на рисунку 3.11.

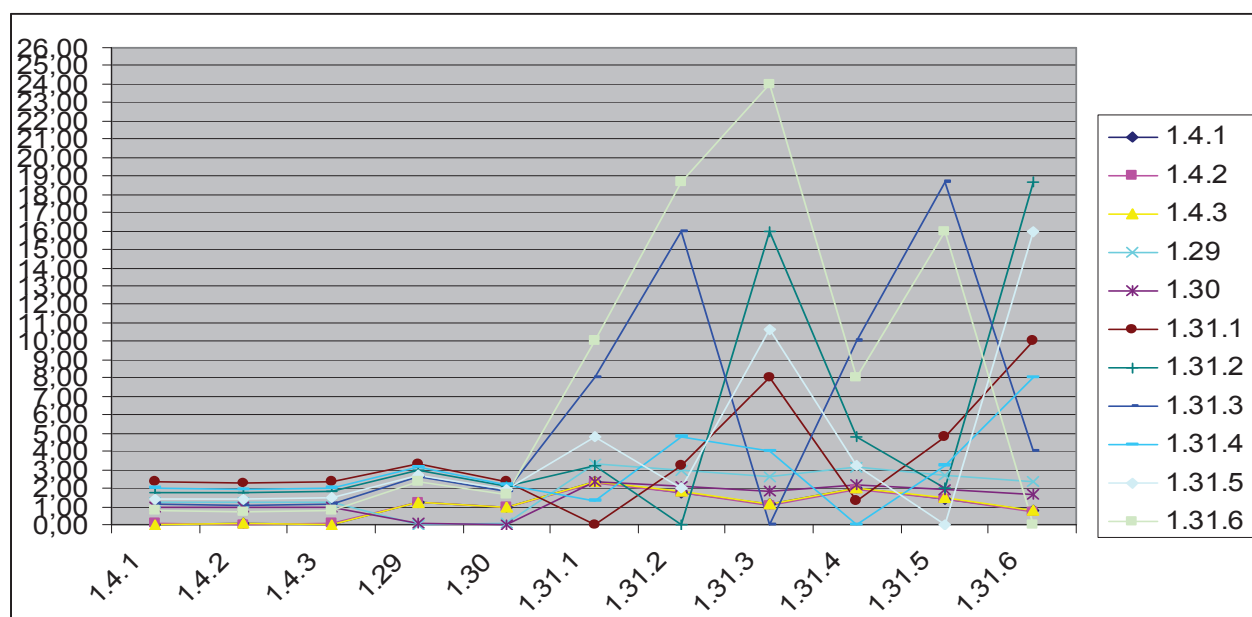


Рисунок 3.11. - Діаграма розподілу оцінок інформативності категорії ПЗФ

Розподіл значень оцінки Хеммінгової віддалі наведено в діаграмі (рисунок 3.12):

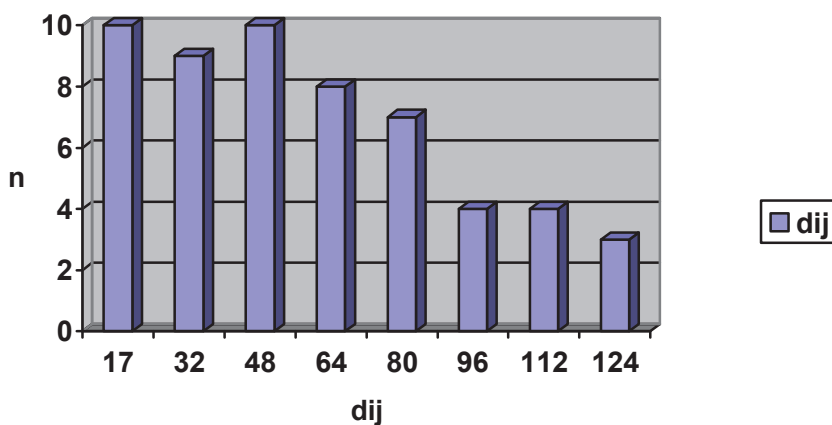


Рисунок 3.12 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії ПЗФ.

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 17;
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 124.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даної підкатегорії.

Категорія ПЗЛ.

Для кодування даної категорії використаємо 9-бітне кодування елементів:

- перший біт знаки на яких є перетин ліній;
- другий біт знаки на яких зображено один елемент ;
- третій біт знаки на яких лінія напрямлена вгору;
- четвертий біт знаки у яких лінія повернута вліво у верхній частині;
- п'ятий біт знаки у яких лінія повернута вправо у верхній частині;
- шостий біт знаки у яких крива лінія повернута вліво;
- сьомий біт знаки у яких крива лінія повернута вправо;
- восьмий біт знаки у яких лінія повернута вліво у нижній частині;
- дев'ятий біт знаки у яких лінія повернута вправо у нижній частині;

Тоді отримаємо наступні коди для знаків групи ПЗЛ (таблиця 3.12):

Таблиця 3.12 – Закодовані параметри ПЗЛ.

Номер знаку	Код знаку	Структурна складність (k_c)
1.1	010010000	10
1.2	010100000	10
1.3.1	011010010	12
1.3.2	011100000	12
1.5.1	001001100	17
1.5.2	001000100	13
1.5.3	001001000	13
1.19	000000000	16,6
1.21	110000000	12
1.22	111110000	12
1.23.1	111010000	11
1.23.2	111100000	11
1.23.3	111100001	14
1.23.4	111010010	14
1.26	001000000	13

Розподіл оцінок Хеммінгової віддалі ПЗЛ відображено в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Оцінки Хеммінгової віддалі категорії ПЗЛ.

№	1.1	1.2	1.3.1	1.3.2	1.5.1	1.5.2	1.5.3	1.19	1.21	1.22	1.23.1	1.23.2	1.23.3	1.23.4	1.26
1.1	-	48	66	112	220	212	216	144	272	352	320	368	369	338	208
1.2	48	-	114	64	236	228	232	160	288	336	368	320	321	370	224
1.3.1	66	114	-	50	158	150	154	210	338	290	258	306	307	256	146
1.3.2	112	64	50	-	172	164	168	204	320	272	304	256	257	306	160
1.5.1	220	236	158	172	-	8	4	76	460	442	412	428	429	414	12
1.5.2	212	228	150	164	8	-	12	68	452	436	404	320	321	406	4
1.5.3	216	232	154	168	4	12	-	72	456	440	408	424	425	410	8
1.19	144	160	210	204	76	68	72	-	484	496	464	448	449	466	64
1.21	272	288	338	320	460	452	456	484	-	112	80	96	97	82	318
1.22	352	336	290	272	442	436	440	496	112	-	32	16	17	34	432
1.23.1	320	368	258	304	412	404	408	464	80	32	-	48	49	2	400
1.23.2	368	320	306	256	428	320	424	448	96	16	48	-	1	50	416
1.23.3	369	321	307	257	429	321	425	449	97	17	49	1	-	51	417
1.23.4	338	370	256	306	414	406	410	466	82	34	2	50	51	-	402
1.26	208	224	146	160	12	4	8	64	318	432	400	416	417	402	-

Відповідні оцінки інформативності наведені в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Оцінки інформативності категорії ПЗЛ.

№	1.1	1.2	1.3.1	1.3.2	1.5.1	1.5.2	1.5.3	1.19	1.21	1.22	1.23.1	1.23.2	1.23.3	1.23.4	1.26
1.1	-	2,40	3,00	5,09	8,15	9,22	9,39	5,41	12,36	16,00	15,24	17,52	15,38	14,08	9,04
1.2	2,40	-	5,18	2,91	8,74	9,91	10,09	6,02	13,09	15,27	17,52	15,24	13,38	15,42	9,74
1.3.1	3,00	5,18	-	2,08	5,45	6,00	6,16	7,34	14,08	12,08	11,22	13,30	11,81	9,85	5,84
1.3.2	5,09	2,91	2,08	-	5,93	6,56	6,72	7,13	13,33	11,33	13,22	11,13	9,88	11,77	6,40
1.5.1	8,15	8,74	5,45	5,93	-	0,27	0,13	2,26	15,86	15,24	14,71	15,29	13,84	13,35	0,40
1.5.2	9,22	9,91	6,00	6,56	0,27	-	0,46	2,30	18,08	17,44	16,83	13,33	11,89	15,04	0,15
1.5.3	9,39	10,09	6,16	6,72	0,13	0,46	-	2,43	18,24	17,60	17,00	17,67	15,74	15,19	0,31
1.19	5,41	6,02	7,34	7,13	2,26	2,30	2,43	-	16,92	17,34	16,81	16,23	14,67	15,23	2,16
1.21	12,36	13,09	14,08	13,33	15,86	18,08	18,24	16,92	-	4,67	3,48	4,17	3,73	3,15	12,72
1.22	16,00	15,27	12,08	11,33	15,24	17,44	17,60	17,34	4,67	-	1,39	0,70	0,65	1,31	17,28
1.23.1	15,24	17,52	11,22	13,22	14,71	16,83	17,00	16,81	3,48	1,39	-	2,18	1,96	0,08	16,67
1.23.2	17,52	15,24	13,30	11,13	15,29	13,33	17,67	16,23	4,17	0,70	2,18	-	0,04	2,00	17,33
1.23.3	15,38	13,38	11,81	9,88	13,84	11,89	15,74	14,67	3,73	0,65	1,96	0,04	-	1,82	15,44
1.23.4	14,08	15,42	9,85	11,77	13,35	15,04	15,19	15,23	3,15	1,31	0,08	2,00	1,82	-	14,89
1.26	9,04	9,74	5,84	6,40	0,40	0,15	0,31	2,16	12,72	17,28	16,67	17,33	15,44	14,89	-

Відповідна діаграма розподілу оцінок інформативності зображена на рисунку 3.13.

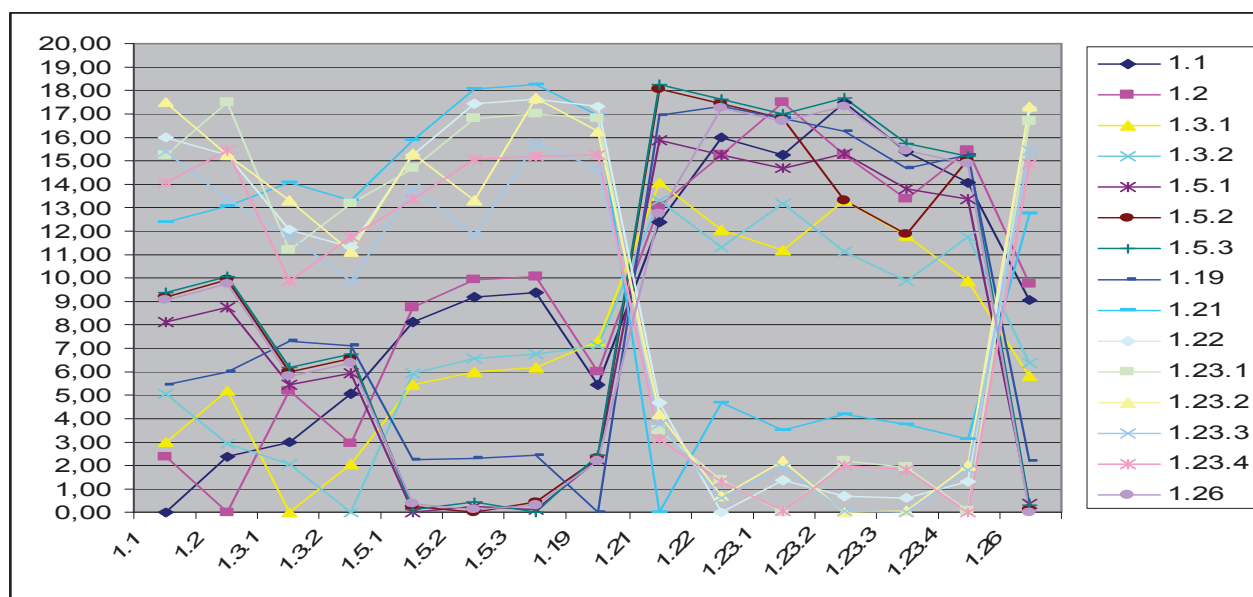


Рисунок 3.13 – Оцінки інформативності категорії ПЗЛ

Розподіл значень оцінки Хеммінгової віддалі наведено в діаграмі (рисунок 3.14):

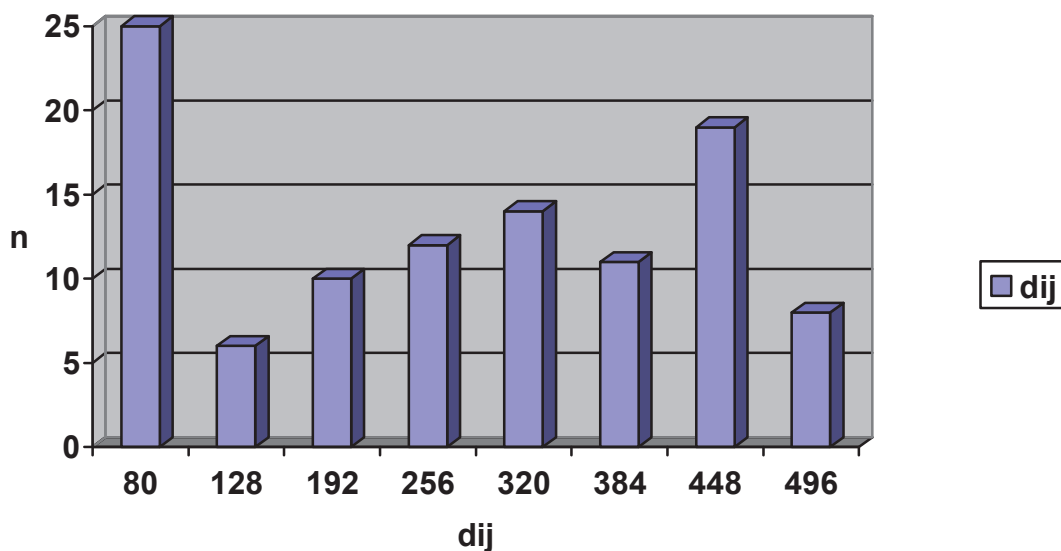


Рисунок 3.14. Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії ПЗЛ.

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 80;
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 496.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даної підкатегорії.

Категорія ПЗК.

Для кодування даної категорії використаємо 8-бітне кодування елементів:

- перший біт знаки на яких відсутні цифри;
- другий біт знаки, що мають більше двох кругів ;
- третій біт знаки на яких зображено автомобілі;
- четвертий біт знаки на яких розміщені елементи жовтого кольору;
- п'ятий біт знаки на яких зображені прямі лінії;
- шостий біт знаки на яких зображено транспортні засоби;
- сьомий біт знаки, що містять зображення людини;
- восьмий біт знаки, що мають на своєму фоні три круга.

Тоді отримаємо наступні коди для знаків групи ПЗК (таблиця 3.15):

Таблиця 3.15 – Закодовані параметри ПЗК.

Номер знаку	Код знаку	Структурна складність (k_c)
1.6	Змінний код	20,2
1.7	Змінний код	20,2
1.8	10100100	25,2
1.13	10101100	27
1.14	11111100	21
1.15	10110100	14,2
1.16	11000000	19,2
1.20	11000100	16
1.24	11010001	10,6
1.28	11000101	16
1.32	10001010	20
1.33	10000010	27
1.34	10000100	16
1.37	10010010	16
1.38	11100100	37
1.39	10001000	11

Для елементів 1.6 і 1.7 можливі різні варіанти зображень, які потребують спеціального кодування. Визначені оцінки Хеммінгової віддалі наведено в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Оцінки Хеммінгової віддалі параметри ПЗК.

№	1.8	1.13	1.14	1.15	1.16	1.20	1.24	1.28	1.32	1.33	1.34	1.37	1.38	1.39
1.8	-	8	88	16	100	96	113	97	46	38	32	54	64	44
1.13	8	-	80	24	108	104	125	105	38	46	40	62	72	36
1.14	88	80	-	72	60	56	45	49	118	126	120	110	24	116
1.15	16	24	72	-	116	112	101	113	62	54	48	38	80	60
1.16	100	108	60	116	-	4	17	5	74	66	68	82	36	72
1.20	96	104	56	112	4	-	21	1	78	70	64	86	32	76
1.24	113	125	45	101	17	21	-	20	91	83	85	67	53	89
1.28	97	105	49	113	5	1	20	-	79	71	65	87	33	77
1.32	46	38	118	62	74	78	91	79	-	8	14	24	110	2
1.33	38	46	126	54	66	70	83	71	8	-	6	16	102	10
1.34	32	40	120	48	68	64	85	65	14	6	-	22	96	12
1.37	54	62	110	38	82	86	67	87	24	16	22	-	118	24
1.38	64	72	24	80	36	32	53	33	110	102	96	118	-	108
1.39	44	36	116	60	72	76	89	77	2	10	12	24	108	-

Відповідні оцінки інформативності для даної категорії наведені в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Оцінки інформативності категорії ПЗК

№	1.8	1.13	1.14	1.15	1.16	1.20	1.24	1.28	1.32	1.33	1.34	1.37	1.38	1.39
1.8	-	0,15	1,90	0,41	2,25	2,33	3,16	2,35	1,02	0,73	0,78	1,31	1,03	1,22
1.13	0,15	-	1,67	0,58	2,34	2,42	3,32	2,44	0,81	0,85	0,93	1,44	1,13	0,95
1.14	1,90	1,67	-	2,05	1,49	1,51	1,42	1,32	2,88	2,63	3,24	2,97	0,41	3,63
1.15	0,41	0,58	2,05	-	3,47	3,71	4,07	3,74	1,81	1,31	1,59	1,26	1,56	2,38
1.16	2,25	2,34	1,49	3,47	-	0,11	0,57	0,14	1,89	1,43	1,93	2,33	0,64	2,38
1.20	2,33	2,42	1,51	3,71	0,11	-	0,79	0,03	2,17	1,63	2,00	2,69	0,60	2,81
1.24	3,16	3,32	1,42	4,07	0,57	0,79	-	0,75	2,97	2,21	3,20	2,52	1,11	4,12
1.28	2,35	2,44	1,32	3,74	0,14	0,03	0,75	-	2,19	1,65	2,03	2,72	0,62	2,85
1.32	1,02	0,81	2,88	1,81	1,89	2,17	2,97	2,19	-	0,17	0,39	0,67	1,93	0,06
1.33	0,73	0,85	2,63	1,31	1,43	1,63	2,21	1,65	0,17	-	0,14	0,37	1,59	0,26
1.34	0,78	0,93	3,24	1,59	1,93	2,00	3,20	2,03	0,39	0,14	-	0,69	1,81	0,44
1.37	1,31	1,44	2,97	1,26	2,33	2,69	2,52	2,72	0,67	0,37	0,69	-	2,23	0,89
1.38	1,03	1,13	0,41	1,56	0,64	0,60	1,11	0,62	1,93	1,59	1,81	2,23	-	2,25
1.39	1,22	0,95	3,63	2,38	2,38	2,81	4,12	2,85	0,06	0,26	0,44	0,89	2,25	-

Відповідна діаграма розподілу вказаних оцінок зображена на рисунку 3.15

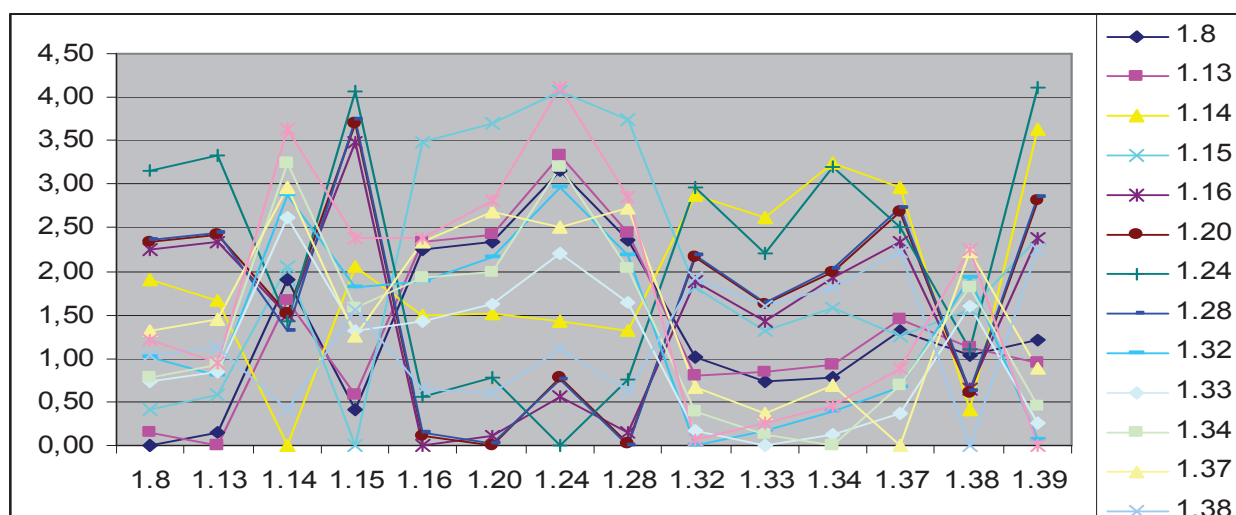


Рисунок 3.15 Оцінка інформативності категорії ПЗК

Розподіл значень оцінки Хеммінгової віддалі наведено в діаграмі (рисунок 3.16):

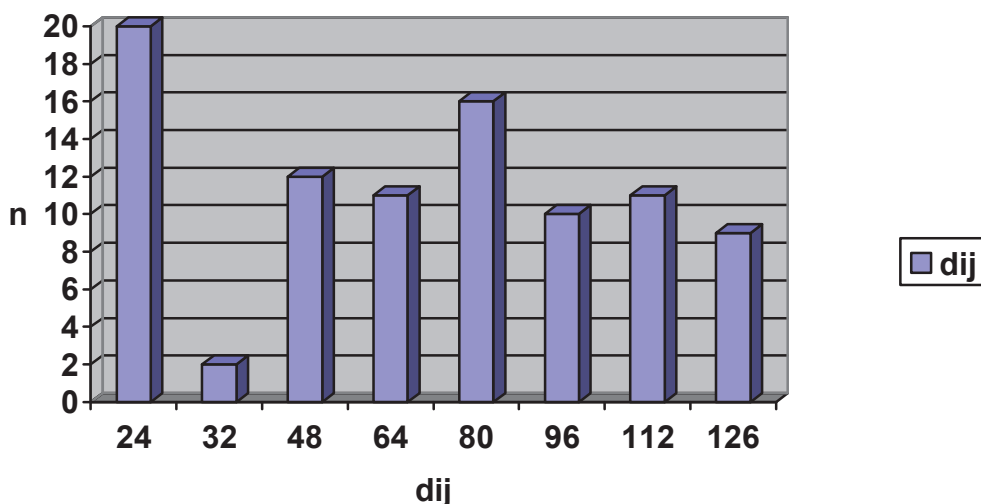


Рисунок 3.16 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії ПЗК.

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 24;
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 126.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даної підкатегорії, окрім двох знаків що мають декілька варіантів свого представлення.

Категорія ПЗР.

Для кодування даної категорії використаємо 7-бітне кодування елементів:

- перший біт знаки на яких присутній жовтий колір;
- другий біт знаки, які мають чорну полосу знизу ;
- третій біт знаки із зображенням істот;
- четвертий біт знаки на яких розміщено більше одного елемента;
- п'ятий біт – знаки, що містять симетричні елементи зображення;
- шостий біт – знаки, що містять півкруг у верхній частині зображення;
- сьомий біт знаки на яких зображено транспортні засоби;

Тоді отримаємо наступні коди для знаків групи ПЗР (таблиця 3.18):

Таблиця 3.18 – Закодовані параметри ПЗР.

Номер знаку	Код знаку	Структурна складність (k_c)
1.9	0101110	16
1.10	1100110	14,2
1.11	0100110	14,2
1.12	1100100	14,2
1.17	0000000	20
1.18	0000101	16
1.25	0001000	17,2
1.27	0000100	16
1.35	0010010	16
1.36	0010000	16

Оцінки Хемінової віддалі категорії ПЗР наведені в таблиці 3.19

Таблиця 3.19 Оцінки Хеммінгової віддалі категорії ПЗР.

№	1.9	1.10	1.11	1.12	1.17	1.18	1.25	1.27	1.35	1.36
1.9	-	72	8	74	46	43	38	42	60	62
1.10	72	-	64	2	102	99	110	98	116	118
1.11	8	64	-	66	38	35	46	34	52	54
1.12	74	2	66	-	100	97	108	96	118	116
1.17	46	102	38	100	-	5	8	4	18	16
1.18	43	99	35	97	5	-	13	1	23	21
1.25	38	110	46	108	8	13	-	12	26	24
1.27	42	98	34	96	4	1	12	-	22	20
1.35	60	116	52	118	18	23	26	22	-	2
1.36	62	118	54	116	16	21	24	20	2	-

Оцінки інформативності категорії ПЗР наведено в таблиці 3.20

Таблиця 3.20 – Оцінки інформативності категорії ПЗР.

№	1.9	1.10	1.11	1.12	1.17	1.18	1.25	1.27	1.35	1.36
1.9	-	2,38	0,26	2,45	1,28	1,34	1,14	1,31	1,88	1,94
1.10	2,38	-	2,25	0,07	2,98	3,28	3,50	3,25	3,84	3,91
1.11	0,26	2,25	-	2,32	1,11	1,16	1,46	1,13	1,72	1,79
1.12	2,45	0,07	2,32	-	2,92	3,21	3,44	3,18	3,91	3,84
1.17	1,28	2,98	1,11	2,92	-	0,14	0,22	0,11	0,50	0,44
1.18	1,34	3,28	1,16	3,21	0,14	-	0,39	0,03	0,72	0,66
1.25	1,14	3,50	1,46	3,44	0,22	0,39	-	0,36	0,78	0,72
1.27	1,31	3,25	1,13	3,18	0,11	0,03	0,36	-	0,69	0,63
1.35	1,88	3,84	1,72	3,91	0,50	0,72	0,78	0,69	-	0,06
1.36	1,94	3,91	1,79	3,84	0,44	0,66	0,72	0,63	0,06	-

Відповідна діаграма для даної таблиці наведенна на рисунку 3.17.

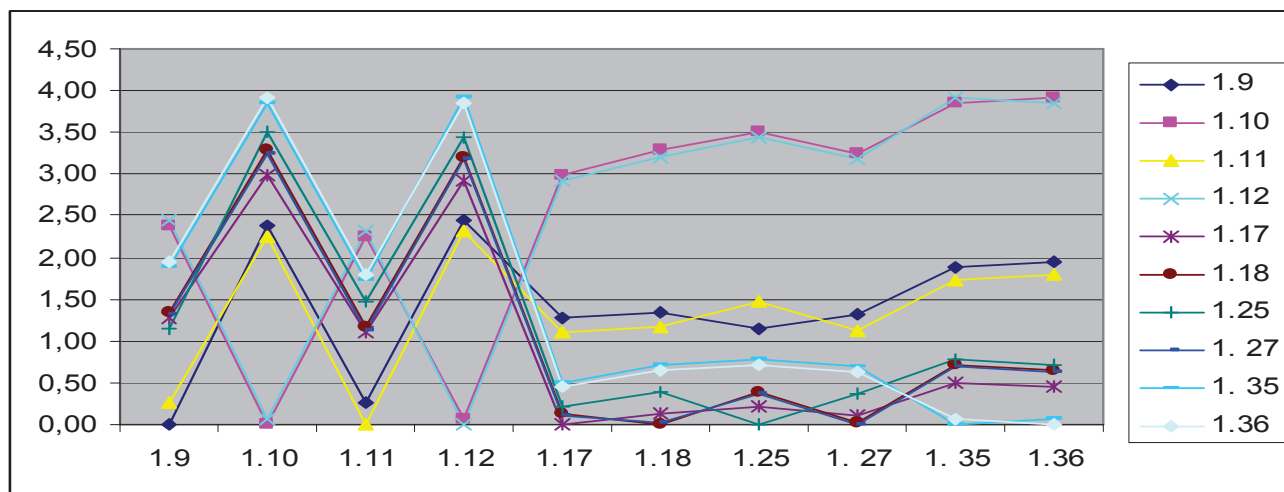


Рисунок 3.17 – Оцінка інформативності категорії ПЗР

Розподіл значень оцінок Хеммінгової віддалі наведено на діаграмі (рисунок 3.18):

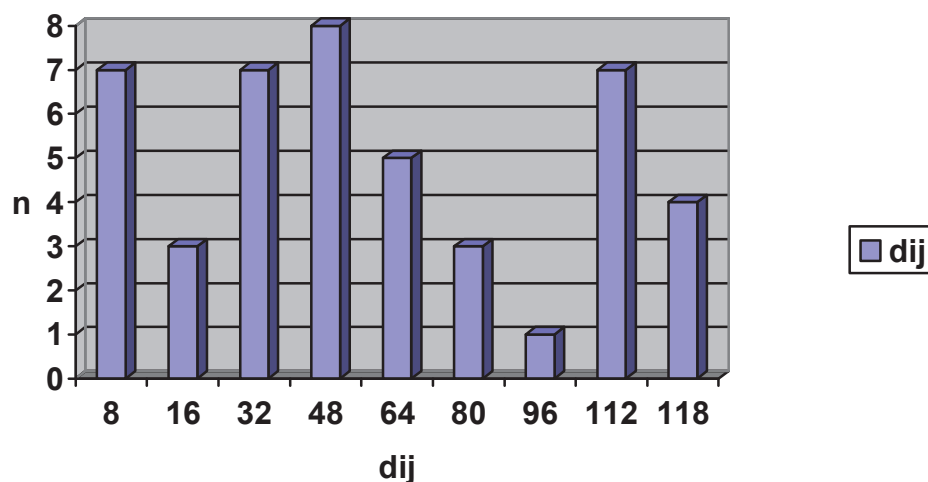


Рисунок 3.18 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії ПЗР.

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 8;
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 118.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даної підкатегорії.

Другою категорією що розглядається в даній роботі є категорія знаків пріоритету (рисунок 3.19) [152].



Рисунок 3.19 – Знаки пріоритету

Для кодування даної категорії використаємо 5-бітне кодування елементів:

- перший біт знаки на яких присутній червоний колір;
- другий біт знаки на яких присутній синій колір;
- третій біт знаки на яких присутній чорний колір;
- четвертий біт знаки на яких розміщені букви;
- п'ятий біт – знаки із чотирма чорними лініями;

Тоді отримаємо наступні коди для знаків пріоритету (таблиця 3.21):

Таблиця 3.21 – Закодовані параметри знаків пріоритету.

Номер знаку	Код знаку	Структурна складність (k_c)
2.1	10000	7
2.2	10010	59
2.3	00100	19
2.4	00101	24
2.5	10100	9,2
2.6	11000	17

Оцінки Хеммінгової віддалі наведені в таблиці 3.22

Таблиця 3.22 – Оцінки Хеммінгової віддалі для знаків пріоритету

№	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
2.1	-	2	20	21	4	8
2.2	2	-	22	23	6	10
2.3	20	22	-	1	16	28
2.4	21	23	1	-	17	29
2.5	4	6	16	17	-	12
2.6	8	10	28	29	12	-

Оцінки інформативності наведені в таблиці 3.23

Таблиця 3.23 – Оцінки інформативності для знаків пріоритету

№	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
2.1	-	0,03	0,77	0,68	0,25	0,33
2.2	0,03	-	0,28	0,28	0,09	0,13
2.3	0,77	0,28	-	0,02	0,57	0,78
2.4	0,68	0,28	0,02	-	0,51	0,71
2.5	0,25	0,09	0,57	0,51	-	0,46
2.6	0,33	0,13	0,78	0,71	0,46	-

Діаграма розподілу оцінок інформативності для знаків пріоритету наведена на рисунку 3.20.

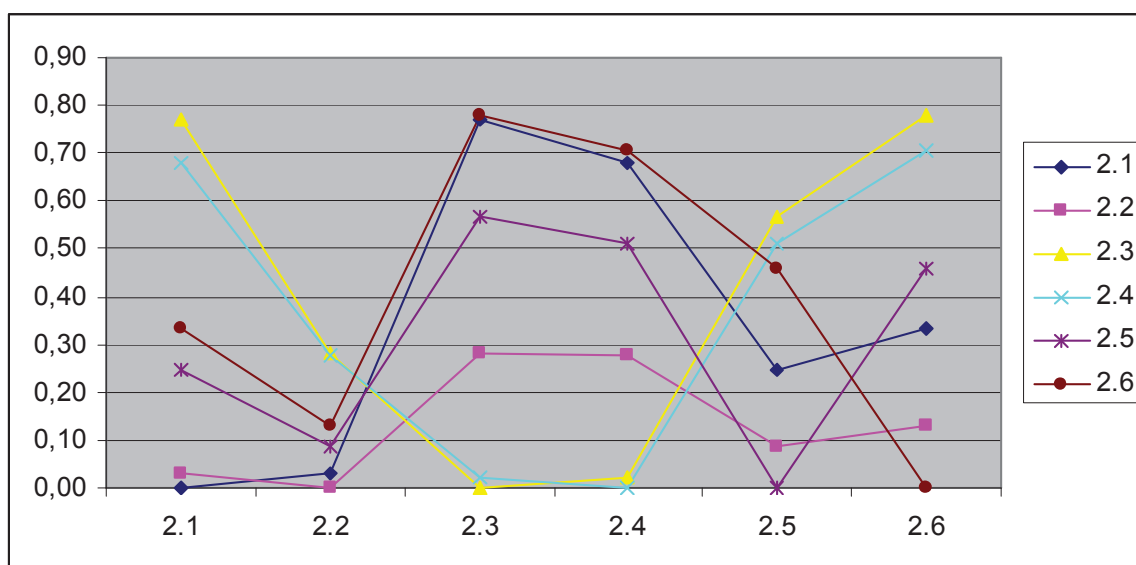


Рисунок 3.20 – Оцінка інформативності категорії Знаки пріоритету

Розподіл значень оцінки Хеммінгової віддалі наведено в діаграмі (рисунок 3.21):

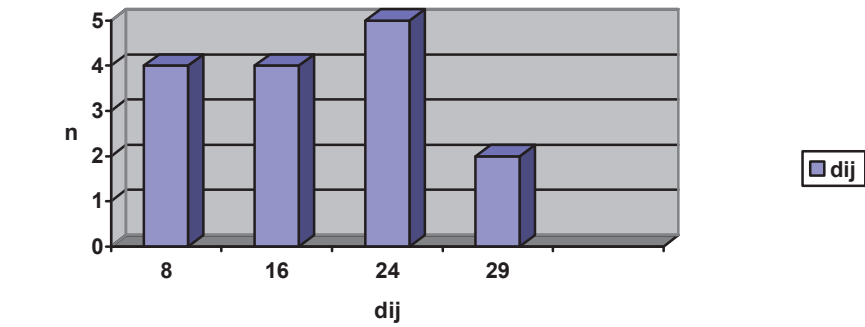


Рисунок 3.21 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії знаки пріоритету.

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 8;
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 29.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даної категорії.

3.3.2 Категорія заборонних та наказових знаків

Ще однією досить важливою категорією є категорія заборонних знаків (рисунок 3.22) [151].



Рисунок 3.22 – Заборонні знаки

Для більшої зручності дану категорію можна поділити на 3 менші під категорії виконавши 2-ох бітне кодування:

- перший біт відповідає за наявність цифр на зображенні дорожнього знаку;
- другий біт відповідає за наявність на зображеннях дорожніх знаків кольорів крім чорного, червоного і білого.

Виконавши таке кодування отримаємо наступні категорії з кодами: заборонні знаки з цифрами (ЗЗЦ) код 10, заборонні знаки з додатковими кольорами (ЗЗК) код 01, заборонні знаки решта (ЗЗР) код 00.

До групи ЗЗЦ ввійдуть знаки з наступними номерами: 3.3, 3.15, 3.16, 1.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32.

До групи ЗЗК ввійдуть знаки з наступними номерами: 3.12, 3.13, 3.14, 3.34, 3.35, 3.36, 3.37, 3.38, 3.39.

До групи ЗЗР ввійдуть знаки з наступними номерами: 3.1, 3.2, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.33, 3.40, 3.41, 3.42, 3.43.

Розглянемо тепер більш детально кожен з під категорій, закодуємо їхні елементи, а також обчислимо оцінку Хеммінгової віддалі.

Категорія ЗЗЦ.

Для кодування даної категорії використаємо 7-бітне кодування елементів із додатково введеними спеціальними трьома бітами:

- перший біт знаки, які мають квадратну форму;
- другий біт знаки, які мають на своєму фоні букву “Т”;
- третій біт знаки, які мають на своєму фоні букву “М”;
- четвертий біт знаки на яких розміщені чорні цифри;
- п’ятий біт – знаки, на яких цифри знаходяться нижче малюнка;
- шостий біт – знаки із зображенням автомобіля;
- сьомий біт – знаки на яких окрім цифр і букв зображено ще якісь малюнки;
- додатково введені три біти відповідатимуть за код значення цифри зображеної на дорожньому знакові і необхідні для більш точної ідентифікації.

Тоді отримаємо наступні коди для знаків групи ЗЗЦ (таблиця 3.24):

Таблиця 3.24 – Закодовані параметри заборонних знаків ЗЗЦ.

Номер знаку	Код знаку	Структурна складність (k_c)
3.3	0100011	11,2
3.15	0101100	13,2
3.16	0101101	23,2
3.17	0011101	23,2
3.18	0011001	23,2
3.19	0011011	31,2
3.20	0011111	37,2
3.29	0001100	9,2
3.30	0000001	14,2
3.31	1001001	51
3.32	1000001	86

Значення оцінок Хеммінгової віддалі та інформативності для даної категорії наведені відповідно в таблицях 3.25, 3.26.

Таблиця 3.2 – Оцінки Хеммінгової віддалі категорії Заборонних знаків ЗЗЦ

№	3.3	3.15	3.16	3.17	3.18	3.19	3.20	3.29	3.30	3.31	3.32
3.3	-	15	14	62	58	56	60	47	34	106	98
3.15	15	-	1	49	53	55	51	32	45	101	109
3.16	14	1	-	48	52	54	50	33	44	100	108
3.17	62	49	48	-	4	6	2	17	28	84	92
3.18	58	53	52	4	-	2	6	21	24	80	88
3.19	56	55	54	6	2	-	4	23	26	82	90
3.20	60	51	50	2	6	4	-	19	30	86	94
3.29	47	32	33	17	21	23	19	-	13	69	77
3.30	34	45	44	28	24	26	30	13	-	72	64
3.31	106	101	100	84	80	82	86	69	72	-	8
3.32	98	109	108	92	88	90	94	77	64	8	-

Таблиця 3.26 – Оцінки інформативності категорії Заборонних знаків ЗЗЦ

№	3.3	3.15	3.16	3.17	3.18	3.19	3.20	3.29	3.30	3.31	3.32
3.3	-	0,61	0,41	1,80	1,69	1,32	1,24	2,30	1,34	1,70	1,01
3.15	0,61	-	0,03	1,35	1,46	1,24	1,01	1,43	1,64	1,57	1,10
3.16	0,41	0,03	-	1,03	1,12	0,99	0,83	1,02	1,18	1,35	0,99
3.17	1,80	1,35	1,03	-	0,09	0,11	0,03	0,52	0,75	1,13	0,84
3.18	1,69	1,46	1,12	0,09	-	0,04	0,10	0,65	0,64	1,08	0,81
3.19	1,32	1,24	0,99	0,11	0,04	-	0,06	0,57	0,57	1,00	0,77
3.20	1,24	1,01	0,83	0,03	0,10	0,06	-	0,41	0,58	0,98	0,76
3.29	2,30	1,43	1,02	0,52	0,65	0,57	0,41	-	0,56	1,15	0,81
3.30	1,34	1,64	1,18	0,75	0,64	0,57	0,58	0,56	-	1,10	0,64
3.31	1,70	1,57	1,35	1,13	1,08	1,00	0,98	1,15	1,10	-	0,06
3.32	1,01	1,10	0,99	0,84	0,81	0,77	0,76	0,81	0,64	0,06	-

Відповідна діаграма розподілу оцінок інформативності наведено на рисунку 3.23.

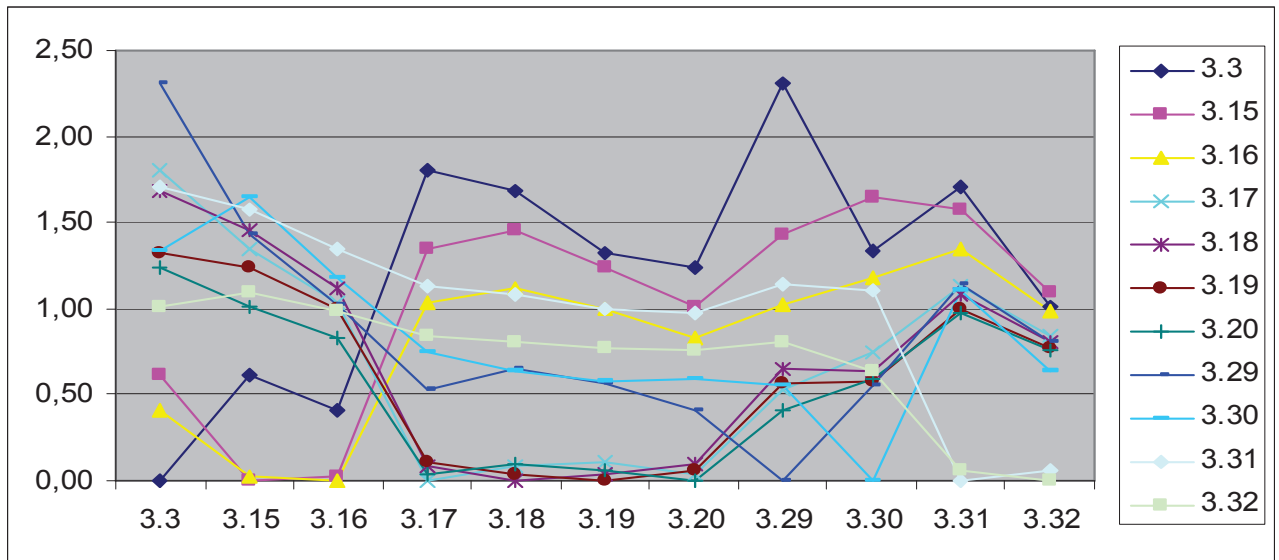


Рисунок 3.23 – Оцінка інформативності категорії Заборонних знаків ЗЗЦ

Розподіл значень оцінки Хеммінгової віддалі наведено в діаграмі (рисунок 3.24):

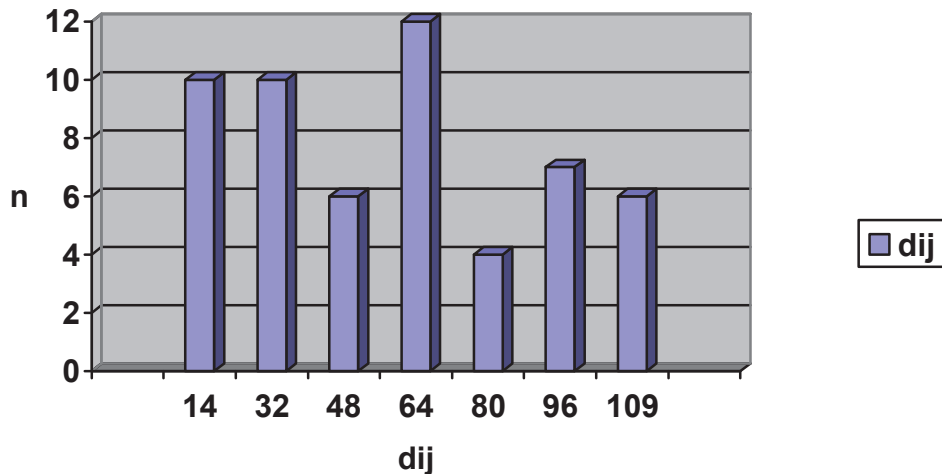


Рисунок 3.24 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії ЗЗЦ.

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 14;

2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 109.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даної підкатегорії.

Категорія ЗЗК.

Для кодування даної категорії використаємо 8-бітне кодування елементів:

- перший біт знаки, які мають круглу форму;
- другий біт знаки, які мають білий колір;
- третій біт знаки, які мають червоний колір;
- четвертий біт знаки, які мають жовтий колір;
- п'ятий біт – знаки, із зображенням автомобіля;
- шостий біт – знаки із чотирма чорними лініями;
- сьомий біт – знаки із перетином червоних ліній;
- восьмий біт знаки, які мають 2 білі прямокутники (червона лінія ігнорується).

Тоді отримаємо наступні коди для знаків групи ЗЗК (таблиця 3.27):

Таблиця 3.27 – Закодовані параметри категорії ЗЗК.

Номер знаку	Код знаку
3.12	11000000
3.13	11011000
3.14	11010000
3.34	10100010
3.35	10100000
3.36	11100000
3.37	11100001
3.38	01100000
3.39	01100100

Значення оцінок Хеммінгової віддалі для ЗЗК наведені в таблиці 3.28

Таблиця 3.28 – Оцінки Хеммінгової віддалі категорії ЗЗК

№	3.12	3.13	3.14	3.34	3.35	3.36	3.37	3.38	3.39
3.12	-	24	16	98	96	32	33	160	164
3.13	24	-	8	122	120	56	57	184	188
3.14	16	8	-	114	112	48	49	176	180
3.34	98	122	114	-	2	66	67	194	134
3.35	96	120	112	2	-	64	65	192	196
3.36	32	56	48	66	64	-	1	128	132
3.37	33	57	49	67	65	1	-	129	133
3.38	160	184	176	194	192	128	129	-	4
3.39	164	188	180	134	196	132	133	4	-

Розподіл значень оцінок Хеммінгової віддалі наведено в діаграмі (рисунок 3.25):

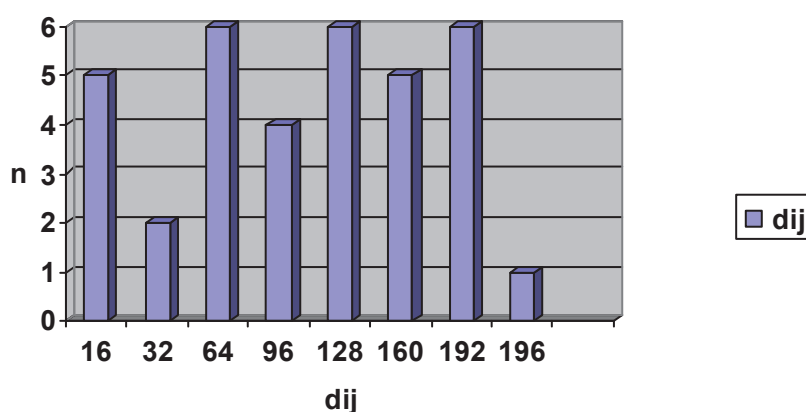


Рисунок 3.25 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії ЗЗК

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 16;
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 196.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даної підкатегорії.

Категорія ЗЗР.

Для більшої зручності дану категорію можна поділити на 2 менші підкатегорії заборонні знаки з транспортом (ЗЗРТ) і заборонні знаки без транспорту (ЗЗРБ).

До групи ЗЗРТ ввійдуть знаки з наступними номерами: 3.2, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.11, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28.

До групи ЗЗРБ ввійдуть знаки з наступними номерами: 3.1, 3.9, 3.10, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.33, 3.40, 3.41, 3.42, 3.43.

Для кодування категорії ЗЗРТ використаємо 7-бітне кодування елементів:

- перший біт знаки на яких зображено легковий автомобіль;
- другий біт знаки на яких зображено причеп;
- третій біт знаки, які мають транспорт червоного кольору;
- четвертий біт знаки, які мають на своєму фоні два елемента;
- п'ятий біт – знаки, із зображенням механічного транспорту;
- шостий біт – знаки на яких зображений трактор;
- сьомий біт – знаки на яких зображений мопед;

Для кодування категорії ЗЗРБ використаємо 9-бітне кодування елементів:

- перший біт знаки із чорними лініями;
- другий біт знаки із червоними лініями;
- третій біт знаки, які мають тільки два кольори;
- четвертий біт знаки, які мають на своєму фоні чорні круги;
- п'ятий біт і шостий біт позначимо через 00 – знаки без стрілок, 10 – стрілка вліво, 01 – стрілка вправо, 11 – стрілка вниз;
- сьомий біт – знаки на яких зображений білий прямокутник;
- восьмий біт – знаки на яких зображена буква “S”;
- дев'ятий біт – знаки на яких зображений візок;

Тоді отримаємо наступні коди для знаків групи ЗЗРТ (таблиця 3.29):

Таблиця 3.29 – Закодовані параметри категорії ЗЗРТ.

Номер знаку	Код знаку	Номер знаку	Код знаку
3.2	1000000	3.11	0100100
3.4	0100000	3.25	1011000
3.5	0000010	3.26	1001000
3.6	0000000	3.27	1111000
3.7	0000001	3.28	1101000
3.8	0000100		

А також коди для знаків групи ЗЗРБ (таблиця 3.30).

Таблиця 3.30 – Закодовані параметри категорії ЗЗРБ.

Номер знаку	Код знаку	Номер знаку	Код знаку
3.1	001000000	3.24	110011000
3.9	000100000	3.33	000000000
3.10	000100001	3.40	100100000
3.21	001000100	3.41	100100010
3.22	110001000	3.42	101100000
3.23	110010000	3.43	100000000

Оцінки Хеммінгової віддалі для ЗЗРТ наведені в таблиці 3.31

Таблиця 3.31 Оцінки Хеммінгової віддалі категорії ЗЗРТ

№	3.2	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.11	3.25	3.26	3.27	3.28
3.2	-	96	66	64	65	68	100	24	8	56	40
3.4	96	-	34	32	33	36	4	120	112	88	72
3.5	66	34	-	2	3	6	38	90	74	122	106
3.6	64	32	2	-	1	4	36	88	72	120	104
3.7	65	33	3	1	-	5	37	89	73	121	105
3.8	68	36	6	4	5	-	32	92	76	124	108
3.11	100	4	38	36	37	32	-	124	108	92	72
3.25	24	120	90	88	89	92	124	-	16	32	48
3.26	8	112	74	72	73	76	108	16	-	48	32
3.27	56	88	122	120	121	124	92	32	48	-	16
3.28	40	72	106	104	105	108	72	48	32	16	-

Розподіл значень оцінок Хеммінгової віддалі наведено на діаграмах (рисунок 3.26, рисунок 3.27):

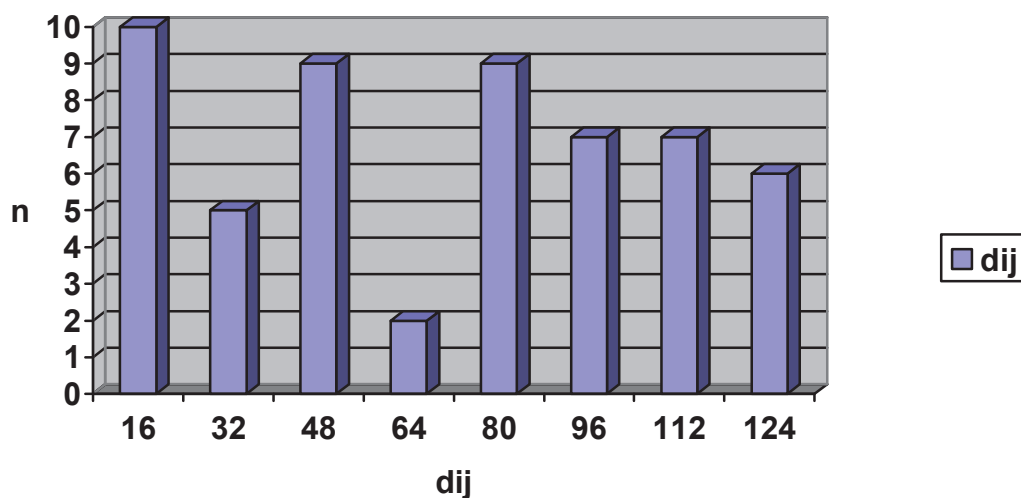


Рисунок 3.26 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії ЗЗРТ.

Оцінки Хеммінгової віддалі для ЗЗРБ наведені в таблиці 3.32

Таблиця 3.32 – Оцінки Хеммінгової віддалі категорії ЗЗРБ

№	3.1	3.9	3.10	3.21	3.22	3.23	3.24	3.33	3.40	3.41	3.42	3.43
3.1	-	96	97	4	456	464	472	64	352	354	288	320
3.9	96	-	1	100	424	432	440	32	256	258	320	288
3.10	97	1	-	97	425	433	441	33	257	259	321	289
3.21	4	100	97	-	460	468	476	68	356	358	292	324
3.22	456	424	425	460	-	24	16	392	168	170	232	136
3.23	464	432	433	468	24	-	8	400	192	194	240	144
3.24	472	440	441	476	16	8	-	408	184	186	248	152
3.33	64	32	33	68	392	400	408	-	288	290	352	256
3.40	352	256	257	356	168	192	184	288	-	2	64	32
3.41	354	258	259	358	170	194	186	290	2	-	66	34
3.42	288	320	321	292	232	240	248	352	64	66	-	96
3.43	320	288	289	324	136	144	152	256	32	34	96	-

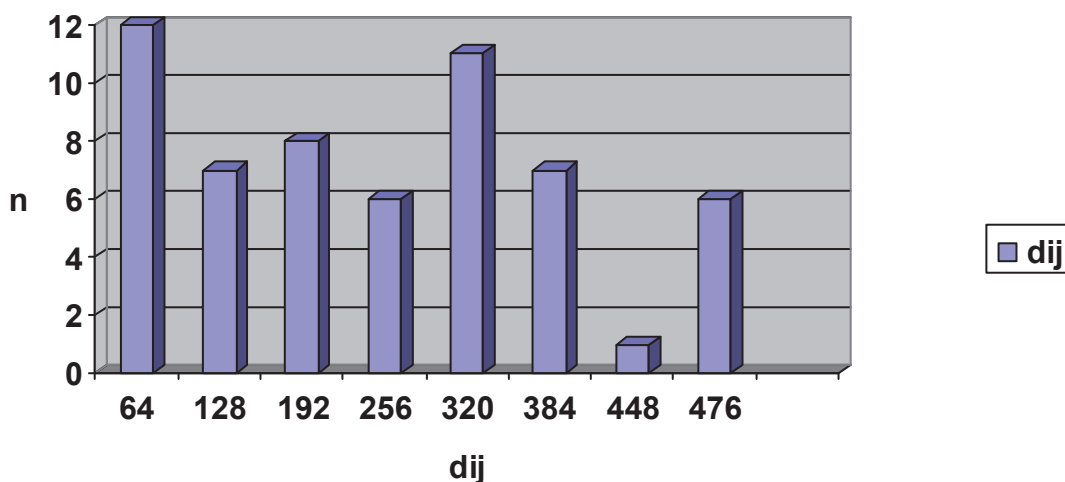


Рисунок 3.27 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії ЗЗРБ

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даних категорії знаків становить не менше оцінки 16 і 64 відповідно;
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даних категорій знаків становить не більше оцінки 124 і 476 відповідно.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даних підкатегорії.

Четверта категорія це категорія наказових знаків (рисунок 3.28) [152].



Рисунок 3.28 – Наказові знаки

Для більшої зручності дану категорію можна поділити на 2 менші під категорії: наказові знаки зі стрілкою (НЗС) і наказові знаки без стрілки (НЗБ).

До групи НЗС ввійдуть знаки з наступними номерами: 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10.

До групи НЗБ ввійдуть знаки з наступними номерами: 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17.

Категорія НЗС.

Для кодування даної категорії використаємо 4-бітне кодування елементів:

- перший біт знаки на яких стрілка напрямлена вгору;
- другий біт знаки, на яких стрілка напрямлена вниз;
- третій біт знаки, на яких стрілка напрямлена вліво;
- четвертий біт 1 знаки, на яких стрілка напрямлена вправо;

Тоді отримаємо наступні коди для знаків групи НЗС (таблиця 3.33):

Таблиця 3.33 Закодовані параметри категорії НЗС.

Номер знаку	Код знаку	Структурна складність (k_c)
4.1	1000	14,2
4.2	0001	14,2
4.3	0010	14,2
4.4	1001	19,2
4.5	1010	19,2
4.6	0011	19,2
4.7	0101	14,2
4.8	0110	14,2
4.9	0111	17,2
4.10	1111	20,8

Оцінки Хеммінгової віддалі та інформативності наведені в таблиці 3.34 та таблиці 3.35 відповідно.

Таблиця 3.34 – Оцінка Хеммінгової віддалі категорії НЗС.

№	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
4.1	-	9	10	1	2	11	13	14	15	7
4.2	9	-	3	8	11	2	4	7	6	14
4.3	10	3	-	11	8	1	7	4	5	13
4.4	1	8	11	-	3	10	12	15	14	6
4.5	2	11	8	3	-	9	15	12	13	5
4.6	11	2	1	10	9	-	6	5	4	12
4.7	13	4	7	12	15	6	-	3	2	10
4.8	14	7	4	15	12	5	3	-	1	9
4.9	15	6	5	14	13	4	2	1	-	8
4.10	7	14	13	6	5	12	10	9	8	-

Таблиця 3.35 Оцінка інформативності категорії НЗС.

№	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
4.1	-	0,32	0,35	0,03	0,06	0,33	0,46	0,49	0,48	0,20
4.2	0,32	-	0,11	0,24	0,33	0,06	0,14	0,25	0,19	0,40
4.3	0,35	0,11	-	0,33	0,24	0,03	0,25	0,14	0,16	0,37
4.4	0,03	0,24	0,33	-	0,08	0,26	0,36	0,45	0,38	0,15
4.5	0,06	0,33	0,24	0,08	-	0,23	0,45	0,36	0,36	0,13
4.6	0,33	0,06	0,03	0,26	0,23	-	0,18	0,15	0,11	0,30
4.7	0,46	0,14	0,25	0,36	0,45	0,18	-	0,11	0,06	0,29
4.8	0,49	0,25	0,14	0,45	0,36	0,15	0,11	-	0,03	0,26
4.9	0,48	0,19	0,16	0,38	0,36	0,11	0,06	0,03	-	0,21
4.10	0,20	0,40	0,37	0,15	0,13	0,30	0,29	0,26	0,21	-!

Відповідна діграма розподілу оцінок інформативності зображена на рисунку 3.29.

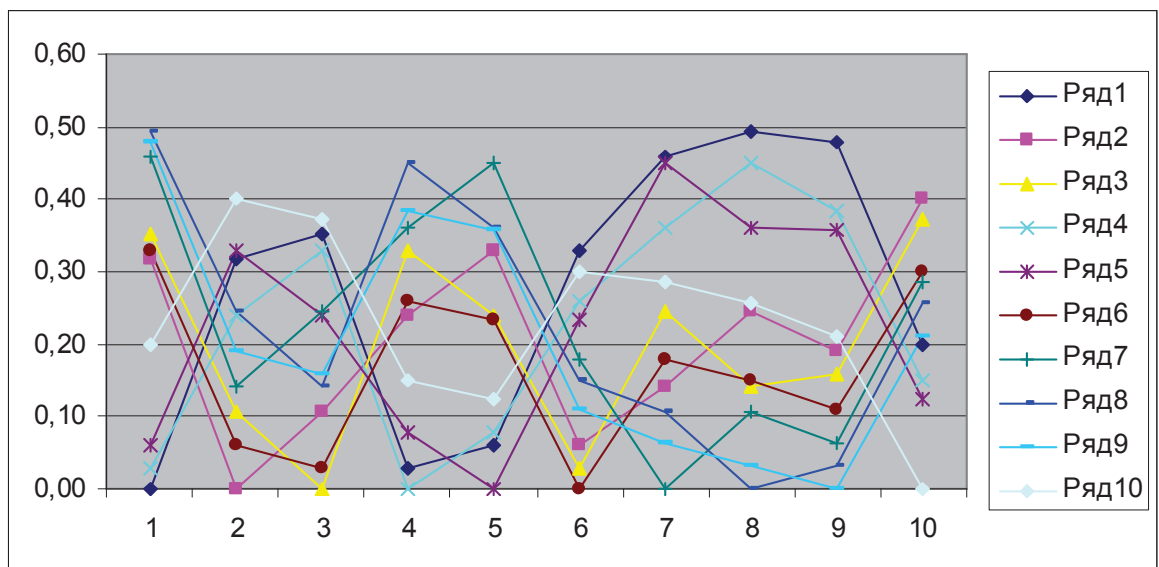


Рисунок 3.29 – Оцінка інформативності категорії НЗС

Розподіл значень оцінки Хеммінгової віддалі наведено в діаграмі (рисунки 3.30):

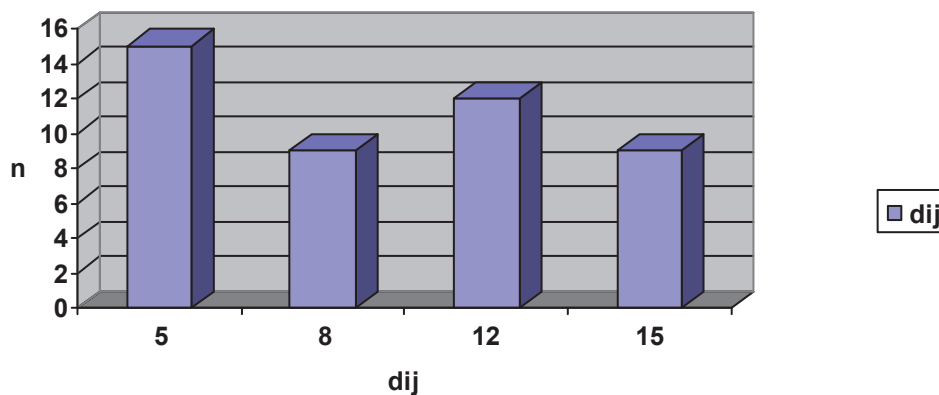


Рисунок 3.30 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії НЗС

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 5;
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 15.

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даної підкатегорії.

Категорія НЗБ.

Для кодування даної категорії використаємо 5-бітне кодування елементів:

- перший біт знаки на яких зображена цифра (дана група потребує окремого розпізнавання значень);

- другий біт знаки, на яких зображено людину;

- третій біт знаки, на яких зображено велосипед;

- четвертий біт знаки, на яких зображений кінь;

- п'ятий біт знаки, на яких є в наявності червона лінія;

Тоді отримаємо наступні коди для знаків групи НЗБ (таблиця 3.36):

Таблиця 3.36 – Закодовані параметри категорії НЗБ.

Номер знаку	Код знаку	Структурна складність (k_c)
4.11	00000	21,2
4.12	00100	21.2
4.13	01000	21.2
4.14	01100	41,2
4.15	01010	31.2
4.16	10000	19,2
4.17	10001	20,2

Для категорії НЗБ оцінки Хеммінгової віддалі наведенні в таблиці 3.37.

Таблиця 3.37 – Оцінки Хеммінгової віддалі категорії НЗБ

№	4.11	4.12	4.13	4.14	4.15	4.16	4.17
4.11	-	4	8	12	10	16	17
4.12	4	-	12	8	14	20	17
4.13	8	12	-	4	2	24	25
4.14	12	8	4	-	6	28	29
4.15	10	14	2	6	-	26	27
4.16	16	20	24	28	26	-	1
4.17	17	17	25	29	27	1	-

Для категорії НЗБ оцінки інформативності наведенні в таблиці 3.38.

Таблиця 3.38 Оцінки інформативності категорії НЗБ.

1	2	3	4	5	6	7	8
№	4.11	4.12	4.13	4.14	4.15	4.16	4.17
4.11	-	0,09	0,19	0,19	0,19	0,40	0,41
4.12	0,09	-	0,28	0,13	0,27	0,50	0,41
1	2	3	4	5	6	7	8
4.13	0,19	0,28	-	0,06	0,04	0,59	0,60
4.14	0,19	0,13	0,06	-	0,08	0,46	0,47
4.15	0,19	0,27	0,04	0,08	-	0,52	0,53
4.16	0,40	0,50	0,59	0,46	0,52	-	0,03
4.17	0,41	0,41	0,60	0,47	0,53	0,03	-

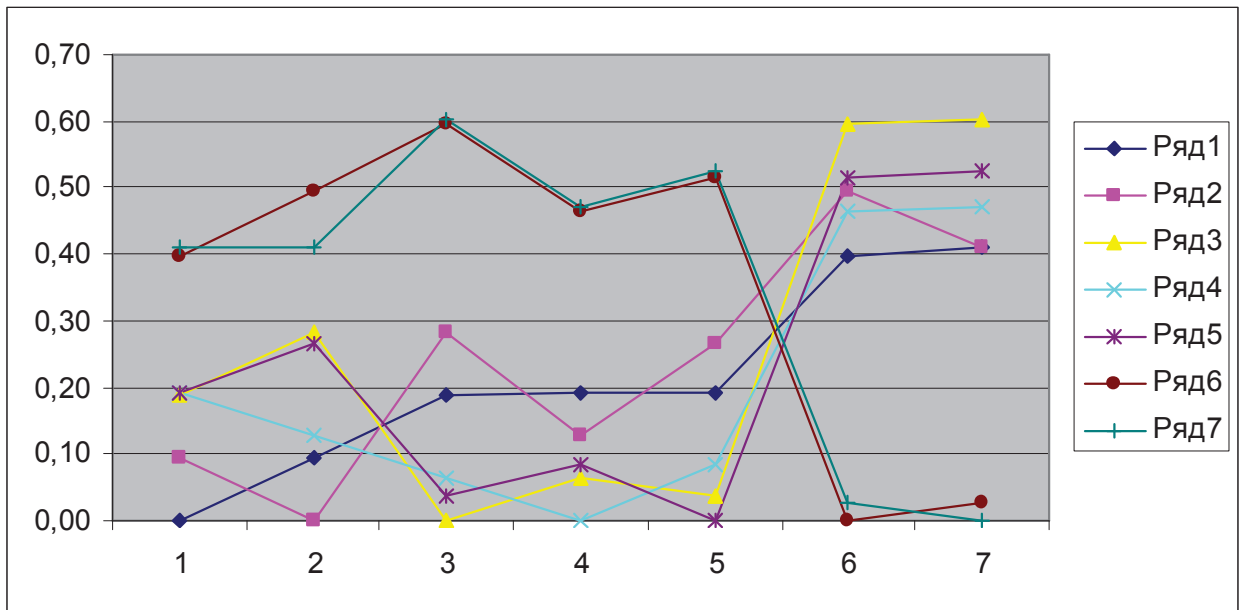


Рисунок 3.31– Оцінка інформативності категорії НЗБ.

Розподіл значень оцінки Хеммінгової віддалі наведено в діаграмі (рисунок 3.32).

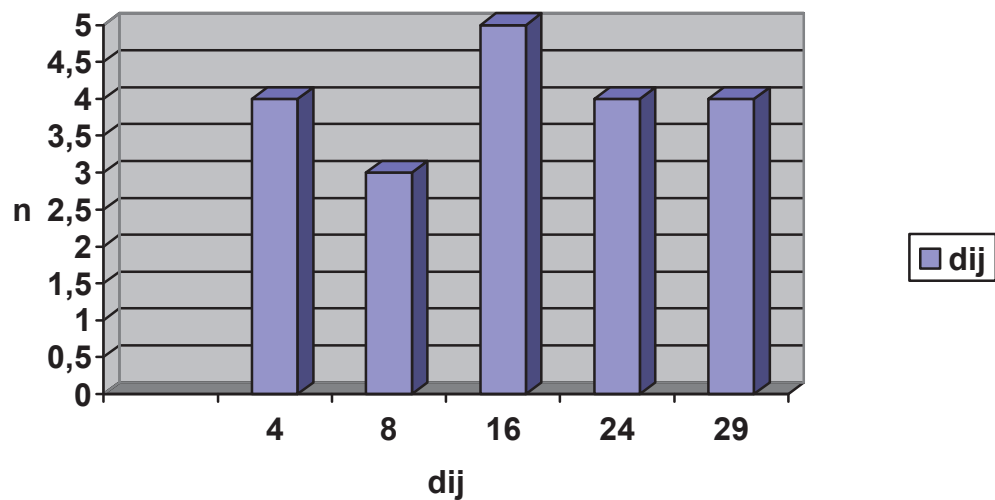


Рисунок 3.32 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії НЗС

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 4
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 29

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють однозначно ідентифікувати зображення даної підкатегорії.

3.3.3. Категорія знаків сервісу.

Ще однією категорією, що досить часто може бути корисна шоферам є категорія знаків сервісу (рисунок 3.33) [152].

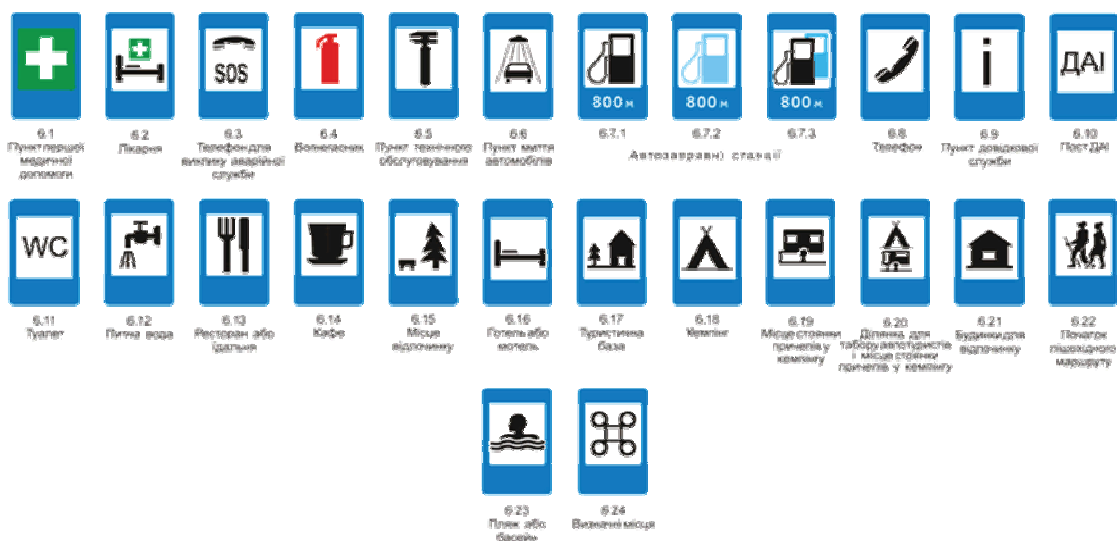


Рисунок 3.33 – Знаки сервісу

Для кодування даної категорії використаємо 8-бітне кодування з додатковою умовою:

- перший біт знаки із буквами;
- другий біт знаки із одним чорним елементом;
- третій біт знаки, які мають ще якийсь колір окрім синього білого чи чорного;
- четвертий біт знаки з горизонтальною прямою лінією;
- п'ятий біт знаки із двома чорними елементами;
- шостий біт знаки у яких чорного кольору більше у верхній частині знаку, ніж у нижній;
- сьомий біт знаки у яких чорного кольору більше у правій частині знаку, ніж у лівій;
- восьмий біт знаки для яких виконується одна з умов: червоний колір, зображено людину, зображено ліжко.

Тоді отримаємо наступні коди для знаків сервісу (таблиця 3.39):

Таблиця 3.39 – Закодовані параметри категорії знаки сервісу.

Номер знаку	Код знаку	Номер знаку	Код знаку
6.1	00100000	6.11	10001000
6.2	00111001	6.12	00001110
6.3	10000100	6.13	00001100
6.4	00100001	6.15	00001010
6.5, 6.14	01000110	6.16	00011001
6.6	00000000	6.17	01010110
6.7.1	11000000	6.18, 6.19, 6.21	01010100
6.7.2	10100000	6.20	00011000
6.7.3	11100000	6.22	00001111
6.8	00000010	6.23	00000101
6.9	00001000	6.24	01000000
6.10	10000000	6.12	00001110

Відповідні значення оцінок Хеммінгової віддалі для категорії знаків сервісу наведені в таблиці 3.40.

Таблиця 3. 40 Оцінки Хеммінгової віддалі для категорії знаків сервісу

№	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5, 6.14	6.6	6.7.1	6.7.2	6.7.3	6.8	6.9
6.1	-	25	164	1	102	32	224	128	192	34	40
6.2	25	-	189	24	127	57	249	153	217	59	49
6.3	164	189	-	165	119	132	68	36	100	134	140
6.4	1	24	165	-	103	33	225	129	193	35	41
6.5, 6.14	102	127	119	103	-	70	134	230	166	68	78
6.6	32	57	132	33	70	-	192	160	224	2	8
6.7.1	224	249	68	225	134	192	-	96	32	194	200
6.7.2	128	153	36	129	230	160	96	-	64	162	168
6.7.3	192	217	100	193	166	224	32	64	-	226	232
6.8	34	59	134	35	68	2	194	162	226	-	10
6.9	40	49	140	41	78	8	200	168	232	10	-
6.10	160	185	4	161	198	128	64	32	96	130	136
6.11	168	177	12	169	206	136	72	40	104	138	128
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
6.12	46	55	138	47	72	14	206	174	238	12	6
6.13	44	53	136	45	74	12	204	172	236	14	4

6.15	42	51	142	43	76	10	202	170	234	8	2
6.16	57	32	157	56	95	25	217	185	244	27	17
6.17	118	111	210	119	16	86	150	246	182	84	94
6.18, 6.19, 6.21	116	109	208	117	18	84	148	228	180	86	92
6.20	56	33	156	57	94	24	216	184	248	26	16
6.22	47	54	139	46	73	15	207	175	239	13	7
6.23	37	60	129	36	67	5	197	165	229	7	13
6.24	96	121	196	97	6	64	128	224	160	66	72
6.10	6.11	6.12	6.13	6.15	6.16	6.17	6.18, 6.19, 6.21	6.20	6.22	6.23	6.24
160	168	46	44	42	57	118	116	56	47	37	96
185	177	55	53	51	32	111	109	33	54	60	121
4	12	138	136	142	157	210	208	156	139	129	196
161	169	47	45	43	56	119	117	57	46	36	97
198	206	72	74	76	95	16	18	94	73	67	6
128	136	14	12	10	25	86	84	24	15	5	64
64	72	206	204	202	217	150	148	216	207	197	128
32	40	174	172	170	185	246	228	184	175	165	224
96	104	238	236	234	244	182	180	248	239	229	160
130	138	12	14	8	27	84	86	26	13	7	66
136	128	6	4	2	17	94	92	16	7	13	72
-	8	142	140	138	153	214	212	152	143	133	192
8	-	134	132	130	145	222	220	144	135	141	200
142	134	-	2	4	23	80	90	22	1	11	78
140	132	2	-	6	21	90	88	20	3	9	76
138	130	4	6	-	11	92	94	18	5	15	74
153	145	23	21	11	-	79	77	1	22	28	89
214	222	80	90	92	79	-	2	78	89	83	22
212	220	90	88	94	77	2	-	76	91	81	20
152	144	22	20	18	1	78	76	-	23	29	88
143	135	1	3	5	22	89	91	23	-	10	79
133	141	11	9	15	28	83	81	29	10	-	69
192	192	78	76	74	89	22	20	88	79	69	-

Розподіл значень оцінки Хеммінгової віддалі наведено в діаграмі (рисунк 3.34):

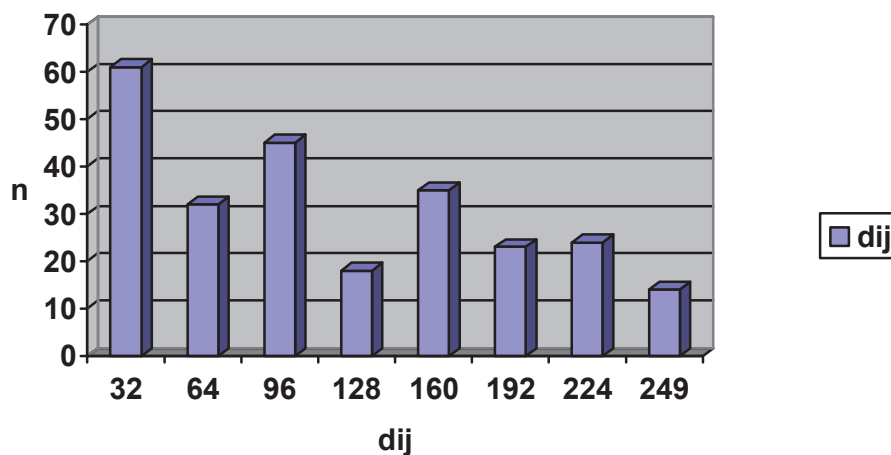


Рисунок 3.34 – Діаграма розподілу значень Хеммінгової віддалі для категорії НЗС

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступні висновки:

- 1) мінімальна Хеммінгова віддаль для даної категорії знаків становить не менше оцінки 32
- 2) максимальне значення для повного набору бази ідентифікації даної категорії знаків становить не більше оцінки 249

Отримані значення оцінки Хеммінгової віддалі дозволяють ідентифікувати зображення даної під категорії, додатково умовою є введення кодування елементів ще не визначених елементів 6.5 і 6.14, а також елементів 6.18, 6.19 і 6.21. Ввівши додаткове 2-бітне кодування можна однозначно ідентифікувати дані групи знаків.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що серед класифікованих категорій дорожніх знаків найвищі оцінки Хеммінгової віддалі та інформативності, що дозволяє з високим рівнем надійності їх розпізнавати в автоматизованому режимі є з максимальною оцінкою Хеммінгової віддалі та інформативності у діапазонах: попереджувальні (496 – 4 одиниць; 29); заборонні (476 – 14 одиниць; 2,5); сервісу (249 – 32 одиниць; 0,9); пріоритету (29 – 8 одиниць; 0,9); наказові (29 – 4; 0,7). Проведений аналіз дозволяє встановити в яких категоріях є дорожні знаки з найбільш низькі оцінки Хеммінгової віддалі в категоріях попереджувальні, наказові, пріоритету (4, 4, 8,) , що можуть бути предметом необхідності вдосконалення їх структури та зображення для

підвищення ефективності їх автоматизованого розпізнавання у процесі руху транспортних засобів.

Для покращення якості систем по розпізнаванню образів поставлена задача удосконалення способу автоматичного розпізнавання дорожніх знаків шляхом розширення функціональних можливостей та збільшення інформативності та надійності правильного розпізнавання в умовах завад.

Така задача вирішується завдяки тому, що спосіб передавання та приймання інформації для автоматизованого розпізнавання дорожніх знаків, при якому в місці просторового розміщення знаку формуються характеристика образу категорії та типу знаку у вигляді сигналів відповідного коду, а в кабіні транспортного засобу автоматизовано приймається, відображається на дисплеї символ знаку та супроводжується аудіоповідомленнями про особливі характеристики знаку, в якому додатково з поверхні місця установки знаку, генерують цифровий код його категорії та типу, у крипто - та завадо - захищеному від помилок рекурентному коді Галуа, який розпізнається та ідентифікується на моніторі водія транспортного засобу шляхом порівняння отриманого коду з еталонними кодами всіх категорій та типів стандартних дорожніх знаків.

На Рисунку 3.35 зображена система передавання та приймання інформації для дорожніх знаків де: 1 – дорожній знак; 2 – відновлювальне джерело живлення; 3 – генератор коду; 4 – випромінювач коду; 5 – канал зв'язку; 6 – транспортний засіб; 7 – приймач сигналів; 8 – пристрій порівняння отриманого коду з еталонним; 9 – пристрій аудіо- та відео- відображення типу знаку.

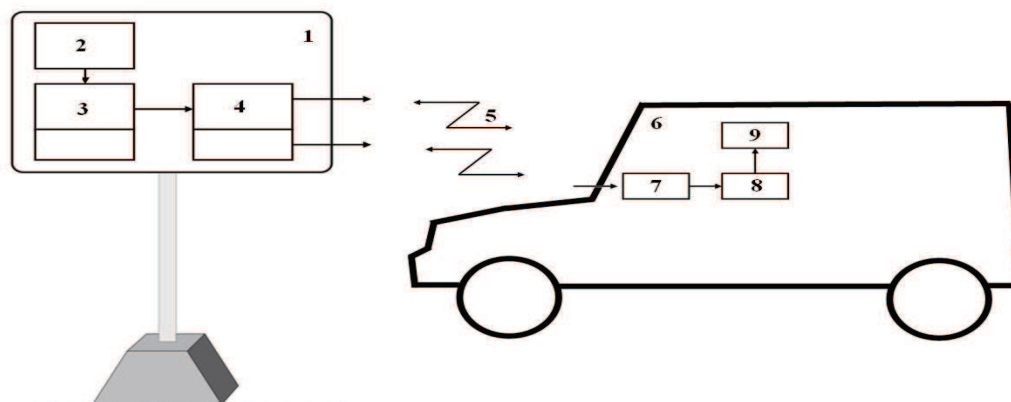


Рисунок 3.35 – Система розпізнавання дорожніх знаків

Вдосконалення способу пояснюється тим, що при передаванні та прийманні коду дорожнього знаку будь-якого стандартного типу у вигляді електричних або оптичних сигналів та додаткове відображення символу знаку на моніторі водія транспортного засобу та аудіо повідомлення його характеристики дозволяє розширити функціональні можливості, підвищити надійність та інформативність розпізнавання дорожніх знаків.

Таким чином, згідно додаткового введення генерування та дистанційного передавання коду дорожнього знаку, його автоматизоване розпізнавання та відображення з можливістю надійної ідентифікації його типу в умовах дії атмосферних завад, при наявності поганої видимості, дощу, снігу, туману, пилу, просторового розміщення та якості зображення дорожнього знаку, що дозволило підвищити безпеку руху транспорту на автошляхах та автомагістралях.

Порівняння запропонованої системи з відомими наведено в таблиці 3.41.

Таблиця – 3.41 Порівняльна таблиця систем розпізнавання дорожніх знаків

Система розпізнавання дорожніх знаків	Переваги	Недоліки
Системи розпізнавання дорожніх знаків в автомобілях преміум класу	1. Якісно розпізнають знаки. 2. Мають досконалі засоби повідомлення водія.	1. Дуже дорогі 2. Працюють лише з обмеженою кількістю знаків
Системи на базі мобільних пристроїв	1. Мають велику кількість функціональних можливостей для розпізнавання дорожнього знаку 2. Дешеве обладнання	1. Може розпізнавати малу кількість знаків 2. Не якісне детектування дорожнього знаку
Системи розпізнавання кольору і форми дорожнього знаку	1. Дозволяють чітко визначити категорію дорожнього знаку	1. Розпізнають малу кількість дорожніх знаків 2. Дуже чутливі до зовнішніх завад. 3. Часто допускають помилки при розпізнаванні
Алгоритм масштабно-інвертованих перетворень ознак	1. Дозволяє розпізнавати додаткові ознаки дорожнього знаку	1. Виникають помилки детектування дорожнього знаку 2. Чутливий до якості дорожнього знаку

		3. Залежить від швидкості руху автомобіля
Системи на основі нейронних мереж для порівняння шаблонів	1. Мають велику базу для розпізнавання знаків різних категорій	1. Чутливі до різного роду спотворень зображень 2. Мають громіздку структуру 3. Довгий час роботи
Розроблена система дорожніх знаків	1. Працює з великою кількістю знаків різних категорій 2. Враховує інформативні ознаки, що зменшує структуру 3. Має високу швидкість опрацювання 4. Виявляє знаки, що можуть невірно детектуватися 5. Дозволяє використання вбудованих кодів	

Аналіз результатів дозволив встановити що розроблена система володіє рядом переваг у порівнянні з відомими системами розпізнавання дорожніх знаків і надає рекомендації для покращення структур дорожніх знаків, а також дозволяє швидко та якісно розпізнавати існуючі знаки.

3.4 Алгоритми та функціональні схеми спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі між сигналами та цифровими даними

Функціональна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі в унітарному ТЧБ представлена на рисунку 3.36:

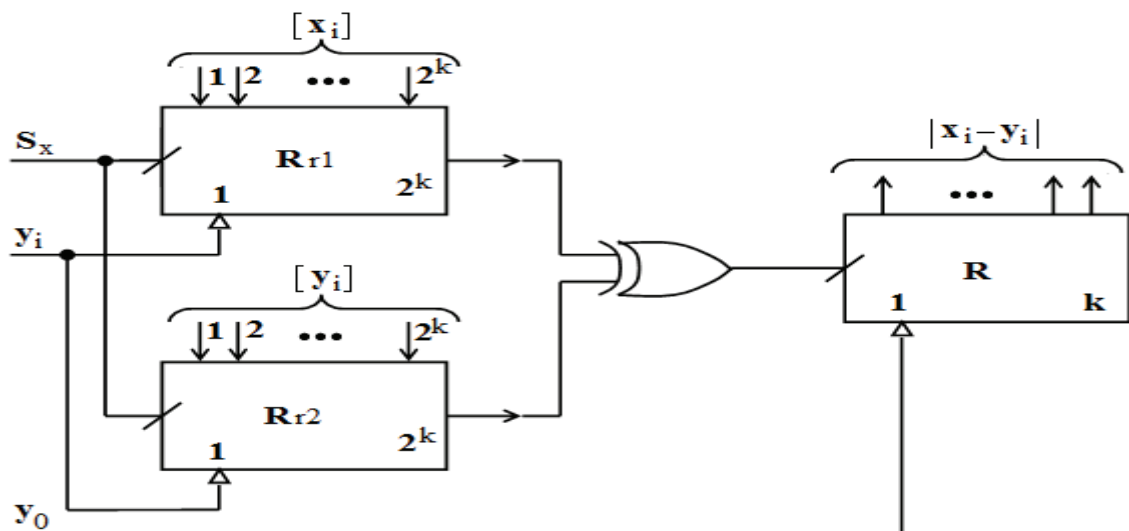


Рисунок 3.36 – Функціональна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі в унітарному ТЧБ

Пристрій містить: S_x вхід синхронізації; перший регістр унітарного коду $[X]$; другий регістр унітарного коду $[Y]$; логічний елемент “Виключаюче АБО”; R – синхронний лічильник на JK-тригерах [153,154].

Блок схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі в унітарному ТЧБ (рисунок 3.37):

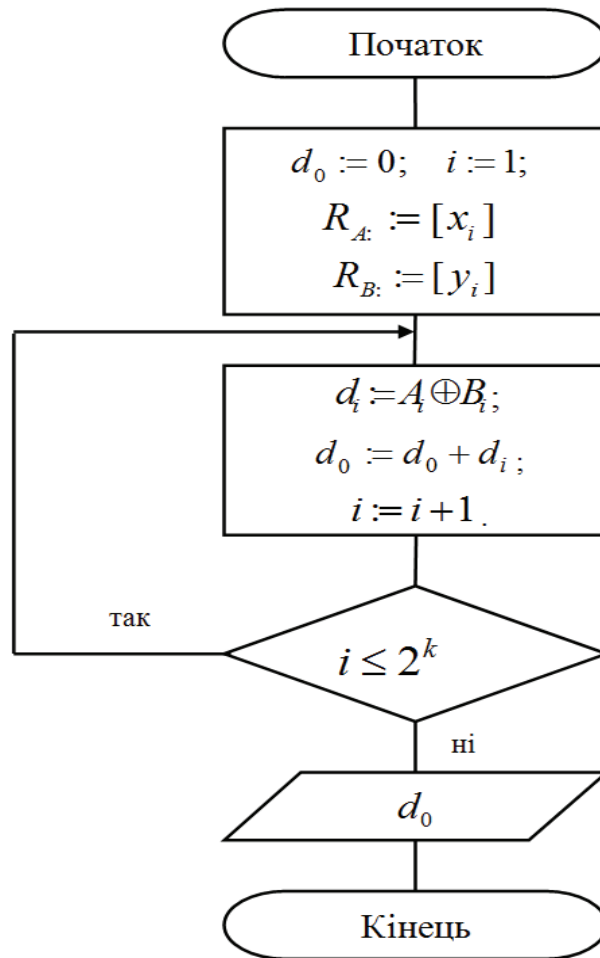


Рисунок 3.37 – Блок схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі в унітарному ТЧБ

Алгоритм роботи блок-схеми наступний:

1. Присвоєння початкового значення сумі;
2. Присвоєння значень першого та другого регістра унітарних кодів;
3. Визначення модульної різниці на логічному елементі “Виключаюче АБО”;
4. Накопичення суми модульних різниць на лічильнику;
5. забезпечення циклу виконання логічних операцій;
6. Вивід оцінки Хеммінгової віддалі.

Функціональна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі у ТЧБ Радемахера представлена на рисунку 3.38 [154]:

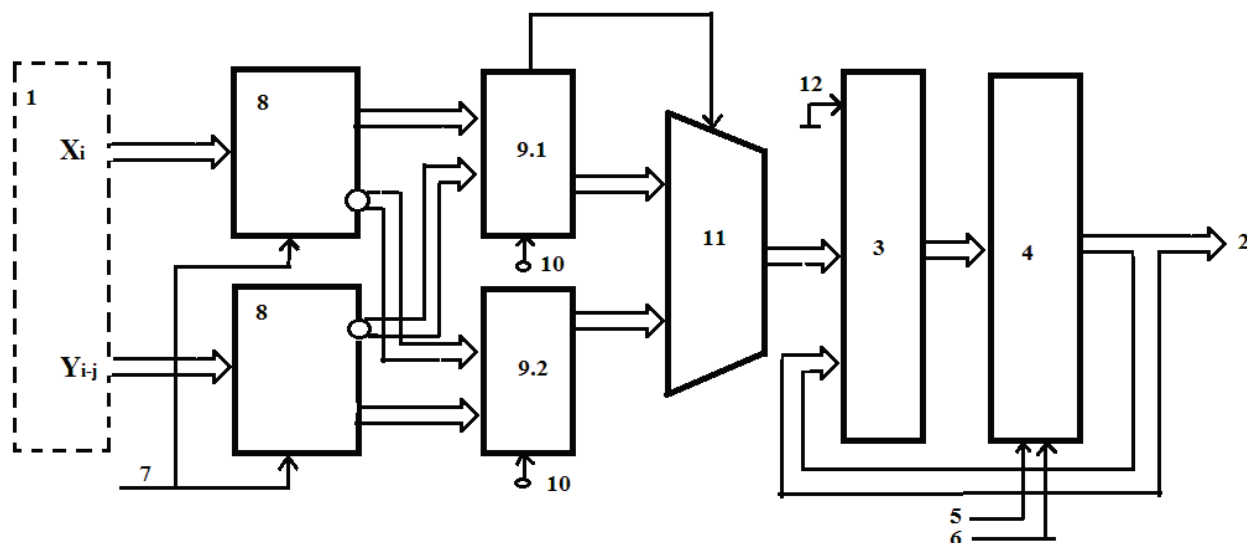


Рисунок 3.38 – Функціональна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі у ТЧБ Радемахера

На рисунку 3.37 представлена схема спецпроцесора: 1 – вхідна $2k$ -розрядна шина (a_0, a_1, \dots, a_{n-1} та b_0, b_1, \dots, b_{n-1} – відповідні входи x_i та y_i багаторозрядних двійкових чисел); 2 – вихідна $k + m$ -розрядна шина; 3 – $k + m$ -розрядний накопичуючий суматор; 4 – $k + m$ -розрядний паралельний регістр; 5 – перший вхід синхронізації запису; 6 – другий вхід синхронізації скиду у нуль; 7 – третій вхід синхронізації запису; 8 – D -тригери $2k$ -розрядного паралельного регістра; 9.1 та 9.2 – однорозрядні повні суматори відповідно першого та другого k -розрядних суматорів; 10 – вхід логічної одиниці; 11 – розрядні компоненти мультиплексора; 12 – вхід логічного нуля.

Блок схема алгоритму Радемахера (рисунок 3.39).

Алгоритм роботи методу наступний:

1. Початок циклу роботи визначення Хеммінгової віддалі між кодovими характеристиками цифрових сигналів.

2. Ввід поточних значень цифрових двійкових кодів базису Радемахера $x_i = (a_{k-1}, \dots, a_1, a_0)$, $y_i = (b_{k-1}, \dots, b_1, b_0)$.

3. Формування інверсних двійкових кодів $\overline{x_i}$, $\overline{y_i}$.

4. Додавання прямих та доповнюючих кодів цифрових значень x_i та y_i , а також біту переривання розрядної сітки $z = 0 \vee 1$.

5, 6, 7. Визначення прямого коду модульної різниці між цифровими значеннями x_i та y_i .

8. накопичення суми модульних різниць.

9, 10. Організація циклу обчислень.

11. Вивід оцінки Хеммінгової віддалі.

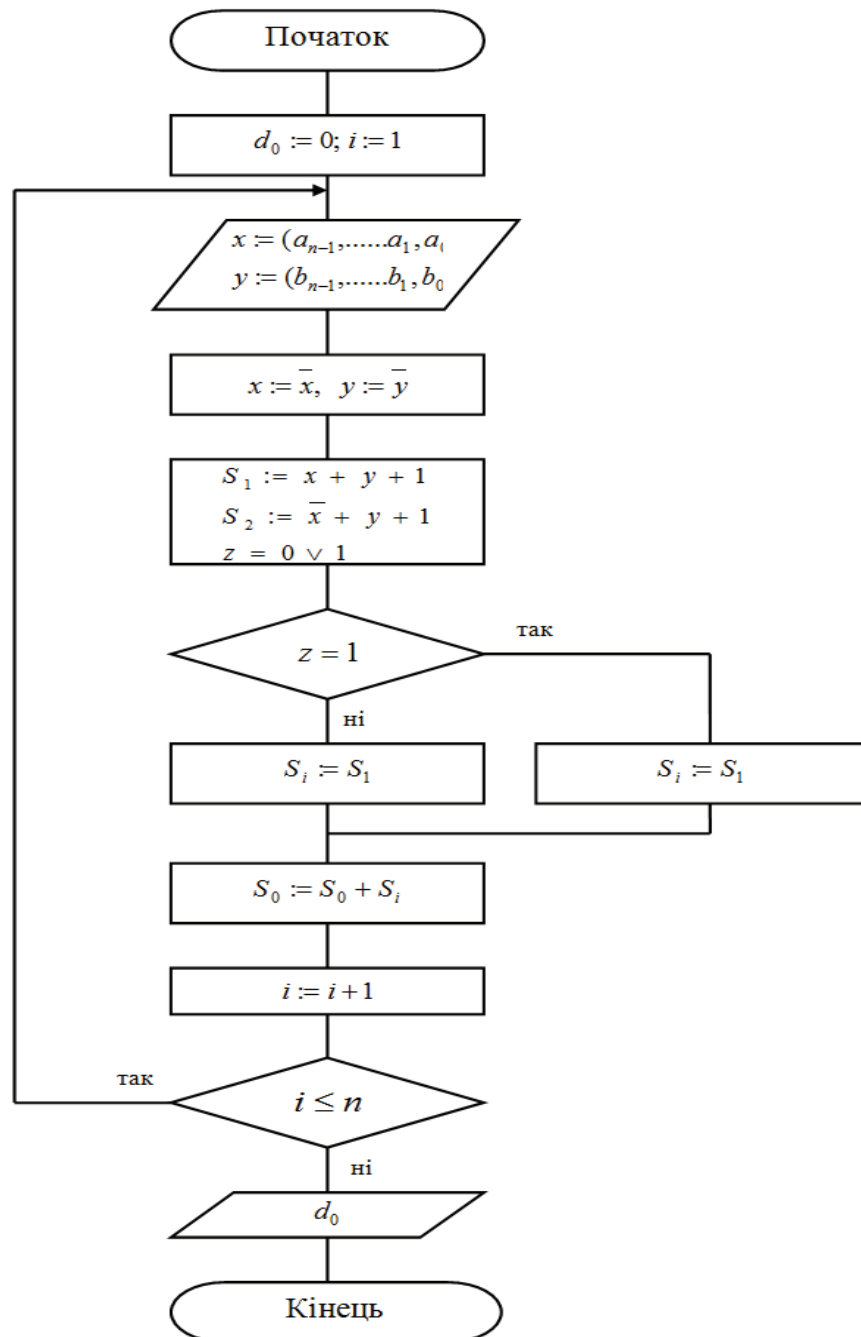


Рисунок 3.39 – Блок схема алгоритму Радемахера

Алгоритм роботи пристрою наступний: Наприклад: $x_i = 11_{(10)} = 1011_{(2)}$;
 $y_i = 17_{(10)} = 10001_{(2)}$.

Нехай $x_i - y_i$, тоді число x_i представляється у прямому нормалізованому коді з фіксованою комою, а y_i у доповнюю чому коді:

$$x_i = 0,01011; [y_i]_{\text{дон}} = 1,01111.$$

$$\text{Додаємо } x_i + [y_i]_{\text{дон}} = 0,01011 + 1,01111 = 1,11010.$$

Тобто результат від'ємний у доповнюючому коді, оскільки у знаковому розряді одиниця і такий код не поступає на вихід мультиплексора 11.

Нехай $y_i - x_i$, тоді число y_i представляється у прямому нормалізованому коді з фіксованою комою, а x_i у доповнюю ому коді:

$$y_i = 0,10001; [x_i]_{\text{дон}} = 1,10101.$$

$$\text{Додаємо } y_i + [x_i]_{\text{дон}} = 0,10001 + 1,10101 = 0,00110.$$

Тобто результат додатний у прямому коді оскільки у знаковому розряді нуль і цей код відповідає модульній різниці $|x_i - y_i|$ і поступає на вихід мультиплексора 11.

Таким чином, запропонований пристрій характеризується розширеними функціональними можливостями, оскільки забезпечується визначення усередненого значення суми модульних різниць вибірки двох потоків двійкових чисел незалежно від того, яке з чисел більше або менше.

На рисунку 3.40 представлена функціональна схема пристрою, який містить: 1 – синхронізатор; 2 – перший та другий АЦП; 3 – логічні елементи АБО; 4 – логічні елементи І; 5 – логічні елементи Виключаюче АБО; 6 – шифратор; 7 – повний суматор; 8 – багаторозрядний накопичуючий суматор; 9 – вихідна шина пристрою.

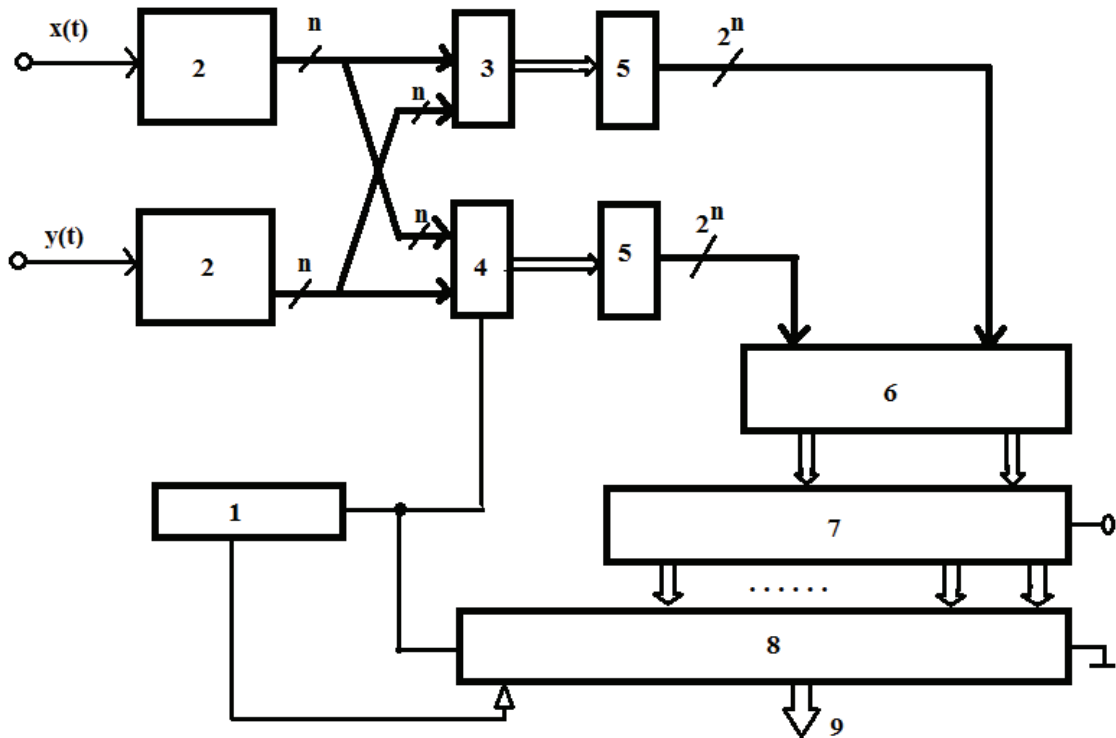


Рисунок 3.40 - Функціональна структура пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами

Алгоритм виконання блок-схеми наступний:

1. Ввід аналогових сигналів $x(t)$ та $y(t)$;
2. Перетворення аналогових сигналів $x(t)$ та $y(t)$ в унітарні цифрові коди з округленням до меншого цілого $\tilde{E}[\bullet]$, з кроком квантування по амплітуді $\delta = \frac{1}{2^k}$ у межах діапазону квантування: $0 \leq x_i \leq 2^k; 0 \leq y_i \leq 2^k$, k – розрядність АЦП;
3. Формування масивів цифрових даних $[\{x_i\}], [\{y_i\}]$ в унітарному ТЧБ;
4. Початок циклу накопичення сум d_0 , та завдання індексу початку циклу;
5. Логічне визначення більшого $[a_i]$ та меншого $[b_i]$ двох унітарних кодів;
6. Перетворення паралельних унітарних кодів $[a_i]$ та $[b_i]$ у відповідні інверсні коди теоретико-числового базису Хаара $\bar{H}([a])_i$ і $\bar{H}([b])_i$;
7. Перетворення унітарних кодів Хаара $\bar{H}([a])_i$ у прямий код базису Радемахера $R(a)_i$, а код $\bar{H}([b])_i$ в інверсний код базису Радемахера $R(\bar{b})_i$;

8. Визначення сум прямого та зворотнього двійкових кодів базису Радемахера $R(a)_i$ та $R(\bar{b})_i$ плюс одиниця формування доповнюючого коду, що відповідає прямому коду модульної різниці між цифровими значеннями аналогових сигналів $x(t)$ та $y(t)$;
9. Накопичення поточної суми модульних різниць оцінки Хеммінгової віддалі між сигналами
- 10, 11. Формування циклу обчислень Хеммінгової віддалі;
12. Вивід визначеної оцінки Хеммінгової віддалі між аналогових сигналів $x(t)$ та $y(t)$.

Алгоритм роботи пристрою визначення Хеммінгової віддалі наступний:

- 1) Перетворення аналогових сигналів $x(t)$ та $y(t)$ у вигляді паралельних унітарних кодів на виході компараторів (U);
- 2) формування паралельних унітарних кодів більшого з двох x_i та y_i на виходах логічних елементів АБО (U);
- 3) формування паралельних інверсних кодів Хаара на виходах логічних елементів І-НЕ (\bar{n});
- 4) формування паралельного коду Радемахера $y^>$ та інверсного паралельного коду Радемахера $x^<$ на виходах логічних елементів І-НЕ (R);
- 5) виконання операції додавання прямого коду y_i , інверсного коду \bar{x}_i та одиниці доповнюючого коду [89,156];
- 6) накопичення суми отриманого коду Радемахера.

Отже, в даному розділі розроблені алгоритми та функціональні схеми спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі, між сигналами та цифровими даними, які характеризуються покращеними системними характеристиками структурною, апаратною та часовою складністю. Виходячи з вище сказаного розроблені методи доцільно використовувати для визначення Хеммінгової віддалі, які дозволяють підвищити ефективність розпізнавання образів шляхом класифікації та оцінки інформативності їх компонентів.

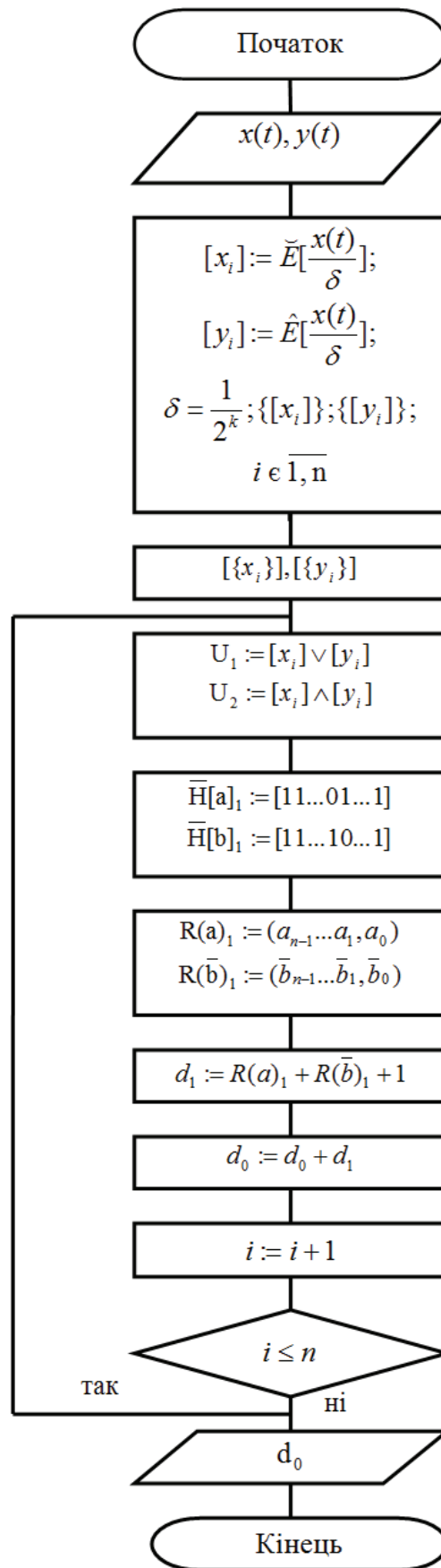


Рисунок 3.41 – Блок-схема пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами

Висновки до третього розділу.

1. Розроблений метод оцінки Хеммінгової віддалі між образами на основі оцінки характеристик структурної складності та інформативності, який дозволив розширити можливості підвищення ефективності, якості та роздільності розпізнавання образів з низькими оцінками Хеммінгової віддалі.

2. Розроблений метод оцінки розширеної Хеммінгової віддалі для просторових об'єктів, які базуються на аналізі структурної складності компонентів зображень, що дозволив підвищити ефективність розпізнавання образів шляхом класифікації та оцінки інформативності їх компонентів.

3. Здійснений аналіз кодування та визначення Хеммінгової віддалі для реалізації розпізнавання дорожніх знаків різних категорій, на основі запропонованої системи кодування характеристик образів, що дозволив комп'ютеризувати процеси автоматизованого розпізнавання під час руху дорожно-транспортних засобів.

4. Розроблені алгоритми та функціональні схеми спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі, між сигналами та цифровими даними, які характеризуються покращеними системними характеристиками структурною, апаратною та часовою складностями.

РОЗДІЛ 4.

РОЗРОБКА ТА МІКРОЕЛЕКТРОННА РЕАЛІЗАЦІЯ УДОСКОНАЛЕНИХ
СПЕЦПРОЦЕСОРІВ ОЦІНКИ ХЕММІНГОВОЇ ВІДДАЛІ МІЖ
ОЦИФРОВАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБРАЗІВ

4.1. Пристрій додавання багаторозрядних двійкових чисел.

Визначення Хеммінгової віддалі можна виконувати безпосередньо над двійковими кодами базису Радемахера. У цьому випадку розрядність кодів для обчислення Хеммінгової віддалі зменшується до величини $\log_2 n$ у порівнянні з унітарним ТЧБ.

Спецпроцесор, який виконує операцію визначення Хеммінгової віддалі реалізується на основі багаторозрядного суматора.

Розроблена структура спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі між кодами, представленими в унітарному ТЧБ, яка показана на рисунку 4.1 [22]

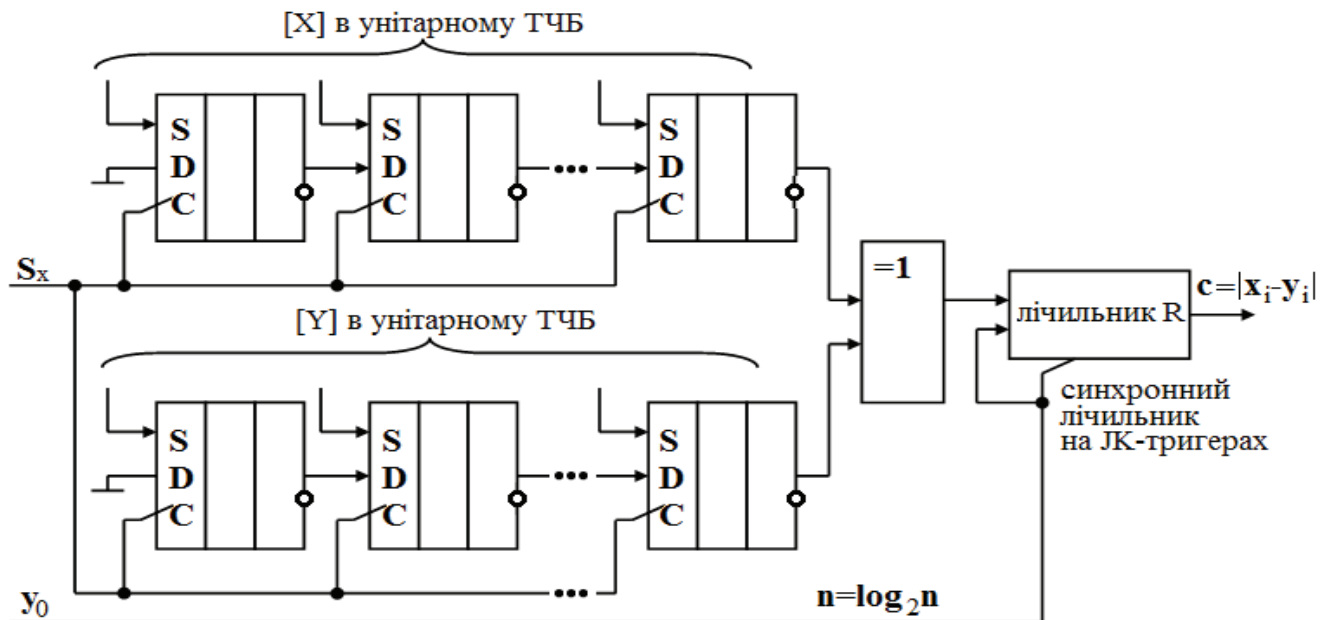


Рисунок 4.1. - Спецпроцесор сканування та визначення Хеммінгової віддалі між кодами представленими в унітарному ТЧБ перетворення у двійковий код Радемахера

Пристрій містить: S_x вхід синхронізації; перший регістр унітарного коду $[X]$; другий регістр унітарного коду $[Y]$; логічний елемент “Виключаюче АБО”; R – синхронний лічильник на JK-тригерах.

Пристрій працює наступним: на початку циклу обчислень в регістр пам'яті на D-тригерах по S-входах записуються цифрові унітарні коди характеристик об'єктів $[x_i]$ та $[y_i]$. Під дією сигналів синхронізації S_x , які подаються на С-входи синхронізації D-тригерів відбувається біт-орієнтований зсув унітарних кодів, які поступають на відповідні входи логічного елемента "Виключаюче АБО", на виході якого формуються цифровий унітарний код модульних різниць $[[x_i]-[y_i]]$. Отримані значення модульних різниць поступають на лічильник R базису Радемахера, в якому накопичується сума модульних різниць оцінок Хеммінгової віддалі між цифровими характеристиками об'єктів $[x_i]$ та $[y_i]$ заданими в унітарному теоретико-числовому базисі.

Апаратна складність елементів спецпроцесора складає: "Виключаюче АБО" – $2 \div 5 \nu$, лічильника – n [155].

Часова складність: "Виключаюче АБО" – $1 \div 3 \nu$, лічильника – 2ν ; регістра – $2 \cdot 2^n \nu$.

Функціональними обмеженнями такої структури спецпроцесора є низька швидкодія, оскільки для визначення Хеммінгової віддалі у двійковому коді базису Радемахера потрібно виконати n зсувів інформаційних кодів у регістрах, реалізованих на D-тригерах. При цьому часова складність, обумовлена затримкою сигналів у D-тригерах, логічному елементі "Виключаюче АБО" та двійковому лічильнику складає: $\tau = 2 \cdot 2^n + 3 + 2$. При $n=8$ отримаємо $\tau = 2 \cdot 2^8 + 3 + 2 = 518\nu$ (мікротактів).

Діаграма часової складності спецпроцесора в залежності від розрядності зображена на рисунку 4.2

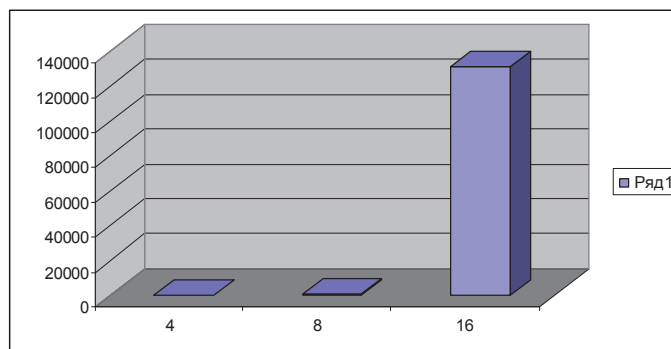


Рисунок 4.2 - Діаграма часової складності спецпроцесора в залежності від розрядності

Перспективним рішенням створення спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі є його схемо технічна реалізація у кодах базису Радемахера [22].

Відомий пристрій визначення Хеммінгової віддалі шляхом додавання багаторозрядних двійкових чисел, визначення залишку по модулю багаторозрядного числа, який містить вхідну і вихідну шини, які є відповідно m -розрядними входами і n -розрядними виходами пристрою, в кожному розряді пристрою міститься однорозрядний суматор та D-тригер, вхід якого з'єднаний з відповідним розрядом вхідної шини, входи синхронізації об'єднані між собою і є другим входом пристрою, вихід суми найстаршого розряду суматора з'єднаний з третім входом мультиплексора (рисунок 4.3) [157].

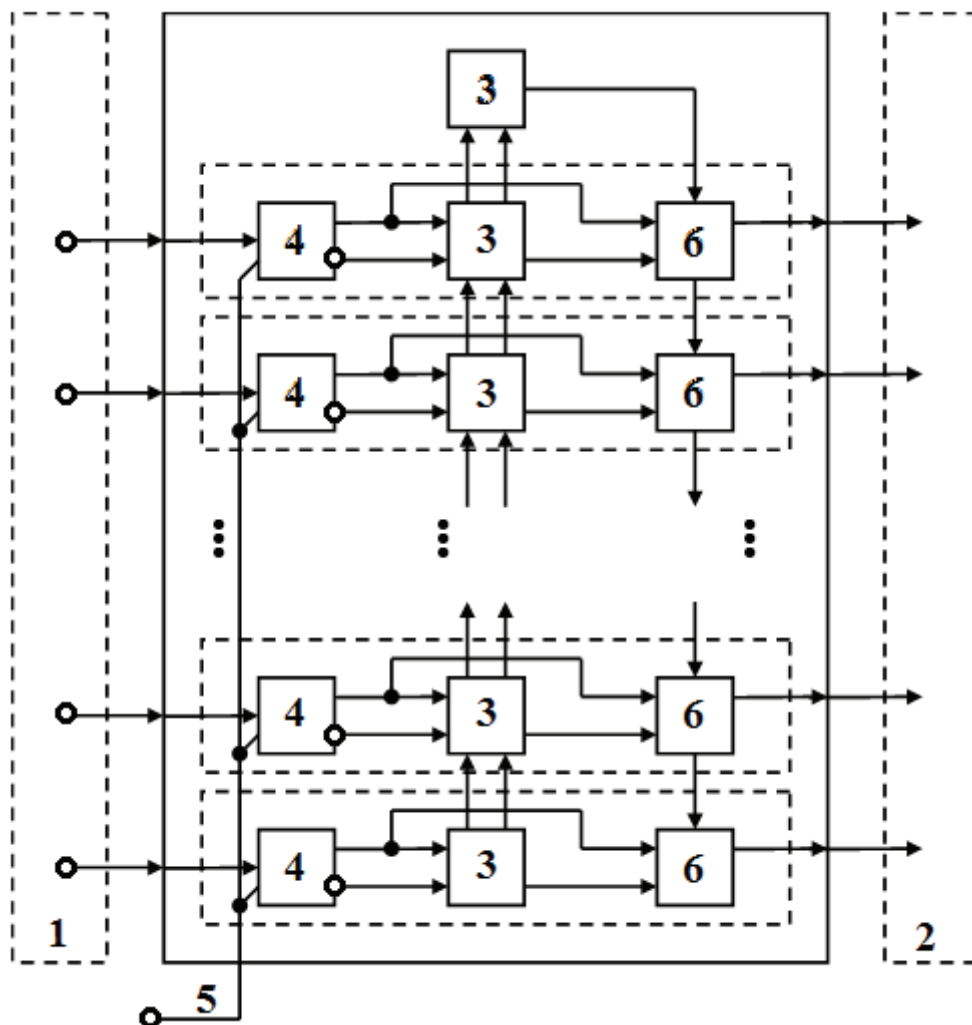


Рисунок 4.3 - Пристрій визначення Хеммінгової віддалі шляхом додавання багаторозрядних двійкових чисел, визначення залишку по модулю багаторозрядного числа

Пристрій ілюструється кресленнями, де на рисунку 4.4 зображена структурна схема пристрою: 1 - вхідна шина, 2 - вихідна шина, 3 - спеціалізований однорозрядний суматор, 4-D-тригер, 5 – вхід синхронізації, 6 - мультиплексор.

Пристрій працює наступним чином. На початку роботи пристрою вхідний код даних a ($0 < a \leq 2P - 1$) подається на вхідну шину пристрою 1. Після подачі сигналу синхронізації у вигляді фронту наростання на вхідну шину 5 вхідний код даних записується в тригер 4 відповідного розряду суматора 3. Вихідні коди тригерів подаються на відповідні входи нульових чи одиничних спеціалізованих однорозрядних суматорів відповідного доповнюючого коду модуля P_d . У результаті підсумовування вхідного коду з кодом P_d та всіх наскрізних переносів у суматорах пристрою на виході $2k$ знакового розряду однорозрядного суматора (S_k) формується потенціал: 0, якщо $a \geq P$, тоді $b = (a + P_0) \bmod P$, інакше $a < P$ і $b = a$. Отриманий код b з виходів мультиплексорів 6 надходить на вихідну шину пристрою 2.

Недоліком такого пристрою є обмежені функціональні можливості обумовлені тим, що він здійснює визначення модульної різниці між двома двійковими числами тільки у випадку коли перше більше число представлено прямим двійковим кодом, а друге менше число, яке представлено доповнюючим кодом і не дозволяє накопичувати усереднене значення суми вибірки двох потоків двійкових чисел.

Інший відомий пристрій, який може виконувати функції визначення Хеммінгової віддалі, містить n - розрядну вхідну шину, $k+m$ – розрядну вихідну шину, $k+m$ – розрядний накопичуючий суматор, виходи якого з'єднані з першими входами $k+m$ - розрядного паралельного регістра, другий вхід якого з'єднаний з входом синхронізації запису, а виходи з'єднані з входами накопичуючого суматора і з виходами пристрою (рисунок 4.4).

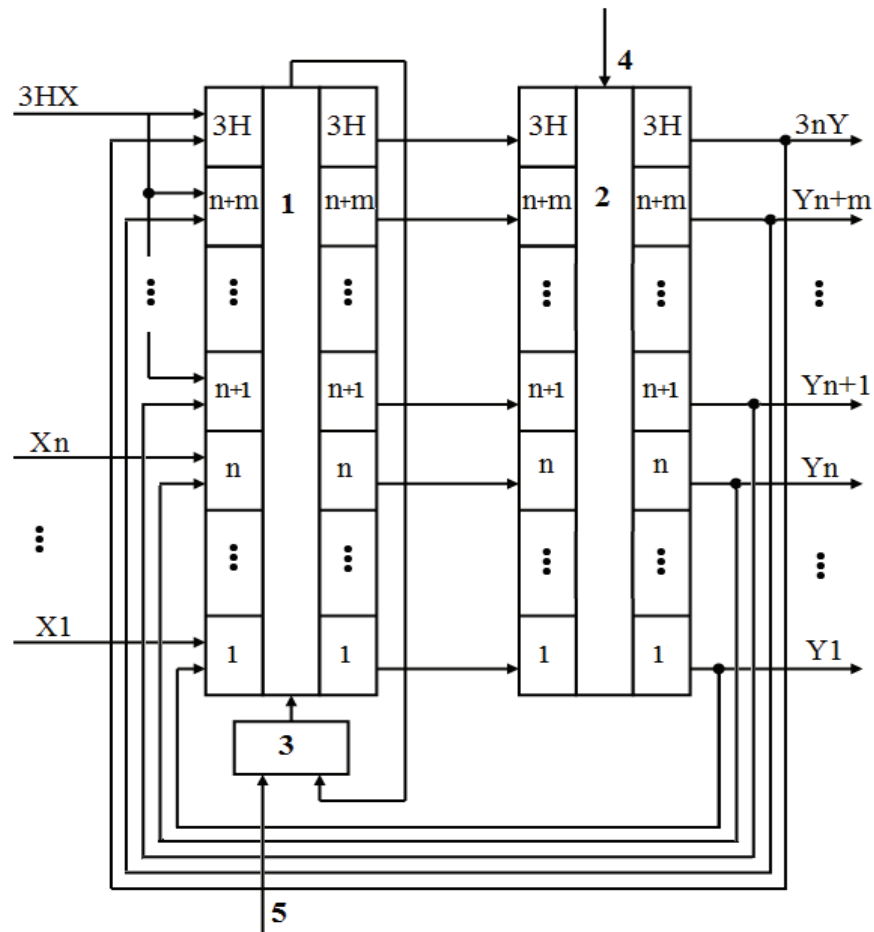


Рисунок 4.4 - Пристрій, який може виконувати функції визначення Хеммінгової віддалі,

Недоліком такого пристрою є обмежені функціональні можливості обумовлені тим, що даний пристрій не дозволяє накопичувати усереднене значення модульних різниць вибірки двох потоків двійкових чисел.

Суть запропонованого схеми технічного рішення спеціального процесора визначення Хеммінгової віддалі полягає у тому, що для накопичення усередненої суми модульних різниць двох потоків двійкових чисел здійснюється одночасне додавання їх прямих та доповнюючих кодів у двох додатково введених суматорах, логікою переносу старшого розряду одного з суматорів та мультиплексором визначаються прямі коди модульних різниць між двома двійковими числами, які додаються n разів у накопичувальному суматорі та шляхом віднімання n – числа молодших розрядів формується вихідний m – розрядний двійковий код оцінки Хеммінгової віддалі між двома дискретизованими випадковими процесами ($m = \log_2 n$). [22,156]

На рисунок 4.5 представлена схема пристрою, де: 1 – вхідна $2k$ - розрядна шина a_0, a_1, \dots, a_{n-1} та b_0, b_1, \dots, b_{n-1} – відповідні входи x_i та y_i багаторозрядних двійкових чисел); 2 – вихідна $k+m$ – розрядна шина; 3 – $k+m$ – розрядний накопичуючий суматор; 4 – $k+m$ – розрядний паралельний регістр; 5 – перший вхід синхронізації запису; 6 – другий вхід синхронізації скиду у нуль; 7 – третій вхід синхронізації запису; 8 – D - тригери $2k$ - розрядного паралельного регістра; 9.1 та 9.2 – однорозрядні повні суматори відповідно першого та другого k - розрядних суматорів; 10 – вхід логічної одиниці; 11 – розрядні компоненти мультиплексора; 12 – вхід логічного нуля.

Пристрій працює наступним чином. На початку роботи пристрою після подачі сигналу синхронізації у вигляді фронту наростання на вхід синхронізації 6 скиду у нуль $k+m$ – розрядного паралельного регістра 4 на вихідній $k+m$ – розрядній шині 2 формується двійкове число нуль, яке також поступає на перші входи $k+m$ – розрядного накопичуючого суматора 3. [154,156]

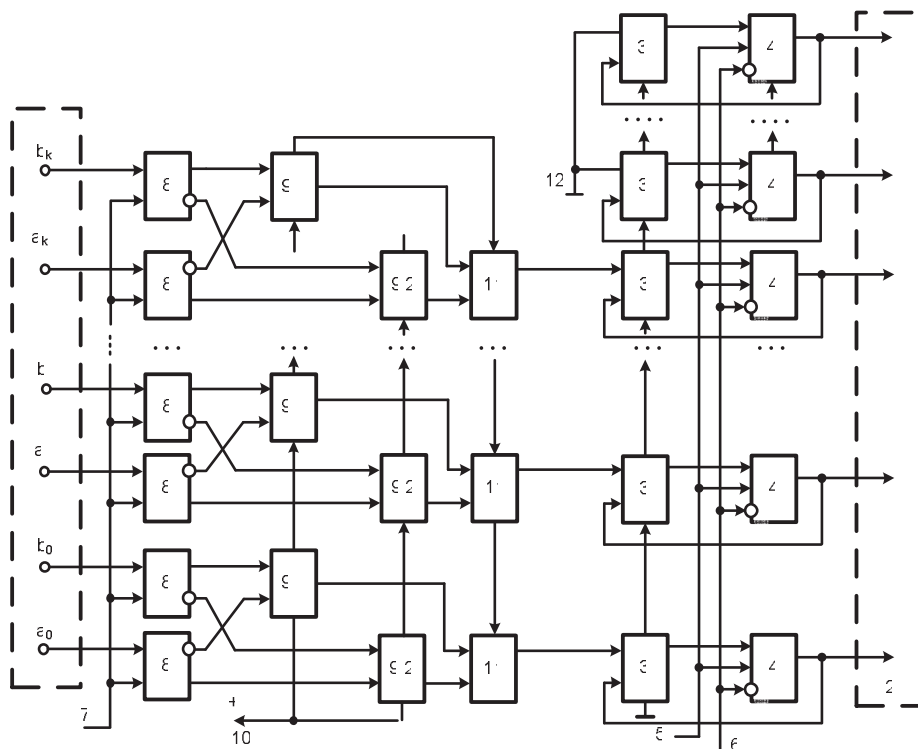


Рисунок 4.5 - Структурна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі у ТЧБ Радемахера.

Після подачі аналогічного сигналу на вхід синхронізації 7 вхідні двійкові числа x_i та y_i записуються у D - тригери $2k$ - розрядного паралельного регістра. Вихідні прямі та інверсні коди тригерів подаються на відповідні перші та другі

входи першого 9.1 та другого 9.2 k - розрядних суматорів. У результаті логічними сигналами переносу у старшому розряді суматора 9.1, який поступає на керуючий вхід мультиплектора на його виходах формуються прямі коди модульних різниць між двома двійковими числами $|x_i - y_i|$, які подаються на входи $k + m$ - розрядного накопичуючого суматора 3, де додаються до коду, який сформований на виходах $k + m$ - розрядного паралельного регістра 4, а отримана на виходах суматора 3 сума записується і запам'ятовується у регістрі 4. Після n - циклів роботи пристрою, отриманий у регістрі 4 код суми модульних різниць двійкових чисел надходить на вихідну $k + m$ - розрядну шину у вигляді $k + m - n$ - розрядного двійкового коду, починаючи зі старших розрядів паралельного регістра 4. [22,156]

Наявність входу логічної одиниці на входах переносу нульових розрядів суматорів 9.1 та 9.2 дозволяє одночасно з формуванням зворотніх кодів двійкових чисел \bar{x}_i та \bar{y}_i на інверсних виходах D - тригерів $2k$ - розрядного паралельного регістра 8 формувати їх доповнюючі коди на входах суматорів 9 без додаткових операцій формування доповнюючого коду.

Якщо на виході переносу старшого розряду суматора 9.1 формується логічна «1», це означає, що число $x_i > y_i$ і на виході першого суматора 9.1 формується код модульної різниці $|x_i - y_i|$, який з виходу мультиплектора поступає на другі входи накопичуючого суматора 3. Якщо на такому виході формується логічний «0», це означає що число $x_i < y_i$, то на виході суматора 9.1 формується результат у вигляді доповнюючого коду, який не поступає на вихід мультиплектора 11. При цьому на вихід мультиплектора 11 поступає прямий код модульної різниці $|x_i - y_i|$ сформований на виході суматора 9.2.

Пристрій складається з наступних елементів:

- Регістр пам'яті на D -тригерах, апаратна складність такого пристрою складає $2v$ (вентелля).
- мультиплексор, апаратна складність якого становить $4v$ (вентеля).
- повні суматори, апаратна складність яких складає від 7 до 13 v (вентелів)
- однорозрядний напівсуматор апаратна складність якого $3v$.

Розрахунок апаратної складності в залежності від k і n (рисунок 4.6 - 4.10):

1. $k=4, n=16$

$$A_{\text{п}} = 2kA_t + kA_M + 3kA_{ps} + kA_{ns} + 2kA_t = 4kA_t + kA_M + 3kA_{ps} + kA_{ns};$$

$$A_{\text{нк}} = 16 \cdot 2 + 4 \cdot 3 + 12 \cdot 7 + 4 \cdot 3 = 140 \text{ v};$$

$$A_{\text{нр}} = 16 \cdot 2 + 4 \cdot 3 + 12 \cdot 13 + 4 \cdot 13 = 242 \text{ v}.$$

2. $k=8, n=256$

$$A_{\text{нк}} = 32 \cdot 2 + 8 \cdot 3 + 24 \cdot 7 + 8 \cdot 3 = 280 \text{ v};$$

$$A_{\text{нр}} = 32 \cdot 2 + 8 \cdot 3 + 24 \cdot 13 + 8 \cdot 13 = 504 \text{ v}.$$

3. $k=16, n=256$

$$A_{\text{нк}} = 64 \cdot 2 + 16 \cdot 3 + 48 \cdot 7 + 16 \cdot 3 = 560 \text{ v};$$

$$A_{\text{нр}} = 64 \cdot 2 + 16 \cdot 3 + 48 \cdot 13 + 16 \cdot 13 = 1008 \text{ v}.$$

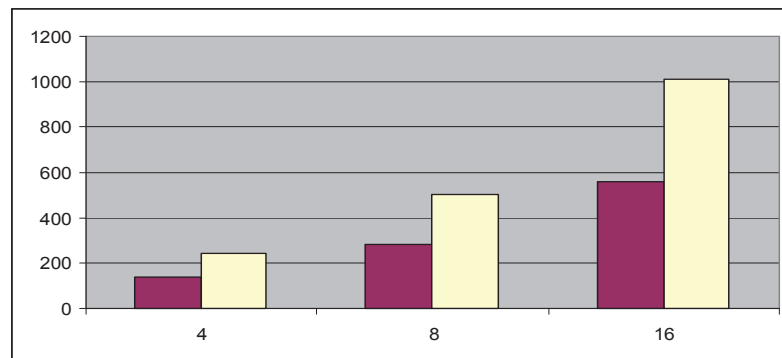


Рисунок 4.6 - Значення апаратної складності при різних n

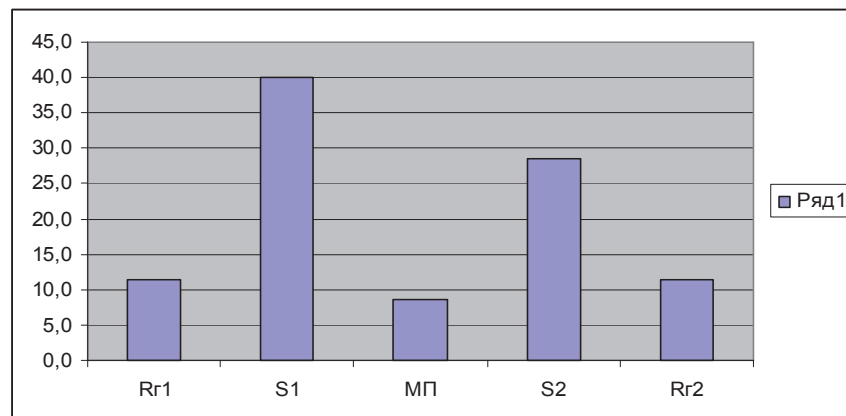


Рисунок 4.7 - Розподіл у відсотках апаратної складності з оптимізованими КОМПОНЕНТАМИ

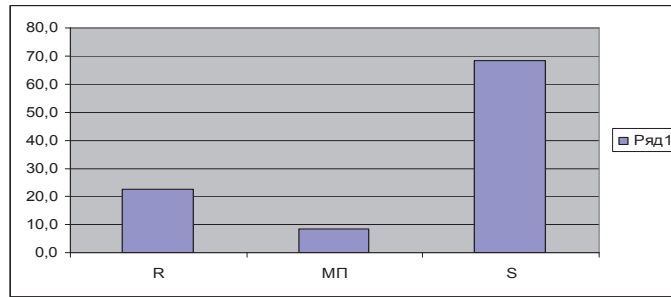


Рисунок 4.8 - Розподіл у відсотках апаратної складності з оптимізованими
КОМПОНЕНТАМИ

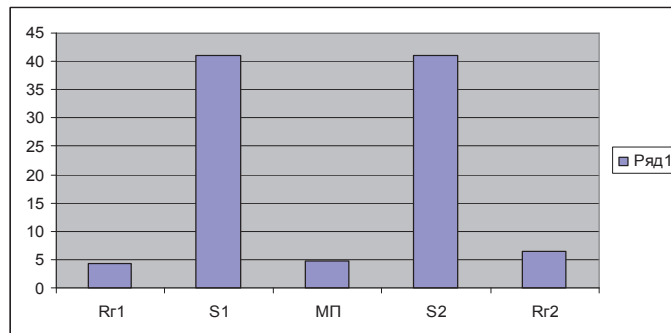


Рисунок 4.9 - Розподіл у відсотках апаратної складності з стандартними
КОМПОНЕНТАМИ

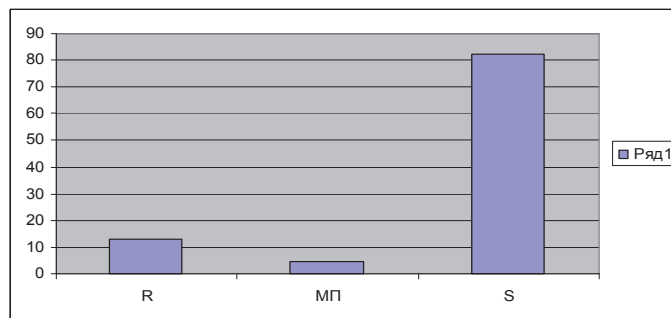


Рисунок 4.10 - Розподіл у відсотках апаратної складності з стандартними
КОМПОНЕНТАМИ

Розрахунок часової складності для запропонованого спецпроцесора складає:

$$\tau = \tau_{D1} + n \cdot \tau_{\tilde{N}} + \tau_{II} + 2n \cdot \tau_{i\tilde{N}} + \tau_{D2}. \quad \text{При } n = 8, \quad \text{отримаємо:}$$

$$\tau = 2 + 8 + 3 + 16 + 2 = 31\nu \quad [156].$$

4.2 Пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами.

Пристрій належить до засобів обчислювальної техніки, призначений для визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами і може бути використаний у якості компонента цифрових процесорів розпізнавання образів.

Пристрій визначення залишку по модулю багаторозрядного числа m , який містить вхідну і вихідну шини, які є відповідно n -розрядними входами і n -розрядними виходами пристрою, в кожному розряді пристрою міститься однорозрядний суматор, прямий вхід переносу якого підключений до прямого виходу переносу суматора молодшого розряду пристрою, а прямий вихід переносу підключений до прямого виходу переносу суматора старшого розряду пристрою. Такий пристрій дозволяє визначити модульну різницю між двома двійковими кодами.

Недоліком такого пристрою є обмежені функціональні можливості, оскільки він не дозволяє визначити Хеммінгову віддаль між двома аналоговими сигналами на основі усередненої суми модульних різниць цифрових двійкових кодів вхідних аналогових сигналів. Іншим недоліком такого пристрою є низька швидкодія та висока апаратна складність обумовлена наявністю мультиплексора у його структурі.

Більш досконалим пристроєм придатним для розрахунку Хеммінгової віддалі є багатоканальний пристрій для обчислення модульної кореляційної функції (рисунок 4.11), який містить синхронізатор, перший аналоговий вхід пристрою з'єднаний з першим входом першого компаратора, другий аналоговий вхід пристрою, який з'єднаний з першим входом другого компаратора, другий вхід якого з'єднаний з другим входом першого компаратора та виходом схеми формування ступінчастих взірцевих потенціалів. Такий пристрій дозволяє визначити усереднену Хеммінгову віддаль між двома поточними аналоговими сигналами та їх Хеммінгову віддаль між двома зсунутими в часі вхідними аналоговими сигналами.

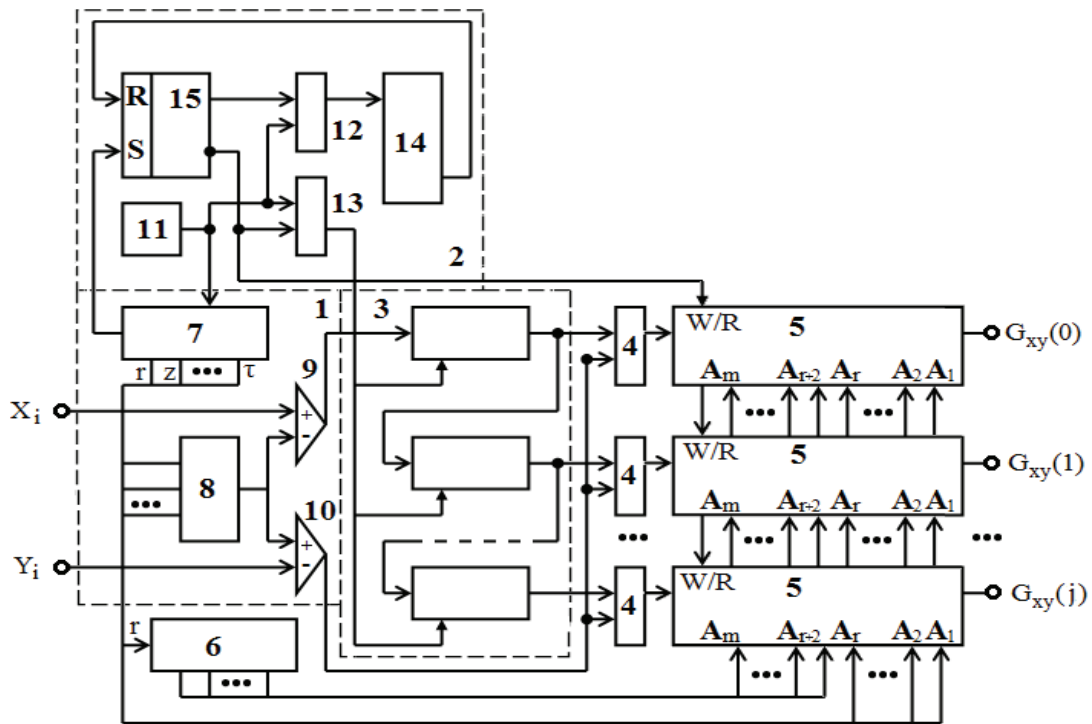


Рисунок 4.11 - Багатоканальний пристрій для обчислення модульної кореляційної функції

В основу удосконалення пристрою поставлена задача підвищення швидкодії визначення накопиченого усередненого значення суми модульних різниць оцифрованих аналогових сигналів, що відповідає оцінці Хеммінгової віддалі між ними згідно виразу:

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|,$$

де: $ic \overline{1..n}$ – об'єм вибірки цифрових кодів; x_i та y_i – вхідні оцифровані аналогові сигнали $x(t)$ та $y(t)$ [127].

Суть удосконалення пристрою полягає в тому, що вхідні аналогові сигнали у додатково введеному двоканальному АЦП паралельного типу перетворюються у паралельні унітарні коди, які однозначно представляють більше та менше значення x_i та y_i , після чого перетворюються у паралельні інверсні розряднопозиційні коди Хаара, де шифруються у відповідні: прямиї двійковий код більшого з них, та доповнюючий код меншого з них, які додаються у швидкодіючому багаторозрядному накопичувальному суматорі.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що пристрій, який містить синхронізатор, перший аналоговий вхід з'єднаний з першим входом першого компаратора i -го розряду, другий аналоговий вхід з'єднаний з першим входом другого компаратора i -го розряду, другий вихід якого з'єднаний з другим входом першого компаратора i -го розряду та першим виходом схеми формування ступінчастих взірцевих потенціалів, в якому додатково введено $2^k - 1$ розрядів, у кожному з яких вихід першого компаратора додатково з'єднаний з першими входами додатково введеного логічного елемента АБО та логічного елемента І, другий вхід якого додатково з'єднаний з другим входом логічного елемента АБО та виходом другого компаратора, вихід логічного елемента АБО додатково з'єднаний з першим входом додатково введеного першого логічного елемента І-НЕ та додатково з'єднаний з входом додатково введеного першого логічного елемента НЕ, вихід якого додатково з'єднаний з першим входом першого логічного елемента І-НЕ i -го розряду, вихід логічного елемента І додатково з'єднаний з першим входом додатково введеного другого логічного елемента І-НЕ i -го розряду та входом додатково введеного другого логічного елемента НЕ, вихід якого з'єднаний з другим входом другого логічного елемента І-НЕ, виходи других логічних елементів І-НЕ з'єднаний з першими входами третіх логічних елементів І-НЕ, виходи яких з'єднані з відповідними першими входами багаторозрядного двійкового суматора, другий вхід якого з'єднаний з логічною одиницею, а виходи з'єднані з відповідними першими входами багаторозрядного накопичувального суматора, другий вхід з'єднаний з першим виходом синхронізатора, другий вихід якого з'єднаний з всіма третіми входами логічних елементів АБО та І, третій вхід якого з'єднаний з входом логічного нуля, а виходи накопичуваного суматора є виходами пристрою [127].

На рисунках 4.12 та 4.13 представлена структурна схема пристрою, який містить: 1 – синхронізатор; 2 – перший аналоговий вхід; 3 – перший компаратор i -го розряду; 4 – другий аналоговий вхід; 5 – другий компаратор i -го розряду; 6 – схема формування ступінчастих взірцевих потенціалів; 7 – вхід схеми формування ступінчатих взірцевих потенціалів; 8 – логічний елемент АБО; 9 – логічний елемент І; 10 – перший логічний елемент І-НЕ; 11 – перший логічний елемент НЕ;

12 – другий логічний елемент І-НЕ; 13 – другий логічний елемент НЕ; 14 – третій логічний елемент І-НЕ; 15 – перший багаторозрядний суматор; 16 – парафазний вхід логічної 1 0; 17 – накопичуваний суматор; 18 – вхід логічного 0; 19 – вхід скиду в 0 накопичуваного суматора; 20 – вхід синхронізації накопичуваного суматора 17; 21 – вихідна шина пристрою [126, 127].

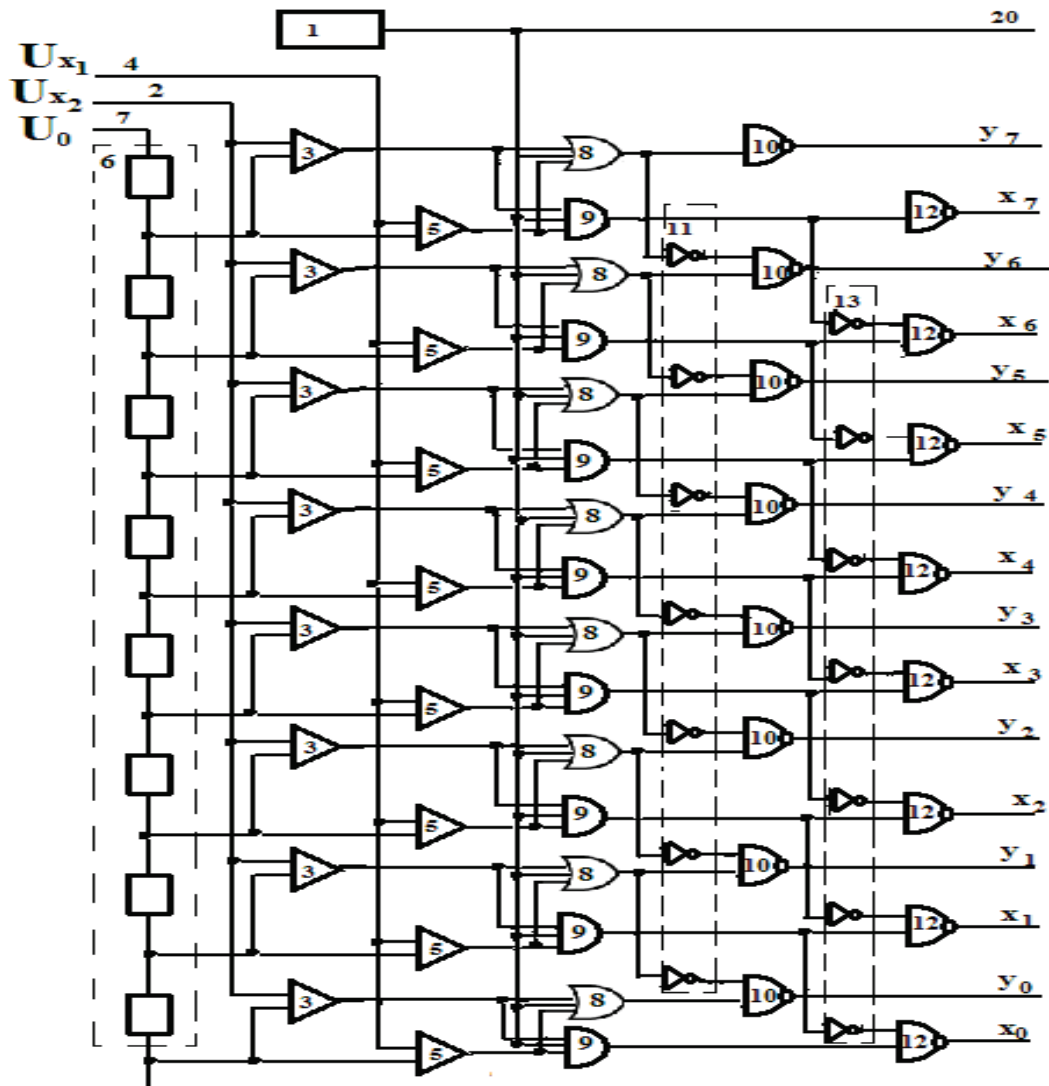


Рисунок 4.12. - Структурна схема пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами (початок).

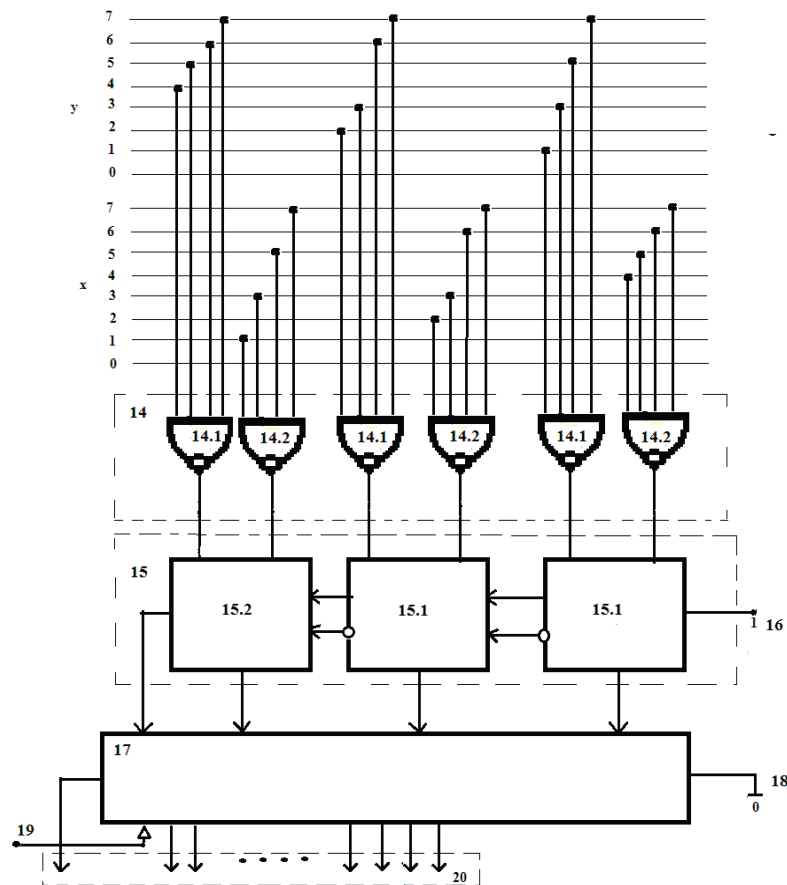


Рисунок 4.13. - Структурна схема пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами (кінець).

Пристрій працює наступним чином: На початку циклу роботи пристрою на першому виході синхронізатора 1 формується сигнал скиду у нульовий стан накопичуваного суматора 17 по третьому входу 19, а на другому виході синхронізатора 1 на протязі циклу роботи пристрою формується n - синхронізуючих імпульсів, які поступають на треті входи всіх логічних елементів АБО 8 та логічних елементів І 9. Вхідні аналогові сигнали $x(t)$ $y(t)$ поступають на відповідні входи пристрою 2, 4, які у вигляді потенціалів U_y та U_x поступають на перші входи відповідних компараторів 3, 5, на другі входи яких з'єднані з відповідними виходами схеми формування взірцевих потенціалів 6, вхід якої з'єднаний з третім входом пристрою 7 взірцевого потенціалу U_0 . При цьому на виходах компараторів 8 та 9 формуються відповідні паралельні унітарні коди вхідних потенціалів U_y та U_x , які поступають на входи відповідних логічних елементів АБО 8, І 9. Логічні елементи АБО формують інверсні паралельні унітарні коди більшого з двох цифрових значень x_i або y_i , а на виходах логічних

елементів І 9 формуються паралельні інверсні коди меншого з двох цифрових значень x_i або y_i . При цьому на виходах логічних елементів І-НЕ 10 формуються інверсні розрядно-позиційні паралельні коди Хаара більшого з двох цифрових значень x_i або y_i , які поступають на відповідні входи третіх логічних елементів І-НЕ 14.1, на виходах яких формуються прямі паралельні двійкові коди більшого із них, на виходах других логічних елементів І-НЕ 12 формуються інверсні розрядно-позиційні коди Хаара меншого з двох цифрових значень x_i або y_i , які поступають на відповідні входи третіх логічних елементів І-НЕ 14.2 на виходах яких формуються інверсні паралельні двійкові коди меншого із них. Отримані вихідні двійкові коди цифрових значень $\overline{x_i}$ та y_i поступають на входи багаторозрядного двійкового суматора 15 з парафазними входами та наскрізними переносами, де додаються з врахуванням логічної одиниці на вході суматора 16. У результаті на виході суматора 15 формується двійковий код модульної різниці між цифровим значенням x_i та y_i , сума яких накопичується в накопичувальному суматорі 17, із старших розрядів якого знімається двійковий код 20 значення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами. [126, 127]

Апаратна та часова складність пристрою. Загальна апаратна складність пристрою визначення Хеммінгової віддалі залежить числа рівнів квантування АЦП і розраховується згідно виразу:

$$A = n \cdot (A_R + 2A_k + 6A_v) + \log_2 n \cdot (2A_v + A_s)$$

Де n – число рівнів квантування АЦП; A_R - апаратна складність синхронізатора; A_k - апаратна складність компаратора; A_v - апаратна складність логічних елементів; A_s - апаратна складність розробленої схеми суматора.

Наприклад при $n = 8$ отримаємо наступні значення:

$$A = 8 \cdot (1 + 2 \cdot 2 + 6) + 3 \cdot (2 + 8) = 88 + 30 = 118v \text{ (вентилів).}$$

Часова складні (рисунок 4.14) для пристрою визначення Хеммінгової віддалі буде наступною: $\tau = \tau_k + 3\tau_v + t_v + t_s = 2 + 3 + 1 + 5 + 64 = 75$ (мікротактів).

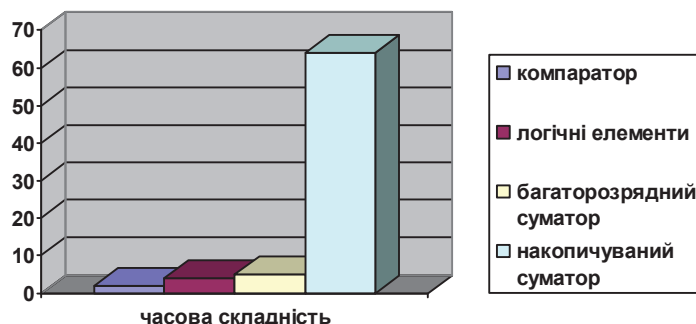


Рисунок 4.14 - Часова складність пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами.

З діаграми видно, найбільший час затрачено при цифровій обробці інформації дає накопичуваний суматор, тому покращення швидкодії такого класу спецпроцесорів можна бути ефективно здійснено на основі інших ТЧБ з модульною арифметикою.

4.3. Швидкодійний спецпроцесор визначення Хеммінгової віддалі між оцифрованими сигналами у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона.

Пристрій належить до засобів обчислювальної техніки, призначений для визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами і може бути використаний у якості компонента цифрових процесорів розпізнавання образів.

Відомий аналог – багатоканальний пристрій для обчислення модульної кореляційної функції [Николайчук Я.Н., Ищеряков С.М., Ластовецкий А.Д. Многоканальное устройство для вычисления модульной корреляционной функции SU 1686433, Бюл. №39, 1991], який містить синхронізатор, перший аналоговий вхід пристрою з'єднаний з першим входом першого компаратора, другий аналоговий вхід пристрою, який з'єднаний з першим входом другого компаратора, другий вхід якого з'єднаний з другим входом першого компаратора та виходом схеми формування ступінчастих взірцевих потенціалів. Такий пристрій дозволяє визначити усереднену Хеммінгову віддаль між двома поточними аналоговими сигналами та їх Хеммінгову віддаль між двома зсунутими в часі вхідними аналоговими сигналами.

Недоліком такого пристрою є низька швидкодія обумовлена наявністю перетворювачів аналог-часовий інтервал, які формують вихідні послідовні цифрові унітарні коди з числом імпульсів 2^n , де n – розрядність відповідних двійкових кодів.

Відомий найближчий аналог – пристрій визначення Хеммінгової віддалі у базисах Радемахера та Хаара, який містить синхронізатор, перший аналоговий вхід з'єднаний з першим входом першого компаратора i -го розряду, другий аналоговий вхід з'єднаний з першим входом другого компаратора i -го розряду, другий вихід якого з'єднаний з другим входом першого компаратора i -го розряду та першим виходом схеми формування ступінчастих взірцевих потенціалів, який відрізняється тим, що додатково введено $2^k - 1$ розрядів, у кожному з яких вихід першого компаратора додатково з'єднаний з першими входами додатково введеного логічного елемента АБО та логічного елемента І, другий вхід якого додатково з'єднаний з другим входом логічного елемента АБО та виходом другого компаратора, вихід логічного елемента АБО додатково з'єднаний з першим входом додатково введеного першого логічного елемента І-НЕ та додатково з'єднаний з входом додатково введеного першого логічного елемента НЕ, вихід якого додатково з'єднаний з першим входом першого логічного елемента І-НЕ i -го розряду, вихід логічного елемента І додатково з'єднаний з першим входом додатково введеного другого логічного елемента І-НЕ i -го розряду та входом додатково введеного другого логічного елемента НЕ, вихід якого з'єднаний з другим входом другого логічного елемента І-НЕ, виходи других логічних елементів І-НЕ згідно кодової системи двійкових чисел базису Радемахера з'єднані з першими входами третіх логічних елементів І-НЕ, виходи яких з'єднані з відповідними першими входами багаторозрядного двійкового суматора, другий вхід якого з'єднаний з логічною одиницею, а виходи з'єднані з відповідними першими входами багаторозрядного накопичувального суматора, другий вхід якого з'єднаний з першим виходом синхронізатора, другий вихід якого з'єднаний з всіма першими входами логічних елементів АБО та І, та третім входом накопичуючого суматора, четвертий вхід якого з'єднаний з входом логічного нуля, а виходи накопичуваного суматора є виходами пристрою [126, 127].

Недоліком такого пристрою є низька швидкодія, яка обумовлена тим що отримані паралельні, інверсні коди Хаара більшого y_i та меншого x_i цифрових значень аналогових сигналів на входах третіх логічних елементів І-НЕ представлені згідно двійкової системи числення базису Радемахера, що передбачає виконання арифметичних операцій визначення модульної різниці шляхом додавання прямих та інверсних кодів y_i та x_i і накопичення їх суми у двійковій системі числення. Наявність наскрізних переносів у двійковій арифметиці при виконанні операції у багаторозрядних двійкових суматорах приводить до значного зниження швидкодії та відповідно низької швидкодії пристрою визначення Хеммінгової віддалі.

Наприклад при розрядності АЦП у пристрої $k=3$ біта та числі сумувань кодів модульних різниць $|y_i - x_i| - n = 256$, затримка сигналів при виконанні одного циклу роботи пристрою складає $\tau_H = n \cdot (\tau_k + 4\tau_v + \tau_{KS} + \tau_{HS})$, де τ_k – часова затримка сигналів у компараторі; $\tau_v - y_i$ та x_i часова затримка сигналу в 1 логічному вентелі; $\tau_{KS} = k \cdot \tau_{OS}$, де τ_{OS} – затримка сигналу в одному розряді комбінаційного суматора; $\tau_{HS} = (k + \log_2 n) \cdot (\tau_{OS} + \tau_T)$, де τ_T – затримка сигналів у D тригері. При: $\tau_k = 5\nu$; $\tau_v = 1\nu$; $\tau_{OS} = 2\nu$; $\tau_T = 2\nu$, отримаємо – $\tau_H = 256 \cdot (5 + 4 + 3 \cdot 2 + (3 + 8) \cdot 2) = 9472\nu$ (мікротактів) (37ν при виконанні 1 циклу обчислень). Тобто при тактовій частоті 1 ГГц пристрій з такими параметрами виконує оцінку Хеммінгової віддалі з частотою 100 Гц. При розрядності АЦП $k=8$ відповідно отримаємо: $\tau_H = 256 \cdot (5 + 4 + 8 \cdot 2 + (8 + 8) \cdot 2) = 14592\nu$ (мікротактів) (57ν при виконанні 1 циклу обчислень).

В основу удосконалення пристрою поставлена задача підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей та підвищення точності визначення накопиченого усередненого значення суми квадратів модульних різниць оцифрованих аналогових сигналів, що відповідає оцінці Евклідової Хеммінгової віддалі між ними згідно виразу:

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|x_i - y_i|)^2,$$

де: $i \in \overline{1, n}$ – об'єм вибірки цифрових кодів; x_i та y_i – вхідні оцифровані аналогові сигнали $x(t)$ та $y(t)$.

Суть вдосконалення пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами підвищення швидкодії та точності визначення Хеммінгової віддалі шляхом додаткового введення двох АЦП паралельного типу з вихідними кодами Хаара-Крестенсона, заміною структурно складних та низькошвидкодійних багаторозрядних двійкових суматорів відповідними матрично-модульними структурами на логічних елементах І-НІ, на виході яких додатково формуються ріницево-модульні квадрати та накопичуючі суми у кодах Хаара-Крестенсона та додаткового введення дешифратора кодів Хаара-Крестенсона у двійковий код базису Радемахера.

Поставлена задача вирішується тим, що пристрій, який містить синхронізатор, перший вихід якого з'єднаний з першим входом додатково веденого матрично-модульного накопичуючого суматора, другий вхід якого з'єднаний з другим входом синхронізатора та першими входами додатково введених першого та другого АЦП паралельного типу з вихідними кодами Хаара-Крестенсона [159], другі входи яких додатково з'єднані між собою та вхідною шиною еталонного потенціалу, другий вхід першого АЦП з'єднаний з першим аналоговим входом, а виходи додатково з'єднані з першими входами відповідних додатково введених різницево-модульних квадраторів, другий вхід другого АЦП з'єднаний з другим аналоговим входом пристрою, а виходи додатково з'єднані з другими входами відповідних різницево-модульних квадраторів, виходи яких з'єднані з третіми входами матрично-модульного накопичуючого суматора, виходи якого з'єднані з входами додатково веденого дешифратора кодів Хаара-Крестенсона у двійковий код базису Радемахера, виходи якого є виходами пристрою.

Удосконалений пристрій ілюструється кресленням (рисунок 4.15), де показано структурну схему пристрою.

Пристрій включає в себе: 1 – синхронізатор; 2.1, 2.2 – АЦП паралельного типу з вихідними кодами Хаара-Крестенсона; 3 – вхідна шина еталонного потенціалу; 4 – перша вхідна шина аналогового потенціалу; 5 друга вхідна шина аналогового потенціалу; 6 – різницево-модульні квадратори; 7 – матрично-

модульний накопичуючий суматор; 8 – дешифратор кодів Хаара-Крестенсона у двійковий код базису Радемахера; 9 – вихідна шина пристрою.

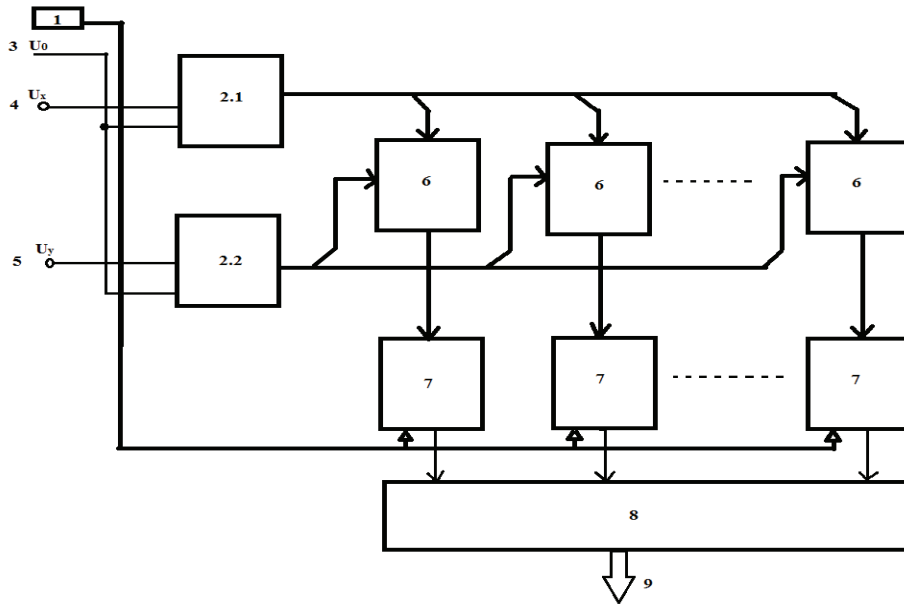


Рисунок 4.15 - Структурна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі у ТЧБ Хаара-Крестенсона

На рисунку 4. 16 показано структурну схему АЦП паралельного типу з вихідними кодами Хаара-Крестенсона 2.1, 2.2 [159].

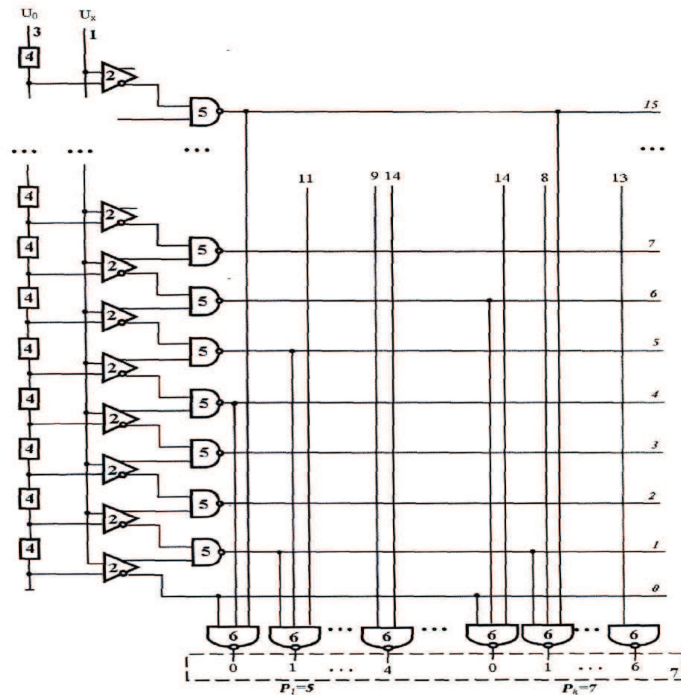


Рисунок 4.16 - Структурна схема АЦП паралельного типу з вихідними кодами Хаара-Крестенсона

На креслені (рисунок 4.17) показано структурну схему різницево-модульного квадратора, який є компонентом пристрою 6 і складається: матриці модульної різниці, яка реалізується в кодах Хаара на основі двох входових логічних елементів І-НІ, виходи якої з'єднані з відповідними входами квадратора по модулю P_i [160], в якому у зв'язку з тим що на виході матриці модульної різниці, формуються інверсні коди Хаара, логічні елементи АБО у в структурі модульного квадратора відповідно замінені логічними елементами І-НІ.

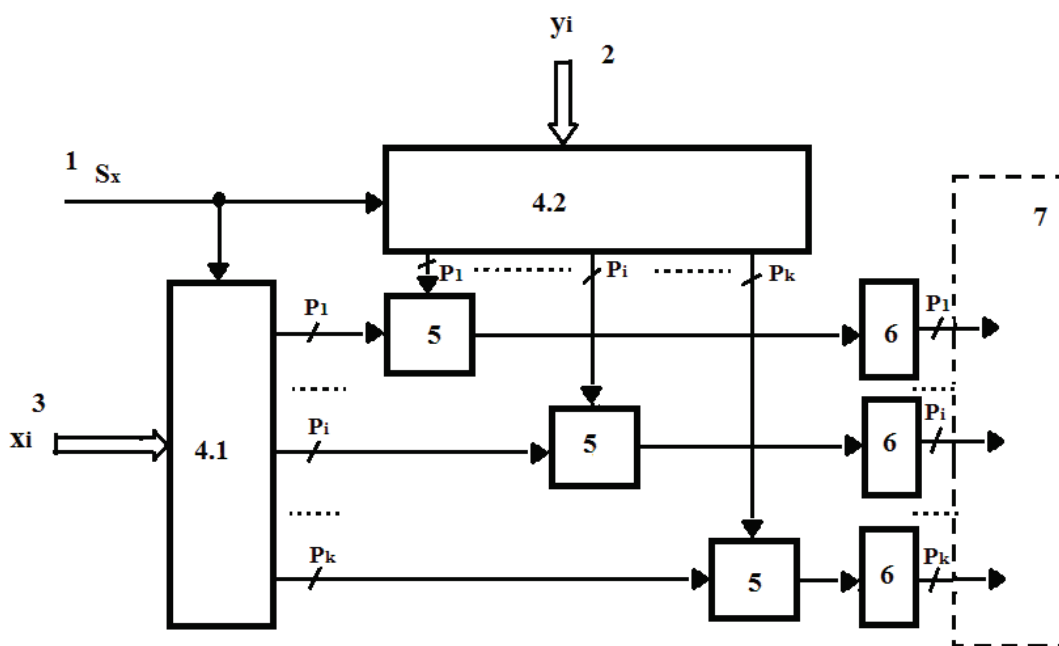


Рисунок 4.18 - Структурна схема різницево-модульного квадратора

На креслені (рисунок 4.18) показано структурну схему матрично-модульного накопичуючого суматора, який є компонентом 7 пристрою, структура якого містить матрицю модульного сумування кодів Хаара та регістр пам'яті на D-тригерах. В даній структурі додатково відсутні логічні елементи І-НІ матриці та D-тригери в нульових позиціях кодів квадратів Хаара, згідно прикладу таблиці 4.1 квадратів кодів Хаара для модулів $P_i = 5$, $P_i = 7$, $P_i = 8$, $P_i = 9$, що зменшує апаратну складність такого компонента пристрою. У зв'язку з тим що на виході матриці модульної суми формується інверсний код Хаара, який поступає на D-входи тригерів регістра пам'яті, коди накопичених модульних сум поступають на другі входи модульних матриць сумування з інверсних виходів відповідних тригерів.

поступають на входи відповідних модульних елементів накопичуючого суматора 7, вихідні коди якого поступають на входи шифратора 8, на виході якого формуються вихідні двійкові коди базису Радемахера оцінки визначеної квадратичної Хеммінгової віддалі між вхідними сигналами.

Наприклад при будь якій розрядності АЦП та числі сумувань кодів модульних різниць $|y_i - x_i| - n = 256$, затримка сигналів при виконанні одного циклу роботи пристрою складає $\tau_H = \tau_C + n \cdot (\tau_{АЦП} + \tau_{КВ} + \tau_{НС} + \tau_{Ш})$, де τ_C – часова затримка реключення тригера регістра пам'яті накопичуючого суматора синхронізатора; $\tau_{АЦП}$ – часова затримка сигналу аналого-цифрового перетворювача; $\tau_{КВ}$ – затримка сигналу різницево-модульному квадраторі; $\tau_{НС}$ – затримка сигналу у модулі накопичуючого суматора; $\tau_{Ш}$ – часова затримка сигналу в шифраторі. При: $\tau_C = 2\nu$; $\tau_{АЦП} = 4\nu$; $\tau_{КВ} = 2\nu$; $\tau_{НС} = 3\nu$; $\tau_{Ш} = 4\nu$, отримаємо – $\tau_H = 2 + 256 \cdot (4 + 2 + 3 + 4) = 3330\nu$ (мікротактів) (13ν при виконанні 1 циклу обчислень).

Крім того в наслідок здійснення обчислення Хеммінгової віддалі згідно оцінки квадратичної Евклідової міри у запропонованому пристрої досягнуто розширення функціональних можливостей і підвищення точності визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами.

В таблиці 4.2 запропоновано порівняльна характеристика відомих та розроблених спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі.

Таблиця 4.2 – Спецпроцесори визначення Хеммінгової віддалі.

Спецпроцесор	Часова складність при виконанні 1 циклу обчислень	Часова складність при виконанні 256 циклів обчислень	Апаратна складність При n=8	Функціональні можливості
Відомі спецпроцесори визначення Хеммінгової віддалі				
Спецпроцесор сканування та визначення Хеммінгової віддалі між кодами представленими в	518	132608	2048	виконує операцію визначення Хеммінгової віддалі

унітарному ТЧБ				
Пристрій визначення Хеммінгової віддалі шляхом додавання багаторозрядних двійкових чисел	26	6656	120	визначення залишку по модулю багаторозрядного числа
Пристрій, який може виконувати функції визначення Хеммінгової віддалі	67	17152	139	визначення модульної різниці між двома двійковими числами тільки у випадку коли перше більше число представлено прямим двійковим кодом, а друге менше число, яке представлено доповнюючим
Багатоканальний пристрій для обчислення модульної кореляційної функції	144	36864	256	визначення усередненої Хеммінгової віддалі між двома поточними аналоговими сигналами
Розроблені спецпроцесори визначення Хеммінгової віддалі				
Пристрій додавання багаторозрядних двійкових чисел	31	7936	504	накопичення усередненої суми модульних різниць двох потоків двійкових чисел
Пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами	37	9472	118	визначення накопиченого усередненого значення суми модульних різниць оцифрованих аналогових сигналів
Спецпроцесор визначення Хеммінгової віддалі в ТЧБ Хаара-Крестенсона	13	3300	256	Визначення накопиченого усередненого значення суми квадратів модульних різниць оцифрованих аналогових сигналів

Дані в таблиці показують що розроблені спецпроцесори характеризуються більшою швидкістю меншою апаратною складністю та більш широкими функціональними можливостями.

4.4 Різницево-модульний квадратор.

Різницево-модульний квадратор належить до засобів обчислювальної техніки і може бути використаний в якості швидкодіючого компонента при розробці дискретних пристроїв для задач статистичного аналізу та високопродуктивних компонентів спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі згідно квадратичної оцінки Евклідової відстані [161].

Відомий аналог – числоімпульсний множильний пристрій [Николайчук Я.М. Числоимпульсное множительное устройство // А.С. СССР № 754414.- Бюлетень № 29. - 1980], який містить вхідну шину, лічильник, виходи якого порозрядно, через логічні ключі, підключені до накопичувача.

Недоліком такого пристрою, який при однаковому числі імпульсів на вхідних шинах, виконує обчислення їх квадрату, є низька швидкодія, яка обумовлена тим, що обчислювальні операції у пристрої виконуються у двійковій системі числення теоретико-числового базису Радемахера, що приводить до багаторазового виконання наскрізних переносів у суматорі накопичувача.

Крім того недоліком такого пристрою є обмежені функціональні можливості обумовлені тим, що пристрій не дозволяє реалізувати визначення квадрату різниці між двома числами [161].

Відомий прототип квадратор [160], який містить вхідну шину, розрядно-позиційні лічильники теоретико-числового базису Хаара-Крестенсона, входи яких з'єднані з вхідною шиною, а виходи з'єднані з входами логічного модуля рандомізації, виходи якого з'єднані з виходами пристрою кодів квадратів у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона [161].

Недоліком такого пристрою є низька швидкодія, обумовлена тим що на вхідну шину пачкою імпульсів на протязі 2^k подається унітарний код числа, яке підноситься до квадрату. Таким чином, часова складність такого пристрою визначається згідно виразу: $\tau_K = 2^k \cdot (\tau_T + \tau_{KB})$, 2^k – діапазон квантування вхідного числа, $\tau_T = 2$ мікротакти – затримка сигналів при переключенні D-тригера; $\tau_{KB} = 1$ мікротакт – затримка сигналів в логічному модулі рандомізації. При $k = 4$

$\tau_k = 2^4 \cdot (2+1) = 48$ мікротактів, відповідно при $k = 7, 8, 10, 11$ отримаємо: $\tau_k = 384$, $\tau_k = 768$, $\tau_k = 3072$, $\tau_k = 6144$ мікротакти [161].

Іншим недоліком відомого пристрою є обмежені функціональні можливості обумовлені тим, що пристрій не дозволяє реалізувати визначення квадрату різниці між двома числами представленими в кодах Хаара-Крестенсона.

В основу корисної моделі поставлена задача вдосконалення, підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей пристрою шляхом визначення квадрату модульної різниці двох чисел x_i та y_i , представлених у системі числення залишкових класів теоретико-числового базису Хаара-Крестенсона згідно виразу [157? 161]:

$$Z = (x_i - y_i)^2.$$

Такі коди за 4 мікротакти отримуються на виходах АЦП паралельного типу з вихідними кодами Хаара-Крестенсона [159]. Вдосконалення пристрою здійснюється додатковим поданням на другу та третю додатково введені вхідні шини паралельних кодів x_i та y_i у базисі Хаара-Крестенсона, які з'єднані з входами відповідних додатково введених першого та другого регістрів пам'яті, другі входи яких з'єднані з вхідною шиною синхронізації, а виходи з'єднані з першими та другими входами відповідних додатково введених різницево-модульних матриць, виходи яких з'єднані з входами відповідних логічних модулів рандомізації, які містять додатково введені логічні елементи І-НІ, виходи яких є виходами пристрою у коді Хаара-Крестенсона системи залишкових класів [161].

Поставлена задача вирішується тим, що різницево-модульний квадратор містить першу вхідну шину, логічні модулі рандомізації, регістри пам'яті та вихідну шину, яка з'єднана з відповідними виходами рандомізаторів, згідно з корисною моделлю, перша вхідна шина додатково з'єднана з першими входами додатково введених першого та другого модульних регістрів пам'яті, додатково введені друга та третя вхідні шини паралельних кодів Хаара-Крестенсона чисел x_i та y_i , які додатково з'єднані з другими входами відповідних першого та другого модульних регістрів пам'яті, виходи першого регістра пам'яті з'єднані з відповідними першими входами відповідних додатково введених різницево-модульних матриць, другі входи яких додатково з'єднані з відповідними виходами

другого модульного реєстра пам'яті, а виходи додатково з'єднанні з входами відповідних логічних модулів рандомізації [158].

Корисна модель ілюструється кресленнями: на рисунок 4.19 показана структурна схема пристрою, де: 1 – перша вхідна шина синхронізації; 2– друга вхідна шина числа x_i ; 3 – третя вхідна шина числа y_i ; 4.1, 4.2 – перший та другий модульні реєстри пам'яті; 5 – різницево-модульні матриці; 6 – логічні модулі рандомізації; 7 – вихідна шина; на рисунок 4.20 показана структурна схема компонента пристрою – модульного реєстра пам'яті 4; на рисунок 4.21 – приклад реалізації та структура з'єднання вентилів входів та виходів різницево-модульної матриці на елементах І-НІ ($P=11$); на 4.22 - приклад реалізації формування коду квадрата залишку по модулю P_i на виходах логічного модуля рандомізації у базисі Хаара-Крестенсона на логічних елементах І-НІ ($P=11$) [161];

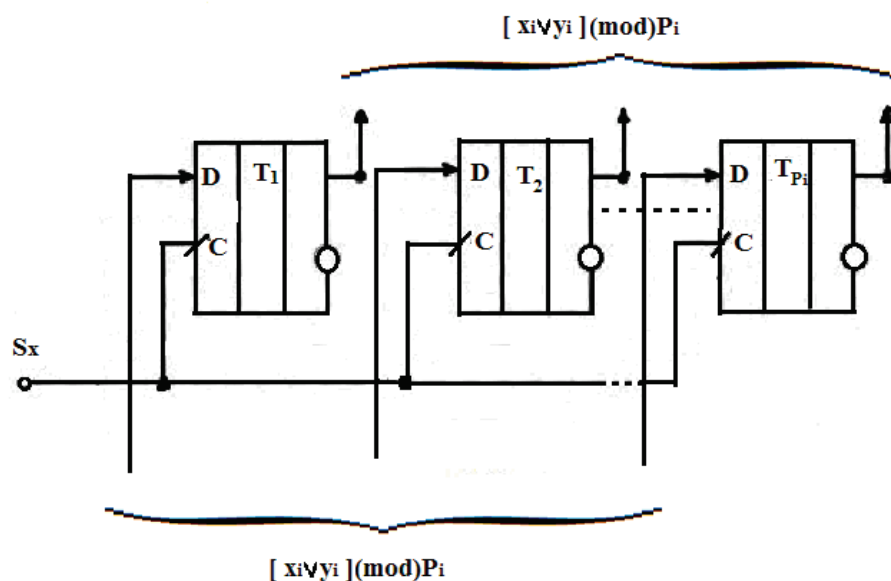


Рисунок 4.19 - Структура модульного реєстра пам'яті.

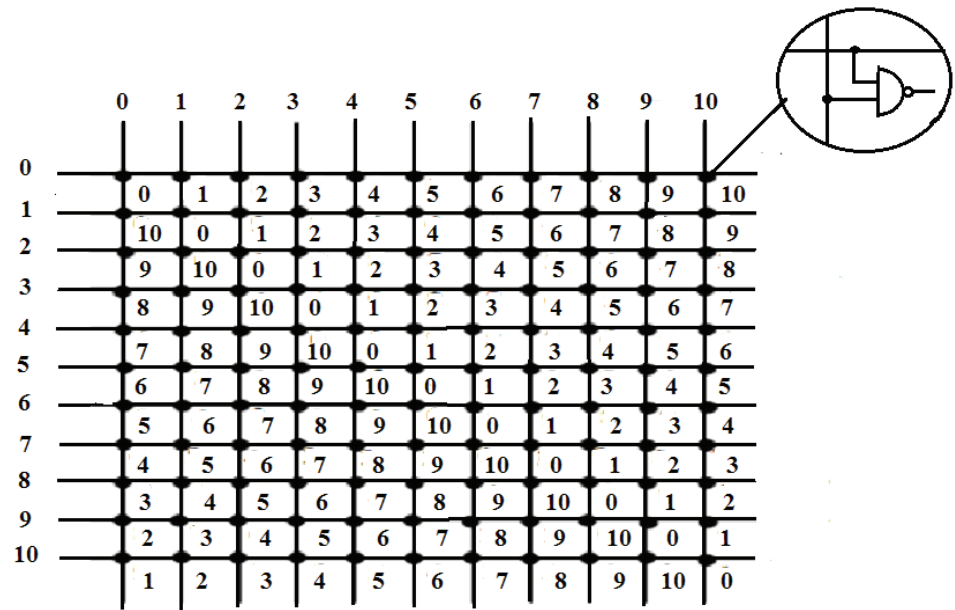


Рисунок 4.20 - Різницево-модульна матриця на елементах І-НІ.

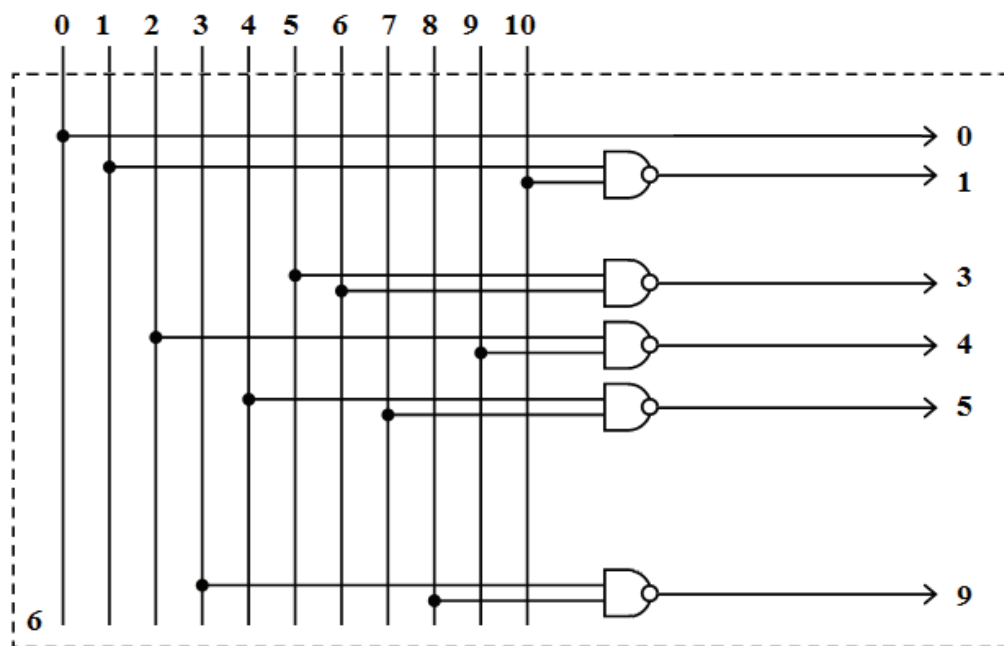


Рисунок 4.21 - Реалізації формування коду квадрата залишку по модулю P_i

Пристрій працює наступним чином: на початку циклу роботи пристрою на першій вхідній шині (1) формується сигнал синхронізації, по фронту наростання якого у відповідні модульні регістри 4.1, 4.2 записуються коди Хаара-Крестенсона вхідних чисел x_i , y_i . При цьому, на перші та другі входи різницево-модульних матриць 5 поступають коди залишків по модулю P_i у базисі Хаара. Отримані вихідні коди прямих або доповнюючих залишків модульних різниць поступають на

входи відповідних логічних модулів рандомізації 6, на виходах яких формуються коди модульних квадратів, які поступають на вихідну шину пристрою 7 [161].

Згідно із системою числення залишкових класів для однозначного представлення квадрату різниці двох чисел $(x_i - y_i)^2$ повинна виконуватися умова: добуток P_0 взаємопростих модулів P_i повинен бути рівний або більший $N = [(x_i - y_i) \max]$, що відповідає умові: сума двійкових розрядностей модулів P_i повинна бути на 1-2 розряди більша відносно кількості розрядів двійкового представлення максимального квадрату різниці між числами x_i та y_i , тобто: $n \geq \hat{E}[\log_2 N^2]$, де \hat{E} – цілочисельна функція з округленням до більшого цілого. Наприклад, при числі модулів P_i , $k=4$ і максимальних значеннях квадратів N , розрахунки для різних N показано в таблиці 4.3 [161]:

Таблиця 4.3 - Значення для розрахунку взаємопростих модулів

		P_1	P_2	P_3	P_4	$2n+1$	N^2	P_0
N	15	2	3	5	11	11	225	330
n	4	1	3	3	4			
N	99	8	9	11	13	15	9801	10296
n	7	3	4	4	4			
N	255	13	16	17	19	18	65025	67194
n	8	4	4	5	5			
N	1023	29	32	33	37	22	1046529	1133088
n	10	5	5	6	6			
N	2047	43	45	47	49	24	4190209	4456305
n	12	6	6	6	6			

Особливістю роботи пристрою є незалежність формування прямого коду квадрату на виходах логічних модулів рандомізації 6, незалежно від того прямі чи інвертовані коди по модулю формуються на виходах різницево-модульних матриць 5 [161].

Наприклад: необхідно визначити квадрат різниці між двома числами, які можуть бути представлені у діапазоні: $0 \leq x_i \leq 99$, $0 \leq y_i \leq 99$, максимальне значення квадрату їх різниць рівне $99^2 = 9801$.

Представимо за дані числа $x_i = 29$, $y_i = 17$, у базисах Радемахера-Крестенсона (RC) та Хаара-Крестенсона (HC) у системі числення залишкових класів з набором модулів: $P_1 = 8$, $P_2 = 9$, $P_3 = 11$, $P_4 = 13$, добуток яких рівний $8 \cdot 9 \cdot 11 \cdot 13 = 10296 > 9801$, тобто у кодах (RC) $x_i = 29_{10} = (5 \ 2 \ 7 \ 3)_{(8,9,11,13)}$, $y_i = 17_{10} = (1 \ 8 \ 6 \ 4)_{(8,9,11,13)}$, виконаємо віднімання цих чисел двома варіантами в системі залишкових класів і піднесення до квадрату отриманих різниць [161]:

$$\begin{array}{rcccc}
 P_i & 8 & 9 & 11 & 13 \\
 x_i & 5 & 2 & 7 & 3 \\
 - & & & & \\
 y_i & 1 & 8 & 6 & 4 \\
 \hline
 (x_i - y_i) & 4 & 3 & 1 & 12 \\
 & 4 & 3 & 1 & 12 \\
 \hline
 (x_i - y_i)^2 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{rcccc}
 P_i & 8 & 9 & 11 & 13 \\
 y_i & 1 & 8 & 6 & 4 \\
 x_i & 5 & 2 & 7 & 3 \\
 \hline
 (y_i - x_i) & 4 & 6 & 10 & 1 \\
 & 4 & 6 & 10 & 1 \\
 \hline
 (y_i - x_i)^2 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array}
 =$$

Тобто отримані результати квадратів рівні між собою і представляють число 144. В кодах (HC) по кожному модулю P_i дані операції виконуються на різницево-модульних матрицях 5 та логічних модулях рандомізації 6. У результаті отримується наступний код (HC): 0 0 1 1 [161].

Така властивість квадратів HC-кодів дозволяє спростити реалізацію двох послідовно з'єднаних компонентів спецпроцесора Хаара-Крестенсона шляхом безпосереднього використання вихідних прямих та доповнюючих кодів різницево-модульних матриць 5 та заміни логічних елементів АБО відповідними логічними елементами І-НІ у модульних квадраторах на основі логічних схем рандомізації 6.

Часова складність, яка визначає швидкодію запропонованого пристрою розраховується згідно виразу $\tau_{KB} = \tau_T + \tau_M + \tau_P$, $\tau_T = 2\nu$ – затримка сигналів на 2 мікротакти при переключенні D-тригерів регістрів 4; $\tau_M = 1\nu$ – затримка сигналів на

1 мікротакт у різницево-модульних матрицях 5; $\tau_p = 1\nu$ – затримка сигналів на 1 мікротакт у логічних модулях рандомізації 6.

Отже, загальна затримка сигналів у пристрої, незалежно від розрядності вхідних чисел, складає: $\tau_{KB} = 2+1+1=4\nu$. Тобто при тактовій частоті роботи вентилів ПЛІС 500 МГц формування вихідних кодів різницевих квадратів буде здійснюватися з частотою 125 МГц, що в порівнянні з прототипом, при кодуванні вхідних чисел в діапазонах 16, 128, 256, 1024, 2048 підвищення швидкодії складає 12, 125, 179, 625, 1536 разів, що відповідно 1-3 порядки [161].

В частковому випадку, коли одне з чисел x_i або y_i є нульовим, пристрій реалізує функцію відомого пристрою шляхом піднесення до квадрату одного числа у базисі Хаара-Крестенсона.

Порівняння запропонованого різницево-модульного квадратора з відомим наведена в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. – Порівняльні характеристики квадраторів.

Порівняльні характеристики	Квадратор	Різницево-модульний квадратор
Часова складність при $k=4$	48	4
Часова складність при $k=8$	768	4
Часова складність при $k=11$	6144	4
Визначення квадрату різниці між двома числами представленими в кодах Хаара-Крестенсона	Не дозволяє	Дозволяє
Вхідні коди	Необхідно знати який код більший, який менший	Результат не залежить від того який код більший
Теоретико-числовий базис	Хаара-Крестенсона	Хаара-Крестенсона
На входи подаються	Унітарні коди	Коди Хаара-Крестенсона
Залежність швидкодії від розрядності вхідних кодів	Залежить	Не залежить

З таблиці видно що запропонований різницевр-модульний квадратор характеризується більшою швидкодією і розширеними функціональними можливостями.

4.5. Реалізація компонентів та утилітів мікропроцесорних структур розроблених спецпроцесорів на ПЛІС.

Моделювання пристрою сортування.

На рисунку 4.23. зображена блок-схема модуля пристрою сортування, яка має вісім однобайтових входів (D_in1, \dots, D_in8) на які подаються дані, та вісім однобайтових виходів (D_out1, \dots, D_out8) на яких утворюється результат.

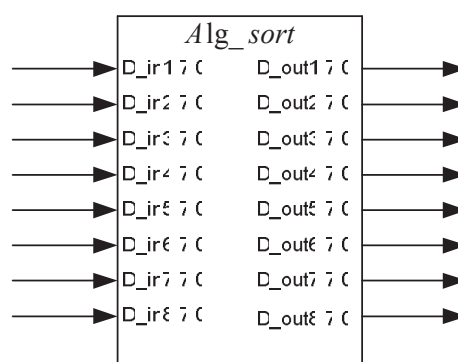


Рисунок 4.23. - Блок-схема пристрою сортування.

Нижче подано vhdл-код інтерфейсу пристрою сортування 8-ми чисел методом “бульбашки”:

```
entity alg_sort is
    port(
        D_in1      : in std_logic_vector(7 downto 0);
        D_in2      : in std_logic_vector(7 downto 0);
        D_in3      : in std_logic_vector(7 downto 0);
        D_in4      : in std_logic_vector(7 downto 0);
        D_in5      : in std_logic_vector(7 downto 0);
        D_in6      : in std_logic_vector(7 downto 0);
        D_in7      : in std_logic_vector(7 downto 0);
        D_in8      : in std_logic_vector(7 downto 0);
```

```

D_out1      : out std_logic_vector(7 downto 0);
D_out2      : out std_logic_vector(7 downto 0);
D_out3      : out std_logic_vector(7 downto 0);
D_out4      : out std_logic_vector(7 downto 0);
D_out5      : out std_logic_vector(7 downto 0);
D_out6      : out std_logic_vector(7 downto 0);
D_out7      : out std_logic_vector(7 downto 0);
D_out8      : out std_logic_vector(7 downto 0)
);
end alg_sort;

```

На рисунку 4.24. зображена діаграма функціональної симуляції пристрою сортування 8-ми чисел методом “бульбашки”.

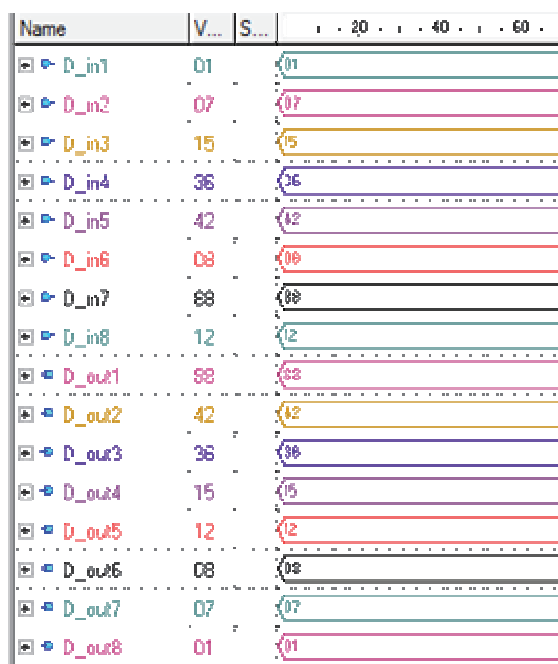


Рисунок 4.24. - Діаграма функціональної симуляції пристрою сортування.

На діаграмі можна бачити, як подаються на входи пристрою одно байтові числа. На виходах отримуємо відсортовані дані вхідні значення у порядку спадання.

Середовище розробки Xilinx WebPack .

Після виконаного VHDL-моделювання основних модулів багаторозрядного пристрою сумування потрібно провести його синтез на програмованій логічній інтегральній схемі Spartan3 фірми Xilinx. Програмування кристалів Spartan3 здійснюють засобами САПР Xilinx WebPack, що постачається безкоштовно. Процес проектування включає: ввід проекту, розміщення проекту в кристалі та верифікацію. Перший етап виконано в попередньому розділі. Два інші етапи описані в цьому розділі.

Програмний засіб розміщення і трасування забезпечує автоматичний перебіг процесу розміщення проекту в кристал. Процедура розбиття на фізичні блоки отримує вихідну інформацію про проект в вигляді переліку зв'язків і здійснює прив'язку абстрактних логічних елементів до реальних фізичних ресурсів архітектури. Далі процедура розміщення визначає найкраще місце для їх розміщення, спираючись на інформацію про між з'єднання та бажану швидкодію. На завершення, процедура трасування виконує з'єднання між блоками [12-14].

Керуюча оболонка пакета WebPack, а саме, Навігатор проекту надають користувачу зручний інтерфейс для роботи з проектом і управління всіма процесами проектування і програмування ПЛІС. Запуск всіх необхідних програмних модулів пакету здійснює безпосередньо в середовищі Навігатора проекту. Основне вікно Навігатора проекту (рисунок 4.25) окрім стандартних елементів управління складається з чотирьох вбудованих вікон:

- вікно вихідних модулів (файлів) проекту;
- вікно необхідних процедур (процесів) для вибраного вихідного модуля проекту;
- вікно консольних повідомлень програмних модулів;
- вікно редактора текстових HDL-описів проекту.

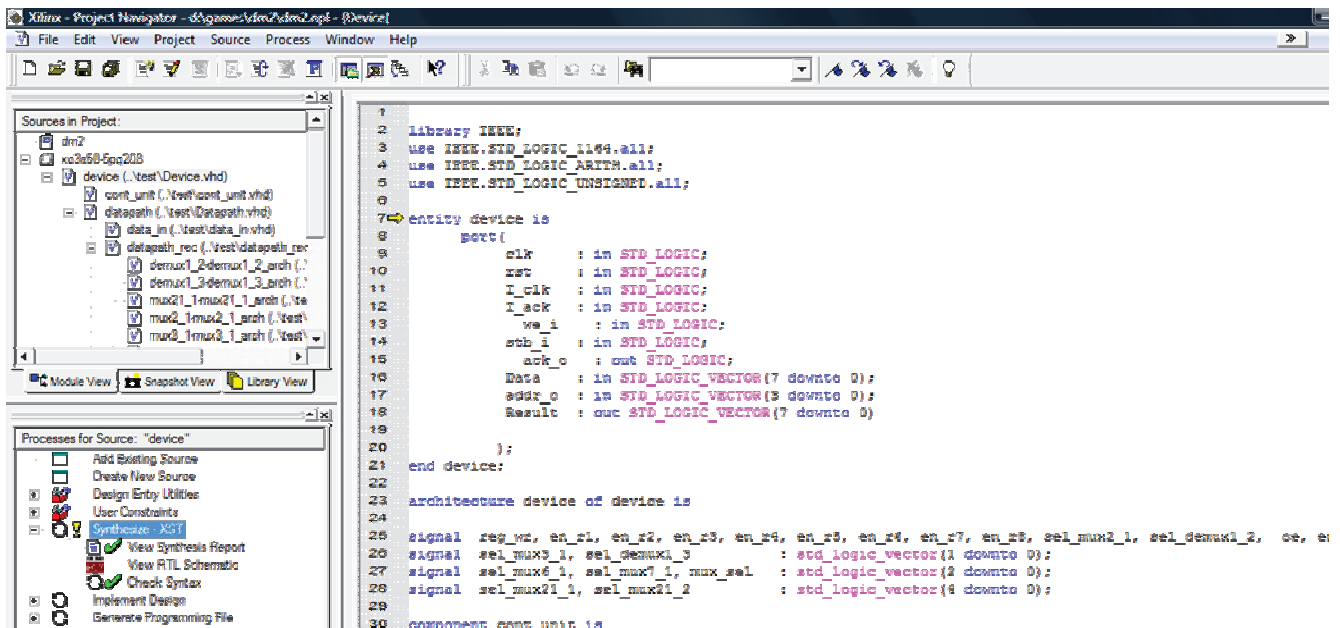


Рисунок 4.25. - Вікно Навігатора проекту системи Xilinx.

Створення нового проекту ініціюється командою File/New Project основного меню. При виборі цього пункту меню відкривається діалогова панель (рисунок 4.26), в котрій вказується назва проекту (в даному випадку проект має назву device), сімейство ПЛІС, тип кристалу і засоби синтезу пристрою. Після вводу вказаних даних в вікні вихідних модулів проекту з'явиться піктограма основного модуля з виказанням типу кристалу і інструментів синтезу.

Enter a Name and Location for the Project

Project Name: Project Location: ...

Select the Device and Design Flow for the Project

Property Name	Value
Device Family	Spartan3
Device	xc3s50
Package	pq208
Speed Grade	-5
Top-Level Module Type	HDL
Synthesis Tool	XST (VHDL/Verilog)
Simulator	Other
Generated Simulation Language	VHDL

Рисунок 4.26 Панель створення нового проекту.

Кристал ПЛІС вибираємо з серії Spartan3, це зазначено в вихідних даних на проектування. Ця серія реалізує нову ідеологію формування FPGA-платформ, які дозволяють ПЛІС стати основним компонентом цифрових пристроїв. На одній

мікросхемі сімейства Spartan3 можна створити складну цифрову систему логічної місткості до 8 млн. системних вентилів. При цьому в порівнянні з аналогічною по функціональності заказаною інтегральною схемою час розробки значно скорочується.

Сімейство придатне для проектування широкого класу високопродуктивних систем малого і високого ступеня інтеграції – таких, як пристрої передачі даних і пристрої цифрової обробки сигналів. На мікросхемах сімейства Spartan3 реалізуються закінчені рішення в області телекомунікаційних, мережних систем, засобів безпроводного зв'язку, цифрової обробки сигналів, навіть для реалізації комп'ютерних засобів космічних апаратів.

Створене на основі досвіду, отриманого при розробках попередніх серій ПЛІС, сімейство Spartan3 є революційним кроком вперед, який визначає нові стандарти в виробництві програмованої логіки. Поєднуючи велику різноманітність нових системних властивостей, ієрархію високошвидкісних і гнучких трасуючих ресурсів з передовою технологією виготовлення „кремнія”, сімейство Spartan3 дає широкі можливості реалізації швидкодіючих, великої логічної ємності цифрових пристроїв, при значному зниженні часу розробки.

Після вибору кристалу виконується завантаження до проекту створених на VHDL мові модулів асоціативної пам'яті за допомогою команди Project/Add Source. В діалоговому вікні вибираються всі потрібні файли. Після цього в вікні вихідних модулів проекту з'являться вибрані модулі з визначеною ієрархією (рисунок 4.27).

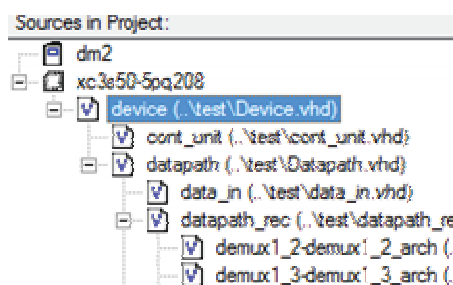


Рисунок 4.27 - Вікно вихідних модулів проекту.

Для виконання синтезу в вікні необхідних процедур запускається процес Synthesize, який складається з етапу аналізу ієрархії та перевірку синтаксису. Звіт про виконання синтезу містить попередні розрахунки часових параметрів проекту.

Швидкодія пристрою складає: 180.567МГц (період – 12,412нс).

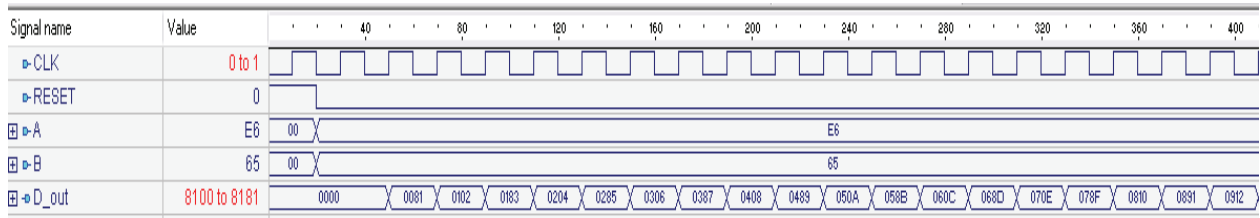
Затрати обладнання складають: Number of Slices 397 CLB із 768 CLB 51% .

CLB – конфігурований логічний блок.

Результати синтезу на ПЛІС пристрою додавання багаторозрядного двійкового числа:

Функціональна діаграма роботи багато розрядного пристрою додавання:

Початок



Кінець

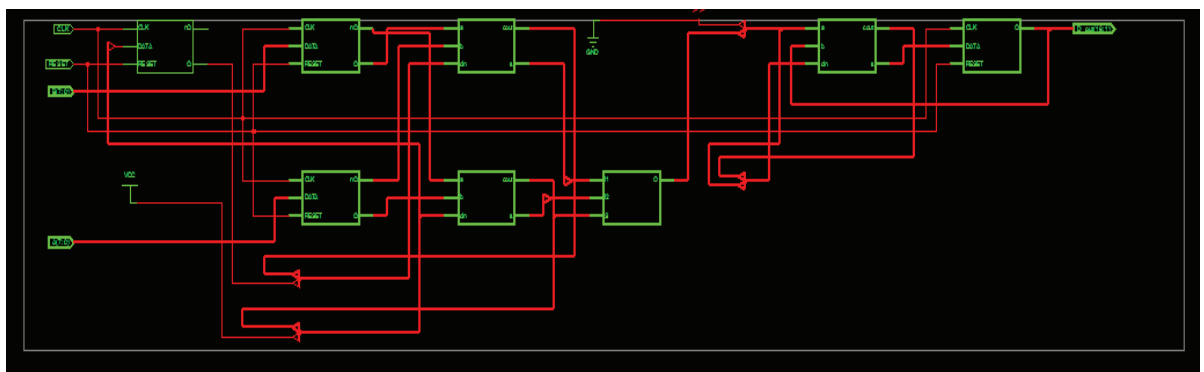
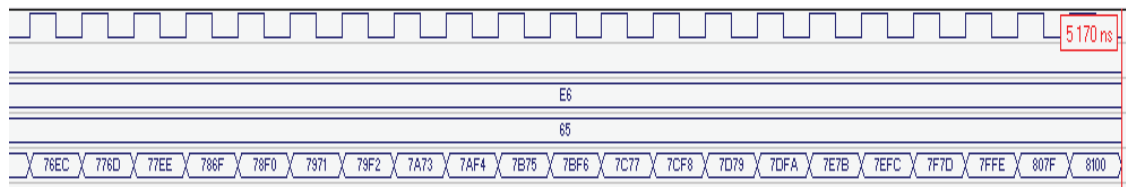


Рисунок 4.28. - RTL-схема багаторозрядного пристрою сумування.

(RTL – рівень регістрових передач)

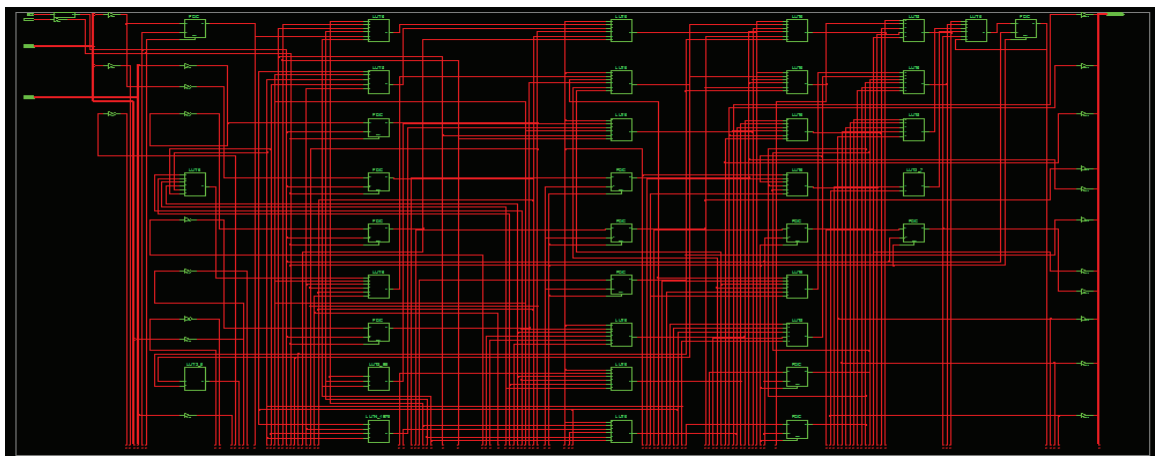


Рисунок 4.29. - Схема технологічної реалізації багаторозрядного пристрою

сумування на ПЛІС (1 частина).

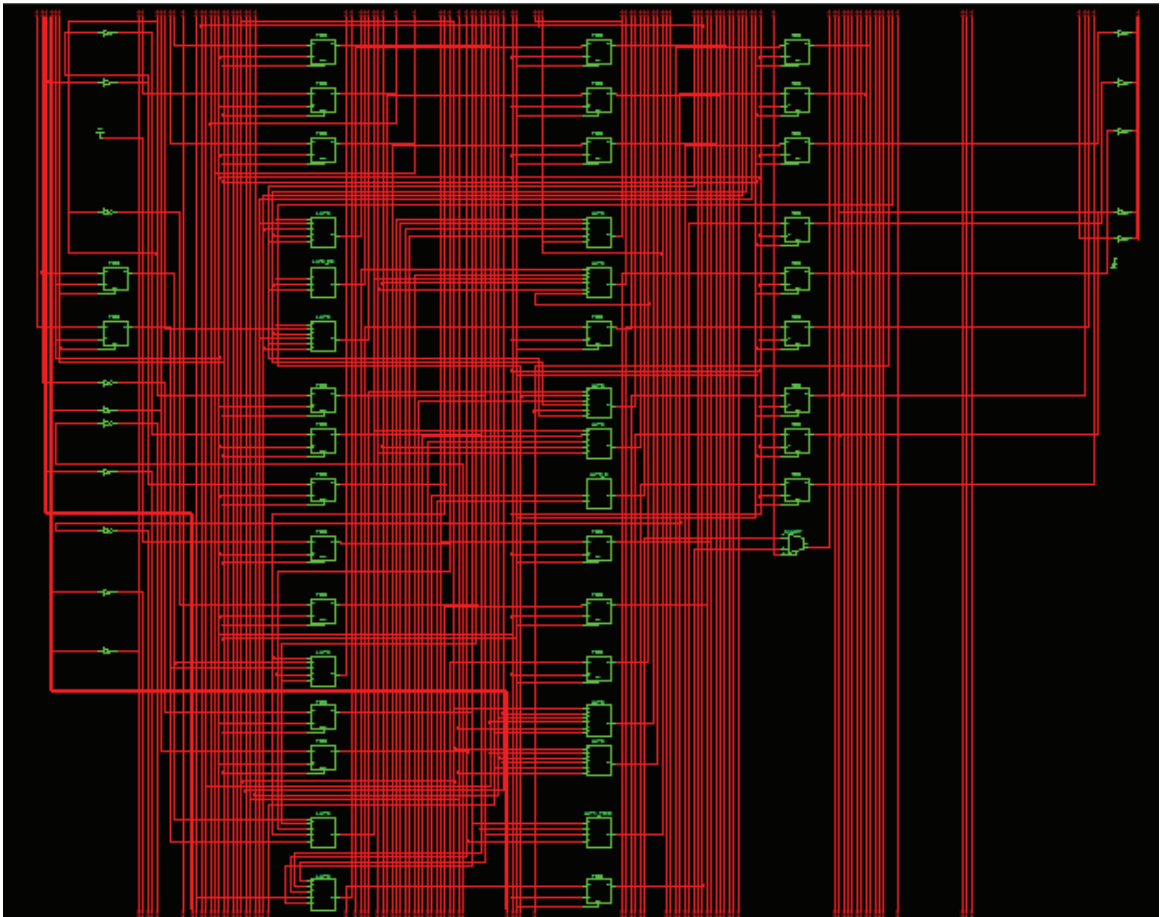


Рисунок 4.30. - Схема технологічної реалізації багаторозрядного пристрою сумування на ПЛІС (2 частина).

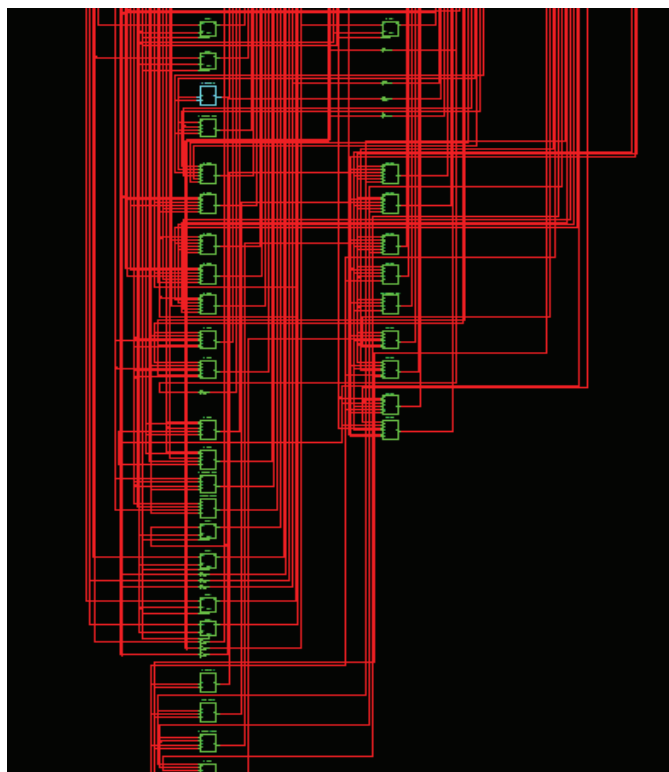


Рисунок 4.31. - Схема технологічної реалізації багаторозрядного пристрою сумування на ПЛІС (3 частина).

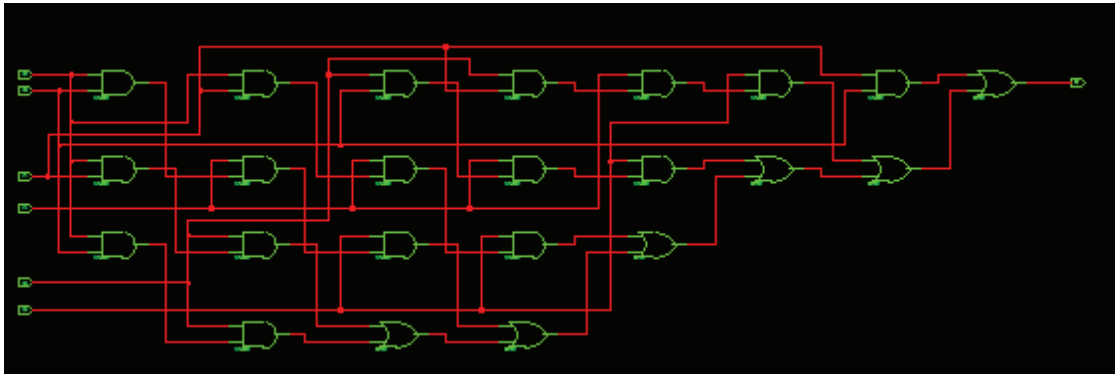


Рисунок 4.32 - Логічна таблиця (LUT) на 6 входів.



Рисунок 4.33 - Топологія ПЛІС на якій розміщено реалізовану систему.

Апаратні характеристики реалізації проекту на ПЛІС сімейства Virtex5 (кристал xc5vlx30t-3ff665) представлені на рисунку 4.33

Device Utilization Summary				
Slice Logic Utilization	Used	Available	Utilization	
Number of Slice Registers	49	19,200	1%	
Number used as Flip Flops	49			
Number of Slice LUTs	80	19,200	1%	
Number used as logic	80	19,200	1%	
Number using D6 output only	80			
Slice Logic Distribution				
Number of occupied Slices	23	4,800	1%	
Number of LUT Flip Flop pairs used	83			
Number with an unused Flip Flop	34	83	40%	
Number with an unused LUT	3	83	3%	
Number of fully used LUT-FF pairs	46	83	55%	
Number of unique control sets	1			
IO Utilization				
Number of bonded IOBs	34	360	9%	
Specific Feature Utilization				
Number of BUFG/BUFGCTRLs	1	32	3%	
Number used as BUFGs	1			
Total equivalent gate count for design				
	952			
Additional JTAG gate count for IOBs	1,632			

Рисунок 4.34 - Апаратні характеристики реалізації проекту на ПЛІС

Часові характеристиками реалізації проекту на ПЛІС сімейства Virtex 5
(кристал xc5vlx30t-3ff665)

Minimum period: 3.956ns (Maximum Frequency: 252.768MHz)

Minimum input arrival time before clock: 1.278ns

Maximum output required time after clock: 2.559ns

Висновки до Четвертого розділу

1. Розроблена структура та здійснена мікроелектронна реалізація на ПЛІС пристрою додавання багаторозрядних двійкових чисел, який визначає усереднене значення модульних різниць між оцифрованими сигналами, що у порівнянні з відомими пристроями характеризується розширеними функціональними можливостями, оскільки забезпечується визначення усередненого значення суми модульних різниць вибірки двох потоків двійкових чисел незалежно від того, яке з чисел більше або менше.

2. Реалізована на ПЛІС структура пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами та досліджені характеристики його апаратної та часової складності, Пристрій працює шляхом конвеєрного перетворення аналогових сигналів у паралельні унітарні коди більшого та меншого амплітудного значень сигналів на основі логічного опрацювання, формуванням відповідних паралельних інверсних кодів Хаара дешифрованих у відповідні прямі та інверсні коди базису Радемахера, які додаються між собою та логічною одиницею молодшого розряду накопичуючого багаторозрядного двійкового суматора, що у порівнянні з відомими пристроями характеризується підвищеною в 2^n (n – розрядність АЦП) разів швидкодією.

3. Розроблений швидкодіючий спецпроцесор визначення Хеммінгової віддалі між оцифрованими сигналами у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона, який у порівнянні з відомими пристроями характеризується підвищеною на 2-3 порядки швидкодією.

4. Розроблений та здійснена схемотехнічна реалізація Різницево-модульного квадратора у якості компонента пристрою визначення Хеммінгової віддалі між сигналами у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона згідно квадратичної оцінки Евклідової відстані, який у порівнянні з відомими пристроями характеризується підвищеною швидкодією на 1-3 порядки при розрядності представлення аналогових сигналів двійковими кодами в діапазоні 4-12 біт.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу, пов'язану з вдосконаленням методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі та розробкою високопродуктивних спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі у різних теоретико-числових базисах. Зокрема отримано такі результати:

1. У дисертаційній роботі досліджено теоретичні засади методів розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі на основі Евклідової відстані та проведений аналіз спецпроцесорів для розпізнавання образів у Хеммінговому просторі у різних теоретико-числових базисах.

2. Розроблено метод опрацювання сигналів двовимірного Хеммінгового простору, у вузлах якого існують багатомірні об'єкти на основі кодування решітчастих даних у теоретико-числовому базисі Крестенсона, що дозволило здійснювати перетворення багатомірних образів, представлених у двомірному Хеммінговому просторі, в одномірній системі координат, який дозволяє будувати спецпроцесори, швидкодія яких не залежить від розрядності представлених значень, тобто в порівнянні з відомими методами швидкодія зростає на 2-3 порядки.

3. Розроблено метод визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами, шляхом конвеєрного формування цифрових даних сигналів у паралельних унітарних кодах та інвертованих паралельних кодах Хаара, який спрощує операції порівняння характеристик образів та виконання обчислень в різних теоретико-числових базисах, який, у порівнянні з відомими, дозволяє прискорити швидкодію обчислень у $2^n / n$ (n – розрядність АЦП) разів.

4. Розроблено систему кодування та визначення оцінки Хеммінгової віддалі для розширеної категорії, у порівнянні з відомими системами, дорожніх знаків, шляхом експертних оцінок інформативних характеристик дорожніх знаків у вигляді бінарних кодів, яка дозволяє удосконалити та збільшити на 1-2 порядки швидкодію розпізнавання дорожніх знаків, на основі розрахунку Евклідової відстані, та розробити рекомендації покращення інформативних характеристик знаків з найменшими оцінками Хеммінгової віддалі.

5. Удосконалено метод визначення Хеммінгової віддалі образів з різною кількістю інформаційних параметрів, шляхом розширення математичного виразу оцінки Хеммінгової віддалі, що дозволило, у порівнянні з відомими методами, розширити сферу застосування оцінки Хеммінгової віддалі, а також розпізнавати образи з різною кількістю характеристичних ознак.

6. Удосконалено метод оцінки Хеммінгової віддалі в одновимірному та двовимірному просторі на основі Евклідової відстані та аналітики різних взаємкореляційних функцій, який у порівнянні з відомими методами, дозволяє здійснювати розпізнавання образів на основі обчислень функцій взаємкореляції в теоретико-числових базисах: унітарному, Радемахера, Крестенсона та Хаара-Крестенсона.

7. Розроблено принципіві схемотехнічні рішення різницево-модульного квадратора у якості швидкодіючого компонента пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона згідно квадратичної оцінки Евклідової відстані, який за рахунок незалежності швидкодії від розрядності вхідних кодів, у порівнянні з відомими пристроями, характеризується підвищеною швидкодією на 1-3 порядки при розрядності представлення аналогових сигналів двійковими кодами в діапазоні 4-12 біт.

8. Розроблено структурні, схемотехнічні рішення, досліджено та реалізовано у мікроелектронному виконанні на ПЛІС компоненти спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі між характеристиками образів, заданих кодами теоретико-числового базису Радемахера, що, у порівнянні з відомими пристроями, характеризується розширеними функціональними можливостями, оскільки забезпечується визначення усередненого значення суми модульних різниць вибірки двох потоків двійкових чисел, незалежно від того, яке з чисел більше або менше, та пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами шляхом конвеєрного перетворення аналогових сигналів у паралельні унітарні коди більшого та меншого амплітудного значень сигналів на основі логічного опрацювання, формуванням відповідних паралельних інверсних кодів Хаара, дешифрованих у відповідні прямі та доповнюючі коди базису Радемахера, що у

порівнянні з відомими пристроями в унітарному базисі у загальному випадку підвищеною характеризуються в $2^n / n$ (n – розрядність АЦП) разів швидкістю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хемминг Р. В. Теория кодирования и теория информации: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1983. - 176 с.
2. Verbrugger H.B., Babushka R. Constructing fuzzy models by product space clustering // Fuzzy model identification / Eds H. Hellendorn, D. Driankov. – Berlin: Springer, 1998. – Pp.53-90.
4. https://www.wikizero.com/uk/Ердал_Арікан
3. <https://www.turkaramamotoru.com/uk/Лотфи-Заде-169949.html>
5. Georgios Mappouras, Alireza Vahid, A. Robert Calderbank, Daniel J. Sorin: Extending Flash Lifetime in Embedded Processors by Expanding Analog Choice. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 37(11): 2462-2473 (2018)
6. Wei Zhu, Qiang Qiu, Jiaji Huang, A. Robert Calderbank, Guillermo Sapiro, Ingrid Daubechies: LDMNet: Low Dimensional Manifold Regularized Neural Networks. CVPR 2018: 2743-2751
7. Duc Minh Nguyen, Evaggelia Tsiligianni, A. Robert Calderbank, Nikos Deligiannis: Regularizing Autoencoder-Based Matrix Completion Models via Manifold Learning. EUSIPCO 2018: 1880-1884
8. Luby, Michael A Simple Parallel Algorithm for the Maximal Independent Set Problem / SIAM Journal on Computing. 15 (4): 1986, s. 1036–1053.
9. Toby Berger Digital Compression for Multimedia, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1998.
10. Amit Kumar Gupta Analysis of Adaptive Resonance Theory of Neural Network Method in the String Recognition / Amit Kumar Gupta, Yash Karan Singh / Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2011 International Conference / October 2011.
11. O Palagin, M Petrenko, K Malakhov Information technology and integrated tools for support of smart systems research designer Xiv preprint arXiv:1805.00437, 2018.
12. AV Palagin, NG Petrenko, VY Velychko, KS Malakhov Development of formal models, algorithms, procedures, engineering and functioning of the software

system" Instrumental complex for ontological engineering purpose" arXiv preprint arXiv:1803.10684, 2018.

13. O Palagin, V Velychko, K Malakhov, O Shchurov Research and Development Workstation Environment: the new class of Current Research Information Systems arXiv preprint arXiv:1803.05930, 2018.

14. Melnyk A.O. The 2-D Fast Fourier and Hartley Transforms Processor in VHDL. Nuremberg, 1996, 120 p.

15. Николайчук Я. М. Теорія джерел інформації / видання друге, виправлене /, – Тернопіль: ТЗОВ “Терно-граф”, 2010. – 536 с.

16. Николайчук Я.М. Коды поля Галуа: теория та застосування: монографія / Я. М. Николайчук. – Т. Темограф, 2012. – 575 с.

17. Николайчук Я.М. Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці / Албанський І.Б., Возна Н.Я., Волинський О.І., Воронич А.Р., Грига В.М., Гринчишин Т.М., Гуменний П.В., Давлетова А.Я., Заставний О.М., Івасьєв С.В., Касянчук М.М., Круліковський Б.Б., Люра О.Л., Николайчук Л.М., Николайчук Я.М., Пастух Т.І., Пітух І.Р., Сегін А.І., **Сидор А.І.**, Якименко І.З., Яцків В.В.: *Монографія / за загальною редакцією Я.М. Николайчука.* – Тернопіль: «Бескиди», 2017.-919с

18. G.F. Krivoulya Intellectual diagnostics of linearly distributed objects using wireless sensor networks G.F. Krivoulya, O.E. Chukwunonso, V.A. Vlasov Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК, 2017, 80-84.

19. G Krivoulya Expert diagnosis of computer systems using neuro-fuzzy knowledge base G Krivoulya, A Lipchansky, Y Sheremet East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2016 IEEE, 1-5.

20. AndriiSpitzer, RomanDunets. Method of switching packet sinnet works on chipwith matrix topology // Journal of Information, Controland Management Systems, Vol. 10, (2012), No.1. — P.105-111.

21. Dunets R., Klym H., Kochan R. Models of hardware integration of sensors elements withcyber-physical systems // Proceedings of the XIIIth International Conference «Modern problems of radioengineering, telecommunications, and computer science» TCSET'2016, Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23-26, 2016, p. 270-274.

22. Трембач Б.Р., Трембач Р.Б, **Сидор А.І.**, Возна Г.В. Структура та системні характеристики спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі реалізовані в різних теоретико-числових базисах. *Збірник наукових праць Математичне та комп'ютерне моделювання (технічні науки) Випуск 15 Кам'янець-подільський національний університет імені Івана Огієнка 2017 с. 244-249.*

23. Вбудовані процесори Cirrus Logic [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.cirrus.com>. – Назва з титул. екрану.

24. Інформаційна підтримка мікроконтролерів Fujitsu [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.fujitsu.com>.

25. Linear LDO [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.magnachip.com>. – Назва з титул. екрану.

26. Intel microcontrollers [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.intel.com/design/embcontrol/index.htm>.

27. Архітектура системи Motorola Canopy [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://rmt.ru/canopy.html>. – Назва з титул. екрану.

28. Fedak V., Nakonechny A. Adaptive wavelet thresholding for image denoising using sure minimization and clustering of wavelet coefficients // Technical Transactions. Electrical Engineering, Wydawnictwo Polytechniki Krakowskiej vol. 2-E/2015, pp. 197-210.

29. Nakonechny A., Veres Z. The wavelet based trained filter for image interpolation // The 1-th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing, 23-27 August 2016, Lviv, Ukraine, pp. 218-221.

30. Fedak V., Nakonechny A. // Video de-noising using adaptive wavelet thresholding // The 1-th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing, 23-27 August 2016, Lviv, Ukraine, pp. 222-225.

31. A.O. Zaporozhets METHOD OF INDIRECT MEASUREMENT OF OXYGEN CONCENTRATION IN THE AIR. A.O. Zaporozhets, O.O. Redko, V.P. Babak, V.S. Eremenko, V.M. Mokiychuk Scientific Bulletin of National Mining University, 2018.

32. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки / Theory and Practice of Error Control Codes. — М.: Мир, 1986. — 576 с.

33. B.M. Shevchuk Data Transfer Optimization in the Information Efficient Sensory, Local-Regional and Microsatellite Wireless Networks / B.M. Shevchuk, V.K. Zadiraka, S.V. Fraier / Optimization Methods and Applications. In Honor of Ivan V. Sergienko's 80th , 2017.

34. V.K. Zadiraka New Models and Methods for Estimating the Cryptographic Strength of Information Security Systems / V.K. Zadiraka, A.M. Kudin / Cybernetics and Systems Analysis 53 (6), 978-98, 2017.

35. V.K. Zadiraka Security estimates updating of asymmetric cryptosystems for modern computing / V.K. Zadiraka, A.M. Kudin, I.V. Shvidchenko, P.V. Seliukh, P. Komada, A. Kalizhanova / Recent Advances in Information Technology: Proceedings of the 13th Warsztaty Doktoranckie Conference (WD 2016), June 11-13, 2016, Lublin, Poland, and the 13th International Conference on Measurement and Control in Complex Systems (MCCS 2016).

36. Поморова О.В. Теоретичні основи, методи та засоби інтелектуального діагностування комп'ютерних систем: Монографія. – Хмельницький: Тріада-М, 2007. – 252с.

37. Колесников С. Распознавание образов. Общие сведения // «Компьютер-Информ». – 2006. – № 3.

38. Копча-Горячкіна Галина Ернестівна ТЕОРІЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ. Частина I: Навчально-методичний посібник для студентів факультету інформаційних технологій напрямів „Комп'ютерні науки” та „Програмна інженерія”. – Ужгород: Видавництво ДВНЗ «Ужгородського національного університету», 2016 р.

39. Потапов А.С. Распознавание образов и машинное восприятие. - С-Пб.: Политехника, 2007. - 548 с.

40. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Издательский центр "Академия", 2003. – 464с.

41. Сергиенко И.В., Гупал А.М., Пашко С.В. О сложности задач распознавания образов // Кибернетика и систем. Анализ. – 1996. – №4.–С.70-88.

42. Гупал А.М. Оптимальные процедуры распознавания / А.М. Гупал, И.В. Сергиенко // Кибернетика и системный анализ. – 2003. - № 1. – С. 21-29.

43. Горелик А.Л. Методы распознавания / А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин. – М.: Высшая школа, 1984. – 207 с.
44. Круліковський Б.Б., **Сидор А.І.**, Заставний О.М., Николайчук Я.М. Methods for Multidimensional Patterns Recognition in Hamming Space *International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)* Polyana, Lviv 2017 с. 195-198.
45. Колесницький О.К. Пристрої порівняння зображень на біспін-приладах для оптоелектронних паралельних процесорів та нейрокомп'ютерів: монографія / О.К. Колесницький, В.П. Кожем'яко –Вінниця: ВНТУ.2010.–124с.
46. Мандель И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
47. Трембач Б.Р., **Сидор А.І.**, Трембач Р.Б., Кочан Р.В. The Method of Applying Acoustic Signals in Vector and Two-Dimensional Hemming Spaces Given in Cartesian and in Polar Coordinates. *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018*, s. 108-111.
48. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения / Г.Стренг; [пер. с англ.] – М.: Мир, 1980. – 454 с.
49. Круліковський Б.Б., **Сидор А.І.**, Заставний О.М., Николайчук Я.М. Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2016. – Вип.26.3. - с. 361-367.
50. А.с. № 840924 СССР, G 06f 15/36. Многоканальное устройство для вычисления структурной функции / Я.Н. Николайчук, С.Я. Зевелев, Л.А.Гнатив (СССР). - Оpubл. 23.06.81, Бюл. № 23.
51. А.с. № 1115062 СССР, МКИ G06 F15/36. Многоканальное устройство для вычисления модульной функции / Я.М. Николайчук, С.М. Ищеряков. – Оpubл. 23.09. 84, Бюл. №35.
52. А.с. №1317455 СССР, G 06f 15/36. Многоканальное устройство для вычисления функции эквивалентности / Я.Н. Николайчук, С.М. Ищеряков (СССР). - Оpubл. 15.06.87, Бюл. № 22.

53. Патент на корисну модель № 70338, Україна. МПК G 06F 15/00. Багатоканальний пристрій для обчислення знакової функції / Я.М. Николайчук, Т.О.Заведюк, А.Р. Воронич, І.Б. Албанський. – Опубл. 11.06.2012, Бюл. №11.
54. Прикладной регрессионный анализ, 3-е издание Норман Дрейпер, Гарри Смит Applied Regression Analysis, 3 Edition Norman Draper, Harry Smith 2016 p
55. [П.С. Сеньо теорія ймовірностей та математична статистика: Підручник. Київ: Центр навчальної літератури– 2004, – 448 с.]
56. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов. – М.: Наука, 1975. – 320с.
57. Грианов Ю.И., Веселова Г.П., Андреев В.Н. Автоматические цифровые корреляторы. – М.: Энергия, 1971. – 240с.
58. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: Пер. с франц. – М.: Мир, 1983. – Т.1. – 311с., Т.2. – 256с.
59. Бабак В.П., Белецький А.Я., Приставка А.Ф, Приставка Ф.А. Стохастические сигналы и спектры/ учебное пособие . – КИТ, 2004. – 290 с.
60. А. Й. Наконечний, Р.А. Наконечний, В.А. Павлиш Цифрова обробка сигналів / Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010.– 368 с.
61. Кузин Л.Т. Основы кибернетики: В 2-х т. Т.2 Основы кибернетических моделей. Учеб. пособия для вузов. – М.: Энергия, 1979. – 584 с.
62. Сегін А.І. Ідентифікація двохвимірних зображень на основі інформаційної моделі Хеммінгового простору // Комп'ютерні технології друкарства . Збірник наукових праць. – Львів . – № 4, – 2000. – с23-34.
63. Яглом А.М., Яглом И.М. Вероятность и информация. Главная редакция физико-математической литературы издательства “Наука”, 1973. – 512с.
64. Куликовский Л.Ф., Мотов В.В. теоретические основы информационных процессов: Учеб. Пособие для вузов по спец. “Автоматизация и механизация процессов обработки и выдачи информации”. – М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.
65. Бебих Н.В., Денисов А.И. Взаимная спектрально-корреляционная обработка сигналов в различных ортогональных базисах // Изв. вузов Сер. Радиоэлектроника. 1983. Т. 26, №3 С. 54-60.

66. Палагин А.В., Яковлев Ю.С. Системная интеграция средств компьютерной техники. Монография. – Вінниця: УНИВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 680 с.

67. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем. / Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, І.Р. Пітух./ навчальний посібник/, – Тернопіль: ТзОВ“Терно -граф”, 2010 – с. 187-190.

68. **Сидор А.І.**, Возна Г.В Методи кодування даних у Хеммінговому просторі та задачі розпізнавання образів. *Проблемно –наукова міжгалузева конференція "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства ЮПИС-2016"*, 25-27 квітня 2016 р., Надвірна-Яремче, Україна, 2016 – С.130-134.

69. Романов В.О., Галелюка І.Б., Груша В.М., Чернега П.П. Розподілена система збору і обробки інформації на базі інтелектуальних портативних приладів // Комп'ютерні засоби, системи та мережі. – 2009, № 8. – С. 64–72.

70. Н.И. Алишов. Развитие методы взаимодействия ресурсов в распределенных системах. – Киев: Сталь, 2009. – 448 с

71. Janschek K. Image based attitude determination using an optical correlator / K. Janschek, T. Boge, V. Tchernykh, S. Dyblenko // Proceedings of 4 the ESA International Conference on Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems, Noordwijk, The Netherlands, Mar. 1998. – P.487-492.

72. Березин С. Я. Корреляционные измерительные устройства в автоматике / С.Я. Березин, О.Г. Каратаев. - Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1976. - 103 с.

73. Жовинский В.Н. Корреляционные устройства / В.Н.Жовинский, В.Ф.Арховский. - М.: Энергия, 1974. - 248 с.

74. А.с. № 206908 СССР, МПК G06F Многоканальный коррелятор / В.И. Юшин. – Оpubл. 08.08. 67, Бюл. №1.

75. А.с. № 962976 СССР, G 06f 15/336. Устройство для вычисления корреляционной функции импульсной последовательности / С.А.Прохоров, С.Г.Иванов (СССР).-№ 3250521/18-24; заявл.18.02.81;опубл.30.09.82,Бюл.№ 36.

76. А.с. № 968819 СССР, G 06f 15/336. Цифровой автокоррелятор / С.А.Прохоров, В.Н.Белолипецкий (СССР).-№ 3291998/18-24; заявл. 25.02.81; опубл. 23.10.82, Бюл. № 39.

77. А.с. № 980101 СССР, G 06f 15/336. Цифровой коррелятор / С.А.Прохоров, В.Н.Белоліпецький, С.Г.Іванов (СССР). - № 3306092/18-24; заявл. 26.06.81; опубл.07.12.82, Бюл. № 45.

78. А.с. № 982011 СССР, G 09f 15/336. Устройство для вычисления взаимокорреляционной функции импульсной последовательности / С.А.Прохоров, С.Г.Іванов (СССР). - № 3292246/18-24; заявл. 21.05.81; опубл. 15.12.82, Бюл. № 46.

79. Харченко В.С. Структурная организация и оценка надежности отказоустойчивых цифровых систем на ПЛИС // Электронное моделирование. – 2002. – №4. – С. 34-42.

80. Архітектура комп'ютера. Підручник Автор: Мельник А.О. Издательство: Волинська обласна друкарня Год: 2008 Страниц: 471

81. А.с. № 840924 СССР, G 06f 15/36. Многоканальное устройство для вычисления структурной функции / Я.Н. Николайчук, С.Я. Зевелев, Л.А.Гнатив (СССР). - Опубл. 23.06.81, Бюл. № 23.

82. А.с. № 1115062 СССР, МКИ G06 F15/36. Многоканальное устройство для вычисления модульной функции / Я.М. Николайчук, С.М. Ищеряков. – Опубл. 23.09. 84, Бюл. №35.

83. А.с. №1317455 СССР, G 06f 15/36. Многоканальное устройство для вычисления функции эквивалентности / Я.Н. Николайчук, С.М. Ищеряков (СССР). - Опубл. 15.06.87, Бюл. № 22.

84. Персональні суперкомп'ютери: архітектура, проектування, застосування: монографія / А.О.Мельник, В.А.Мельник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 516 с.

85. Тарасенко В.П. Вычислительные устройства на микросхемах / В.И. Корнейчук, В.П.Тарасенко, Ю.Н.Мишинский – К., Техника, 1986. – 360 с.

86. Надійність комп'ютерних систем: Навч. Посібник / В.П.Тарасенко, А.Ю.Маламан, Ю.П.Черніченко, В.І.Корнійчук – К.: «Корнійчук», 2007. – 256с.

87. **Сидор А.І.**, Николайчук Я.М., Возна Г.В. Задача та процесор розпізнавання образів у Хеммінговому просторі. *VIII-а міжнародна школа-семінар “Теорія прийняття рішень”* Ужгород, 2016 р. с. 243-244.

88. Сидор А.І., Возна Г.В Засоби цифрового опрацювання сигналів в задачах розпізнавання образів та спецпроцесор визначення Хеммінгової віддалі. *Матеріали конференції Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електроніка* 2016 р. Рівне с. 165-168.

89. Возна Н.Я., Сидор А.І. Критерій структурної складності та оцінки розширеної Хеммінгової віддалі для просторових об'єктів. *Науковий вісник НЛТУ України* 2017 р. №4, Львів с. 159-165.

90. Тестирование и диагностика вычислительных устройств и систем / Г.Ф.Кривуля, В.И.Хаханов, А.Н.Рысованный, И.В.Монжаренко, 1997. – 304 с.

91. Волинський О. Систематизація характеристик теоретико-числових базисів та їх застосування для побудови високопродуктивних спецпроцесорів / Волинський О., Пуюл В. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Том 16. — № 3. — С.183-189.

92. Албанський, Іван Богданович. Кореляційні спецпроцесори опрацювання цифрових даних в кодових системах різних теоретико-числових базисів [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05 / Іван Богданович Албанський. - Тернопіль : ТНЕУ, 2013. - 180 с.

93. Волинський, Орест Ігорович. Методи побудови високопродуктивних спецпроцесорів на основі теоретико-числового базису Крестенсона [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.13.05 — комп'ютерні системи та компоненти / Орест Ігорович Волинський. - Тернопіль : ТНЕУ, 2013. - 20 с.

94. Дрозд, А. В. Машинная арифметика [Текст] : учеб. пособие / А.В. Дрозд; Ин-т системных исследований образования, Одесский политехнический ун-т. - К.: ИСИО, 1993. - 56 с.

95. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. Я –М.: Сов. Радио. – 1968. – 460 с.

96. Николайчук Я.М., Зевелев С.Я., Крикун З.Н. Выбор оптимальных параметров кодирования методом вычетов. Респ. сб. “Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности”. – 1975. – №2. – С. 22-24.

97. Торгашев В.А. Система остаточных классов и надежность ЦВМ. – М.: Советское радио, 1970. – 118с.

98. Комбинированное диагностирование и надежность вычислительных устройств / В.Н. Локазюк, В.А.Карякин.– Хмельницький: Поділля, 1994.– 156с.

99. Інтелектуальне діагностування мікропроцесорних пристроїв та систем: Навч. посіб. для вузів / В.М. Локазюк, О.В. Поморова, А.О. Домінов.– Хмельницький.– Київ, 2001.– 286 с.

100. **Сидор А.І.**, Трембач Б.Р, Возна Г.В Методи ідентифікації джерел акустичних сигналів у двохвимірному Хеммінговому просторі. *Всеукраїнська конференція з міжнародною участю “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології”(АСІТ)* Тернопіль 2017 с. 86-89.

101. Круліковський Б.Б., **Сидор А.І** Методи визначення Хеммінгової віддалі у кодах мультибазисних теоретико-числових перетворень. *Науковий вісник Хмельницького національного університету (технічні науки)* 2017 р. №2 (247), Хмельницький с. 181-185.

102. Зотов В.Ю. Проектирование встраиваемых микропроцессорных систем на основе ПЛИС фирмы XILINX / В.Ю. Зотов. –М.:Телеком,2006.–522с.

103. Аналогові та змішані мікросхеми [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.st.com/internet/analog/family/124.jsp>.

104. ADS1110 [Електронний ресурс] // 16-бітний АЦП компанії Texas Instruments. – Режим доступу: <http://www.ti.com/product/ads1110>.

105. Іщеряков, С.М. Взаємкореляційні властивості ансамблів багаторівневих М-последовностей [Текст] /С.М. Іщеряков, Т.П. Каюк // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – Житомир:ЖІТІ -2002 - с.83-87

106. Іщеряков С.М., Федорович Ю.С. Комп’ютерне моделювання взаємкореляційних методів приймання фазоманіпульованих гармонійних сигналів // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – Житомир: ЖІТІ – 2002 – С.28-32.

107. Wasserman P. Neural Computing: Theory and Practice. Van Nostrand Reinhold, NY, 1989 – P. 230.

108. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, MacMillan College Publishing Co., New York, 1994.

109. Мартынюк Т.Б. Организация ассоциативного процессора с поразрядно-последовательной обработкой информации / Т.Б. Мартынюк // Электронное моделирование. – 1996. - № 3. – С. 28-31.

110. Martyniuk T.B. Structure of associative processor with bitwise serial processing of data / T.B. Martyniuk // Engineering simulation. – 1997. - №14. – P. 383-389.

111. Русин Б.П. Системи синтезу, обробки та розпізнання складноструктурованих зображень / Б.П. Русин. – Львів: Вертикаль, 1997. – 262с.

112. Кожем'яко В.П. Оптоэлектронные логико-временные информационно-вычислительные среды [Монография] / В.П. Кожем'яко. – Тбилиси: Мецниереба, 1984. – 358 с.

113. Замиховський Л.М. Проектування систем діагностування: Навчальний посібник. – Івано-Франківск: Полум'я, 2004. – 248 с.

114. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проектування телекомунікаційних мереж. – К.: Техніка, 2002. – 792 с.

115. В.С.Глухов, Н.В.Заіченко, В.І.Іванов, Б.О.Оліярник, А.В.Тупиця. Обчислювальні модулі для бортових інформаційно-керуючих систем бронетанкової техніки. // Механіка і машинобудування. - 2001. - № 1.

116. Цифрова обробка сигналів: навч. Посібник / А.Й. Наконечний, Р.А. Наконечний, В.А. Павлиш. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 368 с.

117. Бабак В.П. Обробка сигналів / В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1996. – 392 с.

118. Шрюфер Э. Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизированных сигналов: Учебник / Под ред. Проф. Бабака В.П. – К.: Либидь, 1995. – 320 с.

119. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989. – 448 с.

120. Гольденберг А.М. Цифровая обработка сигналов: Справочник / А.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н.Поляк. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.

121. Голд Б. Цифровая обработка сигналов: [пер. с англ. Под ред. А.М. Трахтмана] / Б.Голд, Ч. Рэйдер. – М.: Сов. Радио, 1973. – 368 с.
122. Даджион Д. Цифровая обработка многомерных сигналов / Д. Даджион, Р. Мерсеро; [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1988. – 488 с.
123. Задирака В.В. Цифровая обработка сигналов / В.К. Задирака, С.С. Мельникова. – К.: Наук. Думка, 1993. – 294 с.
124. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
125. Солонина А.И. Основы цифровой обработки сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 768 с.
- 126 Н.Я. Возна МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ОПТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ У ХЕММІНГОВОМУ ПРОСТОРИ НА ОСНОВІ КРИТЕРІЮ СТРУКТУРНОЇ СКЛАДНОСТІ / ▪ 2017 ▪ Том 7, №4 339 Informatics and Mathematical Methods in Simulation Vol. 7 (2017), No. 4, pp. 339-348
127. **Сидор А.І.**, Круліковський Б.Б., Возна Н.Я., Николайчук Я.М. Пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами, патент України на корисну модель №127093, Бюл. №13, 2018.
128. А.Д.Смирнов. Архитектура вычислительных систем. Учебное пособие для ВУЗов. М.:Наука.1990.-320с.
129. Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем / А.В. Богданов, В.В. Корхов, В.В. Мареев, Е.Н. Станкова/ – М.: ИНТУИТ.РУ «Интернет-Университет Информационных Технологий», 2004. – 176 с.
130. Березин С. Я. Корреляционные измерительные устройства в автоматике / С.Я. Березин, О.Г. Каратаев. - Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1976. - 103 с.
- 131 Жовинский В.Н. Корреляционные устройства / В.Н.Жовинский, В.Ф.Арховский. - М.: Энергия, 1974. - 248 с.
132. Гренадер У. Лекции по теории образов. Анализ образов. – М.: Мир, 1981. – 448с.
133. Верхаген К., Дебир Р. и др. Распознавание образов: Состояние и перспективы. – М.: Радио и связь. – 1985.

134. Заведюк Т.О. Кореляційні моделі та їх застосування для розпізнавання образів / Т.О. Заведюк // Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції “Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання (ПНМК-2009)”. – Бучач. – 2009. – №5. – С. 184-189.

135. Албанський І.Б. Спецпроцесори кореляційної обробки сигналів / І.Б. Албанський, Т.О. Заведюк // Праці міжнародного симпозиуму ”Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXV)”. – Київ-Кацевелі. – 2009. – Т1. – С. 8-13.

136. Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высш. школа, 1983. – 295с.

137. Кузьмин И.В., Кедрус А.В. Основы теории информации и кодирования. – Киев.: Высшая школа, 1977. – 278 с.

138. Николайчук Я.М. Структура та функції кореляційного спецпроцесора для ідентифікації та реєстрації гармонічних сигналів / Я.М. Николайчук, Т.О. Заведюк // Праці міжнародної наукової конференції “Питання оптимізації обчислень (ПОО-XL)”.–Київ-Кацевелі.–2013.–С.190-191.

139. Возна Н.Я. Концепція структурних даних в розподілених інформаційних системах. – Збірник матеріалів міжнародної координаційної наради ISCM-2014. – Тернопіль, 2014. – С. 55-57.

140. Возна Н.Я., Николайчук Я.М. Основы теории функции та задачи структуризации данных в информационных системах. Праці міжнародної наукової конференції «Питання оптимізації обчислень (ПОО-XL)» Київ: інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2013. С. 56-57.

141. Фролов А., Фролов Г., Синтез и распознавание речи. Современные решения [Электронный ресурс] / Александр Фролов, Григорий Фролов. – Электрон. журн. – 2003. – Режим доступа: <http://www.frolov-lib.ru>

142. Заведюк Т.О. Методи опрацювання та розпізнавання інформації в кореляційних нейропроцесорах / Т.О. Заведюк // Матеріали міжнародної проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління (ПНМК-2011)". – Бучач. – 2011. – №7. – С. 73-77.

143. Мікропроцесорні пристрої фірми ELTEK [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.eltek.com/>.

144. Басюк Т.М. Методи та засоби мультимедійних інформаційних систем: навч. Посібник / Т.М. Басюк, П.І. Жежнич. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 428 с.

145. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) : підручник / В.М. Ванько, Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук; за ред.. проф. Є.С. Поліщука та проф. В.М. Ванька. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 584 с.

146. Возна Н.Я. Структуризація поліфункціональних даних: теорія та засоби: моногр. – Тернопіль ТНЕУ, 2018. – 378 с.

147. Брамер Ю.А. Цифровые устройства / Ю.А. Брамер, И.Н. Пащук. – К.: Высшая школа, 2006. – 432 с.

148. Радзишевский А.Ю. Основы аналогового и цифрового звука / А.Ю. Радзишевский . – Вильямс, 2006. – 288.

149. Кмрн П.Цифровой звук, Реальный мир / Б. Флеминг. – М. Вильямс, 2007.– 720 с.

150. Ковалгин Ю.О. Цифровое кодирования звуковых сигналов / Ю.О. Ковалгин, Э.И. Волгдин. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 542 с.

151. **Сидор А.І.** Метод розпізнавання дорожніх знаків категорії “попереджувальні знаки” на основі оцінок Хеммінгової віддалі та структурної складності. *Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства» (ЮПІС 2018) 23-25 травня 2018 року, м Надвірна с. 140-146.*

152. **Сидор А.І.** Метод розпізнавання дорожніх знаків на основі оцінок Хеммінгової віддалі та структурної складності. *Науковий вісник НЛТЕУ України, 2018. – №7. - Львів с.120-125.*

153. Н. Я. Возна, О. П. Люра, І. О. Сабадаш, І. І. Островка МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ НАКИДІВ І ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАНЬ Науковий вісник НЛТУ України, 2018, т. 28, № 1 с 79-84.

154. **Сидор А.І.**, Люра О.П., Николайчук Я.М. Теоретичні засади та задачі розпізнавання гармонічних сигналів та образів на основі оцінки Хеммінгової віддалі. *Науковий вісник НЛТЕУ України*, 2018. – №3. - Львів с.131-136.

155. Шило В.Л. Популярные цифровые микросхемы: Справочник. - М.: Радио и связь, 1988. - С. 57.

156. Трембач Р.Б., Трембач Б. **Сидор А.І.** Пристрій додавання багаторозрядних двійкових чисел, патент України на корисну модель №117789, Бюл. №13, 2017.

157. Пристрій визначення залишку по модулю багаторозрядного числа Номер патенту: 90144 Оpubліковано: 12.05.2014 Автори: Волинський Орест Ігорович, Николайчук Ярослав Миколайович, Кімак Володимир Любомирович, Круліковський Борис Борисович

158. Nataliia Vozna, Yaroslav Nykolaichuk, Orest Volynskyi, Petro Humennyi, **Andrij Sydor** Methods of Crypto Protection of Color Image Pixels in Different Code Systems. *ADVANCED COMPUTER INFORMATION TECHNOLOGIES ACIT 2018*, Ceske Budejovice, Czech Republic, 2018 с. 110-113.

159. Возна Н.Я., Круліковський Б.Б., Николайчук Я.М., Грига В.М., Піх В.Я. Аналого-цифровий перетворювач, патент України №116176, Бюл. №3, 2018.

160. Круліковський Б.Б., Давлетова А.Я., Николайчук Я.М., Івасьєв С.В. Квадратор, патент України на корисну модель №108333, Бюл. №13, 2016

161. Сидор А.І, Возна Н.Я., Николайчук Я.М. Різницево-модульний квадратор, патент України на корисну модель №09550, Бюл. №3, 2019.

ДОДАТКИ

Додаток А1. VHDL-код реалізованого пристрою додавання багаторозрядних двійкових чисел.

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;

entity spec_device is
    port (
        CLK : in std_logic;
        RESET : in std_logic;
        A : in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
        B : in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
        D_out : out STD_LOGIC_VECTOR(16 downto 1)
    );
end spec_device;
architecture spec_device of spec_device is
    signal a0_out, a1_out, a2_out, a3_out, a4_out, a5_out, a6_out, a7_out          : STD_LOGIC;
    signal na0_out, na1_out, na2_out, na3_out, na4_out, na5_out, na6_out, na7_out : STD_LOGIC;
    signal b0_out, b1_out, b2_out, b3_out, b4_out, b5_out, b6_out, b7_out      : STD_LOGIC;
    signal nb0_out, nb1_out, nb2_out, nb3_out, nb4_out, nb5_out, nb6_out, nb7_out : STD_LOGIC;
    signal cin_in, cin_out : STD_LOGIC;
    signal s_ha1, s_ha2, s_ha3, s_ha4, s_ha5, s_ha6, s_ha7, s_ha8, s_ha9, s_ha10, s_ha11, s_ha12, s_ha13, s_ha14, s_ha15, s_ha16 : STD_LOGIC;
    signal cout_ha1, cout_ha2, cout_ha3, cout_ha4, cout_ha5, cout_ha6, cout_ha7, cout_ha8, cout_ha9, cout_ha10, cout_ha11, cout_ha12, cout_ha13, cout_ha14, cout_ha15, cout_ha16 : STD_LOGIC;
    signal out_m1, out_m2, out_m3, out_m4, out_m5, out_m6, out_m7, out_m8 : STD_LOGIC;
    signal s_ha1_s3, s_ha2_s3, s_ha3_s3, s_ha4_s3, s_ha5_s3, s_ha6_s3, s_ha7_s3, s_ha8_s3, s_ha9_s3, s_ha10_s3, s_ha11_s3, s_ha12_s3, s_ha13_s3, s_ha14_s3, s_ha15_s3, s_ha16_s3 : STD_LOGIC;
    signal cout_ha1_s3, cout_ha2_s3, cout_ha3_s3, cout_ha4_s3, cout_ha5_s3, cout_ha6_s3, cout_ha7_s3, cout_ha8_s3, cout_ha9_s3, cout_ha10_s3, cout_ha11_s3, cout_ha12_s3, cout_ha13_s3, cout_ha14_s3, cout_ha15_s3, cout_ha16_s3 : STD_LOGIC;
    signal out1_trig, out2_trig, out3_trig, out4_trig, out5_trig, out6_trig, out7_trig, out8_trig, out9_trig, out10_trig, out11_trig, out12_trig, out13_trig, out14_trig, out15_trig, out16_trig : STD_LOGIC;

    component ffd is
        port(
            CLK : in std_logic;
            RESET : in std_logic;
            DATA : in std_logic;
            nQ : out std_logic;
            Q : out std_logic
        );
    end component ffd;

    component half_adder is
        port(
            a : in STD_LOGIC;
            b : in STD_LOGIC;
            cin : in STD_LOGIC;
            s : out STD_LOGIC;
            cout : out STD_LOGIC
        );
    end component half_adder;

    component mux is
        port(
            I1 : in STD_LOGIC;
            I2 : in STD_LOGIC;
            S : in STD_LOGIC;
            O : out STD_LOGIC

```

```

    );
end component mux;

component trigger is
    port(
        CLK : in std_logic;
        RESET : in std_logic;
        DATA : in std_logic;
        Q : out std_logic
    );
end component trigger;

begin

D1: ffd
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => A(0),
    nQ => na0_out,
    Q => a0_out
);

D2: ffd
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => B(0),
    nQ => nb0_out,
    Q => b0_out
);

D3: ffd
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => A(1),
    nQ => na1_out,
    Q => a1_out
);

D4: ffd
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => B(1),
    nQ => nb1_out,
    Q => b1_out
);

D5: ffd
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => A(2),
    nQ => na2_out,
    Q => a2_out
);

D6: ffd
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => B(2),
    nQ => nb2_out,
    Q => b2_out
);

D7: ffd
port map(
    CLK => CLK,

```

```

    RESET => RESET,
    DATA => A(3),
    nQ => na3_out,
    Q => a3_out
);

```

D8: ffd

```

port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => B(3),
    nQ => nb3_out,
    Q => b3_out
);

```

D9: ffd

```

port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => A(4),
    nQ => na4_out,
    Q => a4_out
);

```

D10: ffd

```

port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => B(4),
    nQ => nb4_out,
    Q => b4_out
);

```

D11: ffd

```

port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => A(5),
    nQ => na5_out,
    Q => a5_out
);

```

D12: ffd

```

port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => B(5),
    nQ => nb5_out,
    Q => b5_out
);

```

D13: ffd

```

port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => A(6),
    nQ => na6_out,
    Q => a6_out
);

```

D14: ffd

```

port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => B(6),
    nQ => nb6_out,
    Q => b6_out
);

```

D15: ffd

```

port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => A(7),

```



```

        nQ => na7_out,
        Q  => a7_out
    );
D16: ffd
    port map(
        CLK => CLK,
        RESET => RESET,
        DATA => B(7),
        nQ => nb7_out,
        Q  => b7_out
    );
D17: ffd
    port map(
        CLK => CLK,
        RESET => RESET,
        DATA => cin_in,
        Q  => cin_out
    );
D_HA1_stage1: half_adder
    port map(
        a  => b0_out,
        b  => na0_out,
        cin => cin_out,
        s  => s_ha1,
        cout => cout_ha1
    );
D_HA2_stage1: half_adder
    port map(
        a  => b1_out,
        b  => na1_out,
        cin => cout_ha1,
        s  => s_ha2,
        cout => cout_ha2
    );
D_HA3_stage1: half_adder
    port map(
        a  => b2_out,
        b  => na2_out,
        cin => cout_ha2,
        s  => s_ha3,
        cout => cout_ha3
    );
D_HA4_stage1: half_adder
    port map(
        a  => b3_out,
        b  => na3_out,
        cin => cout_ha3,
        s  => s_ha4,
        cout => cout_ha4
    );
D_HA5_stage1: half_adder
    port map(
        a  => b4_out,
        b  => na4_out,
        cin => cout_ha4,
        s  => s_ha5,
        cout => cout_ha5
    );
D_HA6_stage1: half_adder
    port map(
        a  => b5_out,
        b  => na5_out,
        cin => cout_ha5,
        s  => s_ha6,
        cout => cout_ha6
    );

```

```

D_HA7_stage1: half_adder
  port map(
    a => b6_out,
    b => na6_out,
    cin => cout_ha6,
    s => s_ha7,
    cout => cout_ha7
  );
D_HA8_stage1: half_adder
  port map(
    a => b7_out,
    b => na7_out,
    cin => cout_ha7,
    s => s_ha8,
    cout => cout_ha8
  );
D_HA1_stage2: half_adder
  port map(
    a => nb0_out,
    b => a0_out,
    cin => '1',
    s => s_ha9,
    cout => cout_ha9
  );
D_HA2_stage2: half_adder
  port map(
    a => nb1_out,
    b => a1_out,
    cin => cout_ha9,
    s => s_ha10,
    cout => cout_ha10
  );
D_HA3_stage2: half_adder
  port map(
    a => nb2_out,
    b => a2_out,
    cin => cout_ha10,
    s => s_ha11,
    cout => cout_ha11
  );
D_HA4_stage2: half_adder
  port map(
    a => nb3_out,
    b => a3_out,
    cin => cout_ha11,
    s => s_ha12,
    cout => cout_ha12
  );
D_HA5_stage2: half_adder
  port map(
    a => nb4_out,
    b => a4_out,
    cin => cout_ha12,
    s => s_ha13,
    cout => cout_ha13
  );
D_HA6_stage2: half_adder
  port map(
    a => nb5_out,
    b => a5_out,
    cin => cout_ha13,
    s => s_ha14,
    cout => cout_ha14
  );
D_HA7_stage2: half_adder
  port map(

```

```

        a => nb6_out,
        b => a6_out,
        cin => cout_ha14,
        s => s_ha15,
        cout => cout_ha15
    );
D_HA8_stage2: half_adder
    port map(
        a => nb7_out,
        b => a7_out,
        cin => cout_ha15,
        s => s_ha16,
        cout => cout_ha16
    );
D1_mux1: mux
    port map(
        I1 => s_ha1,
        I2 => s_ha9,
        S => cout_ha16,
        O => out_m1
    );
D1_mux2: mux
    port map(
        I1 => s_ha2,
        I2 => s_ha10,
        S => cout_ha16,
        O => out_m2
    );
D1_mux3: mux
    port map(
        I1 => s_ha3,
        I2 => s_ha11,
        S => cout_ha16,
        O => out_m3
    );
D1_mux4: mux
    port map(
        I1 => s_ha4,
        I2 => s_ha12,
        S => cout_ha16,
        O => out_m4
    );
D1_mux5: mux
    port map(
        I1 => s_ha5,
        I2 => s_ha13,
        S => cout_ha16,
        O => out_m5
    );
D1_mux6: mux
    port map(
        I1 => s_ha6,
        I2 => s_ha14,
        S => cout_ha16,
        O => out_m6
    );
D1_mux7: mux
    port map(
        I1 => s_ha7,
        I2 => s_ha15,
        S => cout_ha16,
        O => out_m7
    );
D1_mux8: mux
    port map(
        I1 => s_ha8,

```

```

        I2 => s_ha16,
        S => cout_ha16,
        O => out_m8
    );
D_HA1_stage3: half_adder
    port map(
        a  => out_m1,
        b  => out1_trig,
        cin => '0',
        s  => s_ha1_s3,
        cout => cout_ha1_s3
    );
D_HA2_stage3: half_adder
    port map(
        a  => out_m2,
        b  => out2_trig,
        cin => cout_ha1_s3,
        s  => s_ha2_s3,
        cout => cout_ha2_s3
    );
D_HA3_stage3: half_adder
    port map(
        a  => out_m3,
        b  => out3_trig,
        cin => cout_ha2_s3,
        s  => s_ha3_s3,
        cout => cout_ha3_s3
    );
D_HA4_stage3: half_adder
    port map(
        a  => out_m4,
        b  => out4_trig,
        cin => cout_ha3_s3,
        s  => s_ha4_s3,
        cout => cout_ha4_s3
    );
D_HA5_stage3: half_adder
    port map(
        a  => out_m5,
        b  => out5_trig,
        cin => cout_ha4_s3,
        s  => s_ha5_s3,
        cout => cout_ha5_s3
    );
D_HA6_stage3: half_adder
    port map(
        a  => out_m6,
        b  => out6_trig,
        cin => cout_ha5_s3,
        s  => s_ha6_s3,
        cout => cout_ha6_s3
    );
D_HA7_stage3: half_adder
    port map(
        a  => out_m7,
        b  => out7_trig,
        cin => cout_ha6_s3,
        s  => s_ha7_s3,
        cout => cout_ha7_s3
    );
D_HA8_stage3: half_adder
    port map(
        a  => out_m8,
        b  => out8_trig,
        cin => cout_ha7_s3,
        s  => s_ha8_s3,

```

```

        cout => cout_ha8_s3
    );
D_HA9_stage3: half_adder
    port map(
        a  => '0',
        b  => out9_trig,
        cin => cout_ha8_s3,
        s  => s_ha9_s3,
        cout => cout_ha9_s3
    );
D_HA10_stage3: half_adder
    port map(
        a  => '0',
        b  => out10_trig,
        cin => cout_ha9_s3,
        s  => s_ha10_s3,
        cout => cout_ha10_s3
    );
D_HA11_stage3: half_adder
    port map(
        a  => '0',
        b  => out11_trig,
        cin => cout_ha10_s3,
        s  => s_ha11_s3,
        cout => cout_ha11_s3
    );
D_HA12_stage3: half_adder
    port map(
        a  => '0',
        b  => out12_trig,
        cin => cout_ha11_s3,
        s  => s_ha12_s3,
        cout => cout_ha12_s3
    );
D_HA13_stage3: half_adder
    port map(
        a  => '0',
        b  => out13_trig,
        cin => cout_ha12_s3,
        s  => s_ha13_s3,
        cout => cout_ha13_s3
    );
D_HA14_stage3: half_adder
    port map(
        a  => '0',
        b  => out14_trig,
        cin => cout_ha13_s3,
        s  => s_ha14_s3,
        cout => cout_ha14_s3
    );
D_HA15_stage3: half_adder
    port map(
        a  => '0',
        b  => out15_trig,
        cin => cout_ha14_s3,
        s  => s_ha15_s3,
        cout => cout_ha15_s3
    );
D_HA16_stage3: half_adder
    port map(
        a  => '0',
        b  => out16_trig,
        cin => cout_ha15_s3,
        s  => s_ha16_s3,
        cout => cout_ha16_s3
    );

```

```

D_1: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha1_s3,
    Q => out1_trig
);

D_2: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha2_s3,
    Q => out2_trig
);

D_3: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha3_s3,
    Q => out3_trig
);

D_4: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha4_s3,
    Q => out4_trig
);

D_5: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha5_s3,
    Q => out5_trig
);

D_6: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha6_s3,
    Q => out6_trig
);

D_7: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha7_s3,
    Q => out7_trig
);

D_8: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha8_s3,
    Q => out8_trig
);

D_9: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha9_s3,
    Q => out9_trig
);

D_10: trigger
port map(
    CLK => CLK,

```

```

    RESET => RESET,
    DATA => s_ha10_s3,
    Q => out10_trig
);
D_11: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha11_s3,
    Q => out11_trig
);
D_12: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha12_s3,
    Q => out12_trig
);
D_13: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha13_s3,
    Q => out13_trig
);
D_14: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha14_s3,
    Q => out14_trig
);
D_15: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha15_s3,
    Q => out15_trig
);
D_16: trigger
port map(
    CLK => CLK,
    RESET => RESET,
    DATA => s_ha16_s3,
    Q => out16_trig
);

```

```
cin_in <= '1';
```

```

D_out(1) <= out1_trig;
D_out(2) <= out2_trig;
D_out(3) <= out3_trig;
D_out(4) <= out4_trig;
D_out(5) <= out5_trig;
D_out(6) <= out6_trig;
D_out(7) <= out7_trig;
D_out(8) <= out8_trig;
D_out(9) <= out9_trig;
D_out(10) <= out10_trig;
D_out(11) <= out11_trig;
D_out(12) <= out12_trig;
D_out(13) <= out13_trig;
D_out(14) <= out14_trig;
D_out(15) <= out15_trig;
D_out(16) <= out16_trig;

```

```
end spec_device;
```

Додаток А2. VHDL-код повного однорозрядного двійкового суматора.

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;
entity half_adder is
    port(
        a : in STD_LOGIC;
        b : in STD_LOGIC;
        cin : in STD_LOGIC;
        s : out STD_LOGIC;
        cout : out STD_LOGIC
    );
end half_adder;

architecture half_adder of half_adder is
    signal out_xor1, out_and1, out_and2 : STD_LOGIC;
begin
    out_xor1 <= a xor b;
    s <= out_xor1 xor cin;
    out_and1 <= out_xor1 and cin;
    out_and2 <= a and b;
    cout <= out_and1 or out_and2;
end half_adder;
```

Додаток А3. VHDL-код однорозрядного мультиплексора на два входи.

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use IEEE.std_logic_unsigned.all;

entity mux is
    port (
        I1 : in std_logic;
        I2 : in std_logic;
        S : in std_logic;
        O : out std_logic
    );
end entity;

architecture mux_arch of mux is
begin
    process (S, I1, I2)
    begin
        case S is
            when '0' => O <= I1;
            when '1' => O <= I2;
            when others => O <= 'X';
        end case;
    end process;
end architecture;
```

Додаток А4. VHDL-код вхідних тригерів.

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity ffd is
    port (
        RESET : in std_logic;
```



```

        CLK : in std_logic;
        DATA : in std_logic;
        nQ : out std_logic;
        Q : out std_logic
    );
end entity;

architecture ffd_arch of ffd is

begin

    process (CLK, RESET)
begin
    if RESET='1' then
        Q <= '0';
        nQ <= '0';
    elsif (CLK'event and CLK='1') then
        Q <= DATA;
        nQ <= not DATA;
    end if;
end process;
end ffd_arch;

```

5. VHDL-код вихідних тригерів.

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity triger is
    port (
        RESET : in std_logic;
        CLK : in std_logic;
        DATA : in std_logic;
        Q : out std_logic
    );
end entity;

architecture triger_arch of triger is

begin

    process (CLK, RESET)
begin
    if RESET='1' then
        Q <= '0';
    elsif (CLK'event and CLK='1') then
        Q <= DATA;
    end if;
end process;

end triger_arch;

```

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи та
навчальної роботи
Національного університету водного
господарства та природокористування

Сорока В.С.

2018 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Сидора Андрія Івановича **“Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі”** у науково-дослідній роботі на тему: **“Підвищення ефективності обробки даних та захисту інформації в комп’ютерних системах”**
(державний реєстраційний номер 0117U001086)

Комісія у складі: голови деректора навчально-наукового інституту автоматки, кібернетики та обчислювальної техніки, д.п.н., проф. Тадеєва Петра Олександровича та членів: завідувача кафедри обчислювальної техніки к.т.н., доц. Круліковського Бориса Борисовича, к.т.н., доц. Соломка Михайла Тимофійовича підтверджує, що результати кандидатської дисертації Сидора Андрія Івановича впроваджені і використовуються в навчальному процесі на кафедрі обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористуванняч при вивчені дисциплін: “Теорія інформацій та кодування”, “Мікропроцесорні системи”, для студентів спеціальності 123 Комп’ютерна інженерія, а саме:

- запропоновані структури та мікроелектронна реалізація спецпроцесорів визначення модульної різниці між двома двійковими числами базису Радемахера та спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами, шляхом конвеєрного формування паралельних унітарних кодів та кодів Хаара-Радемахера з накопиченням їх сум у базисі Радемахера, швидкодія запропонованих спецпроцесорів підвищується у порівняні з відомими аналогами реалізованими в унітарному базисі у 2” разів.

Деректор навчально-наукового
інституту автоматки, кібернетики
та обчислювальної техніки,
д.п.н., проф.

П.О.Тадеєв

Завідувач кафедри обчислювальної
техніки НУВГП,
к.т.н., доц.

Б.Б. Круліковський

Доцент кафедри обчислювальної
техніки НУВГП,
к.т.н., доц.

М.Т. Соломко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор інституту мікропроцесорних
систем керування об'єктами
електроенергетики



к.т.н. Сабадаш І.О.

10 2018 р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи Сидора Андрія Івановича "Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі"

За реалізації систем контролю технологічних станів обладнання електричних підстанцій 6-35 кВ використано наступні результати дисертаційної роботи Сидра А.І.:

1. Методи та алгоритми розпізнавання збурень у високовольтних лініях електропересялень та шляхом оцінки Хеммінгової віддалі між характеристиками образно-кластерної моделі у стані норми та виникненні аварійних ситуацій в промисловому обладнанні електричних підстанцій 6-10 кВ

2. Структура спецпроцесора оснащеного АЦП у базисі Хаара-Крестенсона та визначання інтегрованої модульної різниці згідно квадратичної Евклідової відстані.

Вказані результати використані за розробки алгоритмів та програмно-апаратних засобів встановлення фактів збурень у високовольтних лініях електропередач, що дозволило:

1. Підвищити швидкодію встановлення фактів збурень у високовольтних лініях електропересялень.

2. Зменшити у 16 разів часову складність спецпроцесорів оцінки Хеммінгової віддалі між сигналами за рахунок виконання математичних операцій у базисі Хаара-Радемахера.

Ці результати використані за виконання в процесі впровадження інформаційно-діагностувальної системи моніторингу стану ізоляції високовольтних кабелів у мережах 6-35 кВ "Альтра" у підприємстві ВАТ ЕК «Дніпробленерго».

Головний інженер
к.т.н., доцент

Кідиба В.П.

Завідувач лабораторії
мікропроцесорної техніки
к.т.н., доцент

Баран П.М.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Сидора Андрія Івановича **«Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі»** у науково-дослідній роботі на тему:

«Розробка теорії, методології та алгоритмів структуризації образно-кластерних моделей моніторингу станів електричних підстанцій високовольтних ЛЕП»
(державний реєстраційний номер 0116U006792)

Ми, комісія, у складі звідувача кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету (ТНЕУ), наукового керівника науково-дослідної роботи д.т.н. професора Николайчука Я.М. та начальника науково-дослідної частини ТНЕУ Письменного В.І., створені для приймання роботи, виконаної у рамках тематичного плану науково-дослідних робіт ТНЕУ на 2016-2017р. на тему «Розробка теорії, методології та алгоритмів структуризації образно-кластерних моделей моніторингу станів електричних підстанцій високовольтних ЛЕП» (державний реєстраційний номер 0116U006792), встановила:

1. Виконані Сидором А.І. у підрозділі 1.2 Основи теорії джерел інформації та розпізнавання образів удосконалили процеси розпізнавання одновірних та двовірних образів на основі лінійної оцінки Евклідової відстані та систематизували методи розпізнавання образів у Хеммінговому просторі.
2. Розроблена за участю Сидора А.І. схемотехнічна реалізація пристрою визначення Хеммінгової відстані між двома сигналами (патент на корисну модель № 127093, 2018 р.), в якому досягнуто підвищення швидкодії пристрою у порівнянні з прототипом в 2^n – разів, де n – розрядність паралельного АЦП, де $n = 2, 4, 8$, успішно застосована для моніторингу станів електричних підстанцій високовольтних ЛЕП.

Завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем ТНЕУ,
д.т.н., проф.

Я.М. Николайчук

Науковий керівник науково-дослідної роботи,
д.т.н., проф.

Я.М. Николайчук

Начальник науково-дослідної частини

В.І. Письменний

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Управління патрульної поліції

в Тернопільській області ДПП

Старший лейтенант поліції

Шевчук Б.Б.

" 3 " 10 2018 р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету Сидора Андрія Івановича "Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі"

У процесі розроблення методів та засобів кодування та визначення оцінки Хеммінгової віддалі для системи категорій дорожніх знаків одержані особисто Сидором А.І. і використані в Управлінні патрульної поліції в Тернопільській області такі результати наукових досліджень:

1. Метод кодування та визначення оцінки Хеммінгової віддалі для дорожніх знаків, шляхом експертних оцінок інформативних характеристик ознак дорожніх знаків у вигляді бінарних кодів різної розрядності, на основі яких отримані таблиці, діаграми та функціональні характеристики оцінок Хеммінгової віддалі стандартної системи дорожніх знаків, що дозволяє комп'ютеризувати процес розпізнавання знаків при руху транспортних засобів, на відміну від відомих, які забезпечують розпізнавання часткової категорії знаків.

2. Розроблено алгоритми та програмні засоби комп'ютеризованого розпізнавання на основі оцінок Хеммінгової віддалі для дорожніх знаків.

3. На основі виконаних наукових досліджень розроблені рекомендації удосконалення структур та інформаційних характеристик дорожніх знаків, які мають найменші оцінки Хеммінгової віддалі, наприклад категорії попереджувальних знаків "напрямок повороту".

Результати дисертаційних досліджень Сидора А.І. прийняті для розгляду та можуть бути застосовані у процесах удосконалення державної системи дорожніх знаків руху транспортних засобів.

Заступник начальника
УПП в Тернопільській області
Ст. лейтенант поліції



Сороковий О.М.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
економічного університету
д.е.н., проф. Задорожний З. М. В.



“ 24 ” 10 2018 р *

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Сидора Андрія Івановича на тему:
«Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі»

Комісія у складі: голови – декана факультету комп’ютерних інформаційних технологій, д.г.н., проф. Дивака Миколи Петровича та членів: начальника науково-дослідної частини ТНЕУ Письменного Валерія Івановича, наукового керівника науково-дослідних робіт, д.т.н., професора Николайчука Ярослава Миколайовича склали цей акт про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Сидора А.І. використані під час виконання науково-дослідних робіт, а саме:

1) науково-дослідної роботи на тему «Розробка теорії, методології та алгоритмів структуризації образно-кластерних моделей моніторингу станів електричних підстанцій високовольтних ЛЕП» (державний реєстраційний номер 0116U006792), у якій автором проведено дослідження методів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі, розроблена схмотехнічна реалізація пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами, що застосована для моніторингу електричних підстанцій високовольтних ЛЕП;

2) науково-дослідної роботи на тему «Розробка та реалізація мікропроцесорного струмового захисту ліній електропересилань 6-35 кВ» (державний реєстраційний номер 0117U005104), у якій автором запропоновані методи та алгоритми розпізнавання збурень у високовольтних лініях електропересилань та шляхом оцінки Хеммінгової віддалі між характеристиками образно-кластерної моделі у стані норми та виникненні аварійних ситуацій в промисловому обладнанні електричних підстанцій 6-10 кВ, розроблена структура спецпроцесора оснащеного АЦП у базисі Хаара-Крестенсона та визначення інтегрованої модульної різниці згідно квадратичної Евклідової відстані;

3) науково-дослідної роботи на тему «Розробка теорії, критеріїв, оцінки системних характеристик прискорювачів арифметико-логічних операцій у теоретико-числових базисах» (державний реєстраційний номер 0118U003552), у якій автором виконано аналіз методів розпізнавання багатомірних образів на основі оцінки Хеммінгової віддалі, розроблена схмотехнічна реалізація пристроїв визначення Хеммінгової віддалі у теоретико-числових базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона.

Голова комісії:

декан факультету комп’ютерних
інформаційних технологій,
д.т.н., проф.


Дивак М.П.

Члени комісії:

начальник науково-дослідної
частини
Науковий керівник
науково-дослідних робіт,
д.т.н., професор


Письменний В.І.


Николайчук Я.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Тернопільського національного
економічного університету

Шинкарик М.І.

" 25 " 10 2018 р.


АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Сидора Андрія Івановича **“Методи та процесори розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі”** у науково-дослідній роботі на тему: **“Розробка теоретичних засад методів формування та цифрового опрацювання даних у розподілених спеціалізованих комп’ютерних системах”** (державний реєстраційний номер 0112U008458)

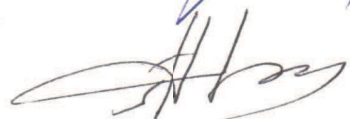
Комісія у складі: голови декана факультету комп’ютерних інформаційних технологій, д.т.н. проф., Дивака Миколи Петровича та членів: завідувача кафедри спеціалізованих комп’ютерних систем д.т.н. проф. Николайчука Ярослава Миколайовича, к.т.н. доц. Сегіна Андрія Ігоровича підтверджує, що результати кандидатської дисертації Сидора Андрія Івановича впроваджені і використовуються в навчальному процесі на кафедрі спеціалізованих комп’ютерних систем Тернопільського національного економічного університету при вивченні дисциплін: “Цифрова обробка сигналів і зображень”, “Низові комп’ютерні системи управління”, для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології, а саме:

- надається метод оцінки Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами, шляхом конвеєрного формування цифрових даних сигналів в паралельних унітарних кодах, інвертованих паралельних кодів Хаара та накопичення модульних різниць в базисі Радемахера;
- надається інформація щодо методу комп’ютиризованого розпізнавання дорожніх знаків в процесі руху транспортних засобів на автомобільних трасах, шляхом їх кластеризації по призначенню та запрограмованій системі бінарного кодування інформаційних ознак;
- надається інформація щодо методів побудови спецпроцесорів у теоретико-числових базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона на основі визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами згідно оцінки Евклідової відстані, які реалізуються в мікроелектронному виконанні на ПЛІС.

Декан факультету комп’ютерних
інформаційних технологій ТНЕУ,
д.т.н., проф.


М.П. Дивак

Завідувач кафедри спеціалізованих
комп’ютерних систем ТНЕУ,
д.т.н., проф.


Я.М. Николайчук

Доцент кафедри спеціалізованих
комп’ютерних систем ТНЕУ,
к.т.н., д.оц.


А.І. Сегін