

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ВОЗНА Наталія Ярославівна**

УДК 681.325.36

**ДИСЕРТАЦІЯ**

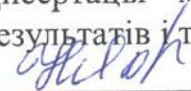
**ТЕОРІЯ, МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ СТРУКТУРИЗАЦІЇ  
ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ У РОЗПОДІЛЕНИХ  
КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ**

05.13.05 - Комп'ютерні системи та компоненти

05 "Технічні науки"  
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

  
Возна Н.Я.  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант: **Николайчук Ярослав Миколайович,**  
доктор технічних наук, професор,  
академік Міжнародної академії інформатики

Ідентичність всіх примірників дисертації  
ЗАСВІДЧУЮ:

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради  Я.Т.Луцик



Львів – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Возна Н.Я.* Теорія, методи та засоби структуризації поліфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 "Комп'ютерні системи та компоненти". – Тернопільський національний економічний університет. – Національний університет "Львівська політехніка" МОН України, Львів, 2020.

Робота присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми **розвитку теорії, методології та удосконалення структур поліфункціональних обчислювальних засобів, які є компонентами складних комп'ютерних систем.** В Україні та світовому просторі практично відсутній узагальнений підхід до проблеми розробки теоретичних основ, методології, методів аналізу та вдосконалення структурної організації поліфункціональних даних у складних розподілених комп'ютерних та кіберфізичних системах. Розробка теоретичних засад та практична реалізація методів оцінки та вдосконалення теорії структурної складності поліфункціональних даних дозволяє ціленаправлено оптимізувати системні характеристики відповідних структурних рішень апаратно-програмних засобів складних комп'ютеризованих систем.

*Об'єктом дослідження* є процеси структуризації та оцінки структурної складності елементів та функціональних компонентів складних розподілених комп'ютерних та кіберфізичних систем при формуванні, передаванні, опрацюванні, представленні, зберіганні та використанні структуризованих поліфункціональних даних.

*Предметом дослідження* є методи і засоби структуризації даних у розподілених комп'ютерних та кіберфізичних системах та вдосконалення системних характеристик поліфункціональних даних, моделей руху даних та спецпроцесорних компонентів розподілених комп'ютерних систем на основі

розроблених теоретичних засад, методів та критеріїв оцінки їх структурної складності.

Методи дослідження засновані на фундаментальних положеннях теорії інформації, теорії складних систем, теорії ймовірностей, теорії сигналів, теорії розпізнавання образів у Хеммінговому просторі, теорії чисел, теорії мереж Петрі, теорії джерел інформації, теоретичних засадах алгебри логіки та проектування програмно-апаратних засобів обчислювальної техніки.

У дисертаційній роботі закладено нові й розвинуто існуючі теоретичні та прикладні основи критеріїв оцінки та розрахунку структурної складності створюваних і використовуваних компонентів складних розподілених комп'ютерних та кіберфізичних систем, що дозволило покращити системні характеристики компонентів комп'ютеризованих систем та ефективність їх застосування в кіберфізичних системах за рахунок зменшення структурної, апаратної та часової складності.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані наукові результати дозволили розробити та застосувати нові критерії оцінки та розрахунку структурної складності компонентів обчислювальних засобів та розподілених кіберфізичних систем і впровадити їх у ряді промислових підприємств, у наукову діяльність та навчальний процес.

У дисертаційній роботі виконаний аналіз стану та тенденції розвитку теорії, методів та засобів розподілених комп'ютерних систем (РКС). Здійснено аналіз робіт зарубіжних та вітчизняних фундаторів теоретичних основ розробки інформаційних технологій та побудови РКС, що дозволило сформулювати базові напрямки розвитку теорії, методології та техніки РКС. Систематизовані компоненти архітектур дистрибутивних та корпоративних РКС, на основі яких показана актуальність вирішення задач формалізації руху структуризованих даних в РКС, які охоплюють проблеми контролю та управління промисловими об'єктами.

Проаналізовані характеристики інформаційних процесів цифрового опрацювання даних на основі онтологічних моделей в існуючих системах, які розроблені і тиражовані відомими фірмами: Mentor Graphics, Synopsys, LSI

Logic, Cadence, Design Systems, Sun, Hewlett Packard, Intel, ABB, Analog Devices, Motorola, Altera та Xilinx, що дозволило встановити їх недоліки та функціональні обмеження. В результаті встановлено, що важливою проблемою, яка дозволяє суттєво оптимізувати системні характеристики складних, особливо проблемно-орієнтованих РКС, є розробка концепції та фундаментальних теоретичних основ структуризації даних.

Розроблена концепція структуризації даних, яка охоплює теоретичні основи, методи та засоби оптимізації організації руху та цифрового опрацювання даних в РКС.

Запропоновані критерії оцінки структурної складності у вигляді зваженої суми структурних характеристик та врахування інформативних характеристик структур. Розроблений функціонал контролю стану об'єкта управління, який враховує масиви оцифрованих моніторингових даних, технологічні стани, математичні сподівання, статистичні, кореляційні, спектральні, кластерні та ентропійні характеристики, а також логіко-статистичні інформаційні моделі контролю станів відхилень об'єкту від норми.

Розроблені теоретичні основи та досліджені системні характеристики базисних ортогональних функцій різних теоретико-числових базисів, зокрема Фур'є, унітарного, Хаара, Радемахера, Крестенсона та Галуа, які застосовуються для кодування поліфункціональних даних у середовищі інтерфейсних взаємодій компонентів РКС.

Викладені математичні засади характеристик способів структуризованого кодування станів джерел інформації на основі лінійних та нелінійних перетворень, які є компонентами обчислювальних операцій при реалізації статистичного, кореляційного, спектрального та ентропійного аналізів.

Проведений аналіз методів ентропійного опрацювання структуризованих даних на основі оцінок мір ентропії, запропонованих Р.Хартлі, К. Шенноном, Я.Николайчуком. Результати проведених досліджень склали основи синтезу високопродуктивних процесорів визначення ентропії з глибоким розпаралеленням обчислювальних процесів.



Розроблені основи теорії структуризації поліфункціональних компонентів складних комп'ютерних систем, здійснений диференційний аналіз елементів структур складних систем, визначені класи елементів у якості елементарних структурних одиниць складних обчислювальних та мережевих середовищ.

Розроблені теоретичні основи кодування структуризованих даних у теоретико-числових базисах: унітарному, Радемахера, Крестенсона, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона. Викладені теоретичні засади формування та кодування пікселів у двовимірних структурах напівтонових зображень. Визначені кількісні оцінки квантів структурної складності такого класу даних. Викладені теоретичні засади методів опрацювання зображень на основі оцінок: Евклідової, Манхеттенської, статичної, Чебишова, Варда та центроїдної відстаней.

Розроблені методи кодування пікселів кольорових зображень у базисах Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона. Розраховані набори взаємно-простих модулів для RGB-стандарту колірному простору Adobe RGB, колірної шкали ColorChecker SG. Обґрунтований спосіб кодування RGB-пікселів у базисі Крестенсона. При цьому основна перевага застосування кодів Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона полягає у суттєвому (на 2-3 порядки) збільшенні швидкодії обчислень на основі модульної арифметики порівняно з двійковими кодами базису Радемахера.

Удосконалений метод шифрозахисту окремих RGB-пікселів кольорових зображень, представлених кодами Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона.

Удосконалено методи кодування та розпізнавання аналогових сигналів на основі лінійної та квадратичної оцінок Хеммінгової віддалі.

Розроблені теоретичні засади методів структурних перетворень гармонічних сигналів на основі принципів рандомізації, нейропроцесорного опрацювання, на основі оцінки нормованого коефіцієнта взаємкореляції та цифрового інтегрального опрацювання функцій огинаючих низьких та високих частот.

Вперше запропонований інтегрально-диференціальний метод розпізнавання збурень у високовольтних електромережах шляхом квадратичного перетворення структури гармонічних сигналів та накопичення інтегралу модульних різниць фазних струмів зсунутих на інтервал півперіода промислової частоти.

Вперше розроблена часова продукційна модель виявлення, розпізнавання та ідентифікації збурень в електромережах типу накиду, короткого замикання та запуску потужних електроприводів у високовольтних лініях електропересилань, яка дозволяє розпізнавати даний клас збурень шляхом порівняння квадратичної інтегрально-різницевої функції з пороговою уставкою.

На основі теоретичних засад запропонованого методу сформульовано алгоритм розпізнавання сигналів промислової частоти та ідентифікації типів збурень, який дозволив реалізувати технологію програмного моделювання різних типів замикань та запуску потужних електроприводів у високовольтних електромережах.

Запропонований метод побудови образно-кластерної моделі контролю квазістаціонарних технологічних процесів на основі розробленого функціоналу станів технологічного процесу шляхом побудови сукупності інформаційних, статистичних, кореляційних, спектральних, логіко-статистичних, кластерних та ентропійних моделей, який, у порівнянні з відомими методами, дозволяє розпаралелити обчислювальні процеси розрахунку параметрів моделей та відобразити на моніторі оператора стан об'єкту контролю. Таке відображення ідентифікує стани "норми", "розвитку аварії" та "аварії", що дозволяє підвищити реакцію оператора на відхилення технологічного процесу від норми та попередити виникнення аварійних ситуацій. При цьому структурна складність розробленої образно-кластерної моделі, у порівнянні з іншими формами представлення станів технологічного процесу, дозволяє суттєво зменшити об'єми реєстрованих інформаційних даних, а також підвищити швидкодію реакції оператора при виникненні нештатних ситуацій.

Розроблені теорія, моделі, методи та засоби лягли в основу побудови ефективних програмно-апаратних засобів формування, перетворення,

передавання, опрацювання, зберігання, відображення та використання структуризованих поліфункціональних даних. Практична цінність отриманих наукових результатів, які викладені у шостому розділі дисертаційної роботи, полягає у наступному:

- розроблені та реалізовані у мікроелектронному виконанні структурні рішення елементів та функціональних компонентів складних РКС:

- 1) швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач паралельного типу на основі застосування парафазних компараторів та спрощеного шифратора, у якому досягнуто зменшення апаратної складності у 8-14 разів та підвищення швидкодії у 2 рази;
- 2) швидкодіючі багаторозрядні суматори пірамідального типу з підвищенням швидкодії у 2-3 рази та зменшенням апаратної складності у 1,5 рази; з прискореним переносом зі зменшеною апаратною складністю у 2 рази та підвищеною швидкістю у 1,5 рази незалежно від розрядності вхідних двійкових чисел;
- 3) матричні та багаторозрядні потокові перемножувачі, які характеризуються підвищеною швидкістю у 2 рази, зменшеною структурною складністю у 5 разів, зменшеною структурною складністю входу-виходів у залежності від розрядності перемножуваних чисел;
- 3) пристрій для визначення ентропії з підвищеною регулярністю структури пристрою та підвищеною швидкістю, у порівнянні з відомими, у 2,6 рази;
- 4) пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач, реалізований шляхом конвеєрного різницево-модульного кореляційного опрацювання гармонічних сигналів промислової частоти 50 Гц, який дозволяє розпізнавати накиди, замикання на землю та запуски потужних електроприводів, та, у порівнянні з відомими, характеризується інваріантністю до амплітуди струмів збурень;

- 5) спосіб контролю параметрів технологічного процесу, який дозволив зменшити структурну складність ідентифікації станів об'єкта управління на 2-3 порядки, зменшити структурну складність образно-кластерної моделі відносно кількості складових алгоритмічних компонентів функціоналу у 22 рази, розширити функціональні можливості, збільшити інформативність та підвищити швидкодію реакції оператора на виникнення нештатних ситуацій;
- б) метод синтезованого кодування та введення алфавітно-цифрових даних на основі синтезованої малогабаритної клавіатури, шляхом оперативно-матричного маскування кодів двох компонентів символів та знаків, що дозволило підвищити криптозахист та рівень кібербезпеки обміну даними між віддаленими підрозділами.

Основні результати наукових досліджень даної дисертаційної роботи впроваджено в Інституті мікропроцесорних систем керування об'єктами електроенергетики (м.Львів) в якості компонента мікропроцесорної керувально-діагностувальної системи "Альтра"; в Тернопільському конструкторському бюро радіозв'язку "Стріла" (м.Тернопіль) у якості мікроелектронних компонентів спецтехніки контролю станів електричних високовольтних підстанцій; на ПП "Енерготех НГ" (м.Калуш) метод структуризації станів технологічних об'єктів контролю та управління, алгоритм та програмне забезпечення структурного відображення образно-кластерної моделі моніторингових станів промислових об'єктів, що дозволило зменшити на 2-3 порядки об'єми інформаційних потоків від моніторингових об'єктів; при організації систем передавання захищених від несанкціонованого доступу даних в Управлінні поліції охорони Тернопільської обл.; метод диференціально-різницевого розпізнавання збурень в електромережах для захисту потужних електроприводів від коротких замикань та перевантажень на Львівському державному заводі "Лорта" (м.Львів); при розширенні функціональних властивостей та оптимізації системних характеристик компонентів програмно-апаратних та мережевих засобів вимірювально-

інформаційних систем контролю та управління технологічних параметрів на науково-виробничій фірмі "Зонд" (м.Івано-Франківськ).

Розроблена концепція та методологія структуризації поліфункціональних даних впроваджені у навчальний процес Тернопільського національного економічного університету при викладанні дисциплін "Проектування комп'ютеризованих систем управління", "Цифрова обробка сигналів та зображень", "Теорія автоматичного управління", "Основи системної інженерії", "Основи метрології", "Синтез цифрових систем керування", "Засоби автоматизації вимірювань, контролю та діагностики"

*Ключові слова:* структуризація, структуризовані поліфункціональні дані, критерії структурної складності, розподілені комп'ютерні системи, функціональна, структурна, інформаційна, ентропійна складність.

## ANNOTATION

*N. Y. Vozna.* Theory, methods and tools of structuring multifunctional data in distributed computer systems. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The Thesis for a Doctor of Technical Sciences Degree in Speciality 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Ternopil National Economic University. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2020.

The work is devoted to solving an actual scientific problem of **the development of theory and methodology and improvement of multifunctional computing devices structures, which are the components of complex computer systems**. In Ukraine and in the global space, there is practically no generalized approach to the problem of the development of theoretical foundations, methodology, methods of analysis and improvement of the structural organization of multifunctional data in complex distributed computer and cyber physical systems. The development of the theoretical foundations and practical implementation of evaluation methods and improvement of the theory of structural complexity of multifunctional data allows for purposefully optimizing the system characteristics of the corresponding structural solutions of hardware and software of complex computerized systems.

*The object of the research* is presented by the processes of structuring and evaluating the structural complexity of the elements and functional components of complex distributed computer and cyber physical systems when generating, transmitting, processing, presenting, storing and using structured multifunctional data.

*The subject of the research* includes the methods and tools of data structuring in distributed computer and cyber physical systems and improvement of the system characteristics of multifunctional data, data flow models and special processor components of distributed computer systems based on the developed theoretical principles, methods and criteria for assessing their structural complexity.

Research methods are based on the fundamental provisions of information theory, complex systems theory, probability theory, signal theory, pattern recognition theory in the Hamming space, number theory, Petri net theory, information source theory, theoretical principles of the Algebra of Logic and software and hardware designing of computing devices.

New theoretical and applied bases of evaluation and calculation criteria of structural complexity of the created and applied components of complex distributed computer and cyber physical systems are determined and the existing ones are developed that allowed improving system characteristics of computerized systems components and using them efficiently in cyber physical systems due to the reduction of structural, hardware and time complexity.

The practical value of the work is that the obtained scientific results have allowed developing and applying new criteria for the evaluation and calculation of the structural complexity of the components of computing devices and distributed cyber physical systems and introducing them in a number of industrial enterprises, in scientific activity and educational process.

The analysis of the existing theory, methods and tools of DCS and the trends of their development is carried out in the thesis. The works of foreign and Ukrainian developers of the theoretical foundations of information technology and DCS creation are analyzed that allowed for formulation of basic directions of the development of theory, methodology and techniques of DCS. Components of the distributed and corporate CS architectures are systematized. On this basis the urgency of solving the problems of formalizing the movement of structured data in DCS is shown, referring to the issues of control and management of industrial facilities.

Peculiarities of digital data processing are analyzed based on ontological models in existing systems, which are developed and replicated by well-known companies: Mentor Graphics, Synopsys, LSI Logic, Cadence, Design Systems, Sun, Hewlett Packard, Intel, ABB, Analog Devices, Motorola, Altera and Xilinx that allowed for detection of their shortcomings and functional limitations. As a result, it was found out that the development of the concept and fundamental theoretical

foundations of data structuring makes it possible to significantly optimize system characteristics of complex, in particular, problem-oriented DCSs.

The concept of data structuring is developed, which covers the theoretical bases, methods and tools of optimizing the data movement and digital processing in DCS.

The criteria of structural complexity estimation as weighted sum of structural characteristics are proposed and informative characteristics of structures are taken into account. A control functional of the control facility is developed, in which the arrays of digitized monitoring data, technological states, mathematical expectations, statistical, correlation, spectral, cluster and entropy characteristics, as well as logical and statistical information models of the control over the facility deviations from the norm are taken into account.

The theoretical foundations and system characteristics of the basic orthogonal functions of various Number Systems, including Fourier's, unitary, Haar's, Rademacher's, Krestenson's, and Galois's systems, which are used to encode of multi-functional datas in the environment of interface interactions of DCS components, are developed and studied.

The mathematical principles of the characteristics of structured coding methods of the states of information sources based on linear and nonlinear transformations, which are the components of computational operations while implementing statistical, correlation, spectral and entropy analyses, are presented.

Methods for entropy processing of structured data on the basis of the entropy estimation, proposed by R. Hartley, K. Shannon, and Y. Nykolaichuk, were analyzed. The results of the studies formed the basis for the synthesis of high-performance processors for entropy estimation with deep parallelization of computing processes.

The basics of the theory of structuring multifunctional components of complex computer systems are developed, differential analysis of elements of complex system structures is carried out, element classes are determined as elementary structural units of complex computing and network environments.

Theoretical bases of structured data coding in unitary, Rademacher's, Krestenson's, Rademacher-Krestenson's and Haar-Krestenson's Number Systems are



developed. The theoretical principles of pixel creating and encoding in two-dimensional halftone image structures are given. Quantitative estimates of structural complexity quanta of this class of data are determined. The theoretical principles of image processing methods based on the Euclidean, Manhattan, static, Chebyshev, Varda and centroid distances are presented.

Methods for color image pixel encoding in Rademacher-Krestenson's and Haar-Krestenson's Number Systems are developed. Sets of mutually simple modules for Adobe RGB color space RGB standard, ColorChecker SG color scale, are calculated. A method for encoding RGB pixels in Krestenson's Number System is substantiated. The main advantage of using Rademacher-Krestenson's and Haar-Krestenson's codes is a significant increase (2-3 orders) in the speed of calculations on the basis of modular arithmetic compared to the Rademacher's binary codes.

Encryption method of separate RGB color image pixels represented by Rademacher's, Rademacher-Krestenson's and Haar-Krestenson's codes is improved.

The methods of analog signals encoding and recognizing based on linear and quadratic Hamming distance estimates are improved.

Theoretical foundations of methods for structural transformations of harmonic signals are developed on the basis of the principles of randomization, neuro-processing, estimation of the normalized cross-correlation coefficient and digital integral processing of the functions of the low- and high-frequency envelopes.

For the first time, an integral-differential method of detection of disturbances in high-voltage power grids has been proposed. This method includes quadratic transformation of the structure of harmonic signals and accumulation of the integral of the modular phase current differences shifted to the interval of the half-cycle of the industrial frequency.

For the first time, a temporary production model for detecting, recognizing and identifying disturbances such as load surge, short circuits and powerful electric engines launch in high-voltage power grids has been developed, which allows recognizing a given disturbance class by comparing the quadratic integral-difference function with the threshold set point.

Based on the theoretical principles of the proposed method, an algorithm for recognition of industrial frequency signals and identification of disturbance types was formulated, which made it possible to implement the technology of software modeling of various types of short circuits and the launch of powerful electric engines in high-voltage power grids.

The method of building an image cluster model of control over quasi-stationary technological processes on the basis of the developed functional of the states of the technological process by means of constructing a set of information, statistical, correlation, spectral, logical-statistical, cluster and entropy models is proposed, which in comparison with the known methods makes it possible to parallelize computational processes of calculation of model parameters and display on the operator's monitor the state of the control facility, which identify the states of "norm", "accident development" and "accidents". This allows for increase in the operator's response to the deviation of the process from the norm and prevents emergencies. At the same time, the structural complexity of the developed image-cluster model in comparison with the other forms of representation of technological process states allows to significantly reduce the volumes of registered data, as well as to increase the speed of the operator's response in the event of emergency situations.

The developed theory, models, methods and tools form the basis of building the efficient software and hardware for the formation, conversion, transmission, processing, storage, displaying and using structured of multi-functional datas. The practical value of the scientific results, which are given in the sixth chapter of the thesis, is as follows. Structural solutions of elements and functional components of complex DCSs are developed and implemented in microelectronics:

- 1) High-speed parallel ADC based on the use of para-phase comparators and a simplified encoder, which reduces hardware complexity by 8-14 times and increases efficiency by 2 times.

- 2) high-speed multi-digit pyramid adders with an increase in speed by 2-3 times and a decrease in hardware complexity by 1.5 times; with accelerated carry-skip and reduced hardware complexity by 2 times and increased speed by 1.5 times regardless of the bit-width of the input binary digits.

3) a device for determining entropy with increased regularity of the device structure and increased speed, compared to the known ones by 2.6 times;

4) a device for relay protection of high-voltage transmission lines, implemented by the conveyor difference-modular correlation processing of harmonic signals of industrial frequency of 50 Hz, which allows for detection of load surges, short circuits and powerful electric engines launch, which, in comparison with the known ones, is characterized by the invariance to the amplitude of disturbance currents;

5) a method of controlling the parameters of the technological process, which allowed reducing the structural complexity of the identification of the control facility states by 2-3 orders, decreasing the structural complexity of the image-cluster model in relation to the number of components of the algorithmic functional by 22 times, increasing the functionality and informativeness and the operator's response to the emergencies;

6) the method for synthesized encoding and inputting alphanumeric data on the basis of the synthesized small keyboard, by means of operative-matrix masking of two components codes of symbols and signs, which allowed for increase in crypto protection and the level of cybersecurity of data exchange between the remote departments.

The main results of the research were implemented at the Institute of Microprocessor Control Systems for Power Facilities (Lviv) as a component of the microprocessor control and diagnostic system "Altra"; at Ternopil Design Bureau of Radio Engineering "Strila"(Ternopil) as microelectronic components of the control equipment for the state of power high-voltage substations; at Private Enterprise "Energotech NG" (Kalush) as the method for structuring the states of technological objects of control and management, algorithm and software of structural mapping of image-cluster model for monitoring the states of industrial facilities allowed reducing the volumes of information flows from monitoring facilities by 2-3 orders.

The concept and methodology of structuring multifunctional data were developed and introduced into the educational process of Ternopil National Economic University while teaching the disciplines "Design of computerized control

systems", "Digital signal and image processing", "Theory of automatic control", "Fundamentals of system engineering", "Fundamentals of metrology".

*Keywords:* structuring, structured multifunctional data, structural complexity criteria, distributed computer systems, functional, structural, information and entropy complexity.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### *Статті у наукових фахових виданнях України та закордонних журналах:*

1. **Возна Н.Я.** Теорія моделей джерел інформації та формування ідентифіковано-структуризованих даних комп'ютеризованих систем / **Н.Я. Возна**, Я.М. Николайчук // Научно-теоретический журнал "Искусственный интеллект". ІПШ МОН і НАН України "Наука і освіта". – 2009. - №1. – С.26-34.

2. **Возна Н.Я** Теорія та методи побудови моделей руху даних у розподілених КС / **Н.Я. Возна** // Вісник національного університету "Львівська політехніка" Комп'ютерні системи та мережі. – 2010. - №688. – С.60-64.

3. **Возна Н.Я.** Формалізація моделей руху даних розподілених комп'ютерних систем та оцінювання їх структурної складності / **Н.Я. Возна** // Науковий журнал "Вісник Тернопільського національного технічного університету ім.І.Пулюя" – 2011. - №1. Т.16. – С.167-179.

4. **Возна Н.Я.** Метод формування структуризованих даних квазістаціонарних об'єктів на основі системи числення залишкових класів базису Крестенсона / **Н.Я. Возна**, Я.М. Николайчук, Н.Г. Ширмовська // Науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ" - 2011. - №3(40). – С.62-65.

5. **Возна Н.Я** Інформаційні технології формування техніко-економічних даних для об'єктів управління різних класів стаціонарності / **Н.Я. Возна** // Міжнародний науково-технічний журнал "Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології". - 2011. - №2(22). - С. 74-78.

6. **Николайчук Я.М.** Дослідження системних функцій та архітектури інтерактивних комп'ютерних мереж / Я.М. Николайчук, Р.В. Цанько, **Н.Я. Возна** // Вісник Хмельницького національного університету - Хмельницький, 2012.- №4 (191) - С.73-78

7. **Методи спектрального косинусного перетворення Фур'є для розпізнавання сигналів у Хеммінговому просторі на основі різних кореляційних функцій та теоретико-числових базисів / Я. Николайчук, В. Піх, Т. Заведюк, Н. Возна** // Вісник національного університету "Львівська політехніка" Комп'ютерні системи та мережі. - 2013. - №773. - С. 89-98.

8. **Vozna N.Ya.** Conception and Theoretical Bases for Solving the Problem of Data Structuring in Information Computerized Systems / **N.Ya. Vozna**, Ya.M. Nycolaychuk , N.I. Alishov // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. - Baku. Azerbaijan, 2013. - Volume 1, № 2. - P.112–117. (INDEXCOPERNICUS). ISSN 2310-9017.

9. **Возна Н.Я.** Основи теорії структуризації поліфункціональних елементів складних систем / **Н.Я. Возна** // Вісник Хмельницького національного університету. - Хмельницький, 2015. - №2 (223). - С.204-208.

10. **Структуризація, методи та моделі інтерактивної взаємодії оператор – інформаційна система моніторингу об'єктів нафтогазової галузі / Н.Я. Возна, Г.Я. Процюк, І.Р. Пітух, Я.М. Николайчук** // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - Івано-Франківськ, 2015. - №2(55). – С.111-118.

11. **Возная Н.Я.** Теоретические основы структуризации полифункциональных данных в различных теоретико-числовых базисах / **Н.Я. Возная** // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. - Baku. Azerbaijan, 2015. - Volume 3, № 1. - P.62–70. (INDEXCOPERNICUS). ISSN 2310-9017.

12. **Возна Н. Я.** Структуризація поліфункціональних даних в унітарному теоретико-числовому базисі / **Н.Я. Возна** // Міжнародний науково-технічний журнал “Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології”. - 2015.- №(29). - С. 35–44.

13. Метод структуризації образно-кластерної моделі состояний квазистационарного об'єкта управління / **Н.Я. Возна**, Н.И. Алишов, Г.Я. Процюк, Я.Н. Николайчук // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. - Baku. Azerbaijan, 2015. - Volume 3, № 2. - P.105–115. (INDEXCOPERNICUS). ISSN 2310-9017.

14. Проблеми структуризації інформатики моніторингу нафтових родовищ та захисту водних ресурсів Карпат / Я.М. Николайчук, Б.Б. Круліковський, **Н.Я. Возна**, Г.Я. Процюк // Вісник національного університету водного господарства та природокористування - Рівне, 2015. - №3(71) Ч.2. – С.258-264.

15. Concept of construction and structural organization of interactive systems of adaptive distance learning / Yu.P. Franko, I.R. Pitukh, **N.Ya. Vozna**, M.V. Pikuliak // International scientific professional periodical journal "The unity of science". - Vienna. Austria, April, 2016. - P.68–70. ISSN 9091-1792.

16. **Возна Н.Я.** Теоретичні засади методу оцінки ентропії структуризованих поліфункціональних даних / **Н.Я. Возна** // Вісник національного університету "Львівська політехніка" Комп'ютерні системи та мережі. - 2016. - №857. - С.17-28.

17. **Возна Н.Я.** Критерій структурної складності та оцінки розширеної Хеммінгової віддалі для просторових об'єктів / **Н.Я.Возна**, А.І Сидор // Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. - Львів: НЛТУ України - 2017. - №27(4). - С.159-165.

18. Оптимізація структурних рішень комбінаційних суматорів згідно критеріїв мінімальної часової, апаратної та структурної складності / Круліковський Б.Б., **Возна Н.Я.**, Грига В.М., Давлетова А.Я. // Математичне та комп'ютерне моделювання: Технічні науки: збірник наукових праць. - Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет ім. І. Огієнка, 2017. – Вип.15. – С.97-103.

19. Люра О.П. Дослідження та оптимізація характеристик компонентів мікроелектронного пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач / О.П.Люра, **Н.Я.Возна** // Науковий вісник НЛТУ України:

збірник науково-технічних праць. - Львів: НЛТУ України, 2017. - №27(5). - С.148-154.

20. Круліковський Б.Б. Теоретичні основи та критерії оцінки структурної складності обчислювальних компонентів процесорів багаторозрядної арифметики / Б.Б. Круліковський, **Н.Я. Возна**, Я.М. Николайчук // Вісник національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. - Рівне: НУВГП, 2014. - №1(65). – С.527-538.

21. **Возна Н.Я.** Метод структуризації інформаційних потоків для відображення технологічних станів на електричній підстанції / **Н.Я. Возна** // Вісник Хмельницького національного університету. - Хмельницький, 2018.- №1 (257) - С.94-101.

22. **Возна Н.Я.** Метод розпізнавання оптичних зображень у Хеммінговому просторі на основі критерію структурної складності / **Н.Я. Возна** // Інформатика та математичні методи в моделюванні – Одеса, 2017. - Том 7, №4. – С.339-348.

23. Метод розпізнавання та ідентифікації накидів та замикань на землю у високовольтних лініях електропересилань / **Н.Я. Возна**, О.П. Люра, І.О. Сабадаш, І.І. Островка // Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. - Львів, 2018. - №28(1). - С.79-84.

24. Метод структуризации дискретного косинусного преобразования Фурье в модульной арифметике теоретико-числового базиса Хаара–Крестенсона / Я.Н. Николайчук, **Н.Я. Возна**, Б.Б. Круликовский, В.Я. Пих // Кибернетика и системный анализ, 2018. – Том 54, №3. - С.178-188. (SCOPUS) ISSN 1060-0396 (print version), ISSN 1573-8337 (electronic version).

25. Люра О. П. Дослідження перехідних процесів у високовольтних лініях електропересилань 6–10 кВ та розроблення мікроелектронного спецпроцесора релейного захисту, інваріантного до зміни амплітуд фазних струмів / О.П. Люра, **Н.Я. Возна**, Я.М. Николайчук // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Ів.-Фр., 2018. - №2(45). – С.57-83.

26. Процюк Г.Я. Метод моніторингу станів бурової установки та підвищення ефективності комунікації операторів розподіленої комп'ютеризованої системи / Г.Я. Процюк, Л.М. Николайчук, **Н.Я. Возна** // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2017. – № 2(38) – С. 184-195.

27. **Возна Н.Я.** Алгоритми розв'язання задач криптозахисту пікселів кольорових зображень у базисі Радемахера та залишкових класах / **Н.Я.Возна**, Я.М.Николайчук, О.І.Волинський // Кибернетика и системный анализ, 2019. – том 55, №3. - С.149-163. (SCOPUS) ISSN 1060-0396 (print version), ISSN 1573-8337 (electronic version).

28. **Возна Н.Я.** Теоретичні засади та метод моніторингу станів технологічного обладнання малих гідроелектричних станцій на основі образно-кластерної моделі / **Н.Я.Возна**, І.Р.Пітух // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2019.- №3 (273) - С.197-203.

29. Високопродуктивні матричні та потокові перемножувачі цифрових даних / Я М. Николайчук, **Н.Я. Возна**, В.М. Грига [та ін.] // Математичне та комп'ютерне моделювання: Технічні науки: збірник наукових праць. - Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет ім.І. Огієнка, 2019. – Вип.19. – С.101-107.

***Праці, індексовані науко-метричною базою SCOPUS:***

1. Information technology distribution designing computer systems based on models of data traffic / Yaroslav Nykolajchuk, Igor Pituh, **Natalia Vozna**, Yuriy Franco // Proceedings of XIth International Conference CADSM'2011. - Lviv, 2011 – С.200.

2. Modeling of movement and correlation data processing in computer systems / Y.Nykolajchuk, A.Segin, L.Nykolajchuk, **N.Vozna** // Proceedings of the XI International Conference TCSET'2012. - Lviv, 2012. - PP. 374-375.

3. Nykolajchuk Y. Integrated theory of analytical defined and multifunktional data structuring / Yaroslav Nykolajchuk, **Nataliia Vozna** // Proceedings of XIIIth International Conference CADSM'2015.- Lviv, 2015. — PP. 147-151.



4. Image-cluster method of data structuring of multiprismeter objects monitoring of interactive computer systems / **N. Vozna**, H. Protsiuk, I. Pituh, Y. Nykolaychuk // Proceedings of XIIIth International Conference CADSM'2015.- Lviv, 2015. — PP. 295-299.

5. The method to optimize structural, hardware and time complexities characteristics multi-bit adders of special processors for data encryption / B.Krulikovskyi, **N.Vozna**, V.Kimak, A.Davletova // Proceedings of the XIII the International Conference TCSET'2016. - PP. 455-459.

6. System complexity criteria and synthesis of high-performance multifunctional parallel ADC in Rademacher's and Haar-Krestenson's theoretical and numerical bases / **N.Vozna**, Ya.Nykolaichuk, O.Zastavnyy, V.Pikh // Proceedings of the 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CADSM'2017. - PP. 218-221.

7. Project of structural solutions and components of special processor of relay protection in high-voltage lines of electricity transmission / Oleh Liura, Igor Sabadash, **Nataliia Vozna**, Ivan Ostrovka // Proceedings of XIIIth International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: MEMSTECH'2017. - PP. 70-73.

8. Synthesis of a microelectronic structure of a specialized processor for sorting an array of binary numbers / Volodymyr Gryga, Yaroslav Nykolaichuk, **Nataliia Vozna**, Boris Krulikovskyi // Proceedings of XIIIth International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: MEMSTECH'2017. - PP. 170-173.

9. System for monitoring the quasi-stationary technological processes based on image-cluster model / Yaroslav Nykolaichuk, Ihor Pitukh, **Nataliia Vozna**, Halyna Protsiuk, Liubov Nykolaichuk, Orest Volynskyy // Proceeding of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: IDAACS'2017. - 2017. - P. 712-715.

10. Multichannel system for structuring and transmission entropy-manipulated cipher signals / Artur Voronych, **Nataliya Vozna**, Oleg Zastavnyy, Taras Pastukh, Taras Grynchyshyn // Proceedings of the 14th International

Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering TCSET'2018. – PP.295-299.

11. Method for structuring the Fourier discrete cosine transform in the modular arithmetic of the Haar–Krestenson number-theoretic basis / Ya. M. Nykolaichuk, **N. Ya. Vozna**, B. B. Krulikovskiy, V. Ya. Pikh // Cybernetics and Systems Analysis. - May 2018, Volume 54, Issue 3, pp 502–512.

12. Methods of crypto protection of color image pixels in different code systems / **Nataliia Vozna**, Yaroslav Nykolaichuk, Orest Volynskiy, Petro Humennyi, Andriy Sydor // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT'2018. — 2018. — P. 110-113. ISSN 1613-0073

13. Development and research of conveyor structures of binary number sorting algorithms / **Nataliia Vozna** [and other] // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT'2018. —2018. — P. 123-127. ISSN 1613-0073

14. Methods and processors for image recognition in a linear and quadratic Hamming space / Andriy Sydor, Yaroslav Nykolaychuk, **Nataliia Vozna** [and others] // Proceedings of the 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CADSM'2019. - PP. 2/9-2/12. ISSN 2572-7591.

15. Methods and special processors of entropy signal processing / Artur Voronych, Lyubov Nyckolaychuk, **Nataliia Vozna**, Taras Pastukh // Proceedings of the 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CADSM'2019. - PP. 3/59-3/62. ISSN 2572-7591.

16. **N.Y. Vozna** Algorithms for solving problems of cryptographic protection of color image pixels in the Rademacher's basis and residue number systems / **N.Y. Vozna**, Y.M. Nykolaichuk, O.I. Volynskiy // Cybernetics and Systems Analysis. - May 2019, Volume 55, Issue 3, pp 474–487. ISSN 1060-0396 (print version), ISSN 1573-8337 (electronic version).

17. Sensory measurements, efficient encoding and frame structure improving for data exchange / Artur Voronych, Lyubov Nykolaychuk, **Nataliia Vozna**, Yaroslav Nykolaichuk // Proceedings of XVth International Conference

Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: MEMSTECH'2019. - PP. 144-147. ISSN 2573-5373.

18. Method of recognition of codes of road signs in the transport movement process / A. Sydor, L. Nykolaychuk, **N. Vozna** [and others] // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT'2019. - 2019. - P. 167-170.

19. Structures and methods for synchronizing data exchange protocols in computer networks / A. Voronych, I. Pitukh, **N. Vozna** [and others] // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT'2019. -2019. - P. 195-199.

20. Structuring of algorithms for data sorting and new principles of their parallelization / V. Gryga, Ya. Nykolaychuk, **N. Vozna** [and others] // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT'2019. - 2019. - P. 205-208.

#### *Статті у наукових виданнях України:*

1. **Возна Н.Я.** Архітектура та базові функції мобільного адаптера низового рівня розподіленої комп'ютерної системи / **Возна Н.Я.**, Чирка М.І. // Поступ в науку. Збірник наукових праць Бучацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач, 2009. - №5. Т1. – С.77-82.

2. **Возна Н.Я.** Аналіз та обґрунтування вибору багатоканальних аналого-цифрових кодерів технологічних даних на низових рівнях РКС // Поступ в науку. Збірник наукових праць Бучацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач, 2009. - №5. Т1. – С.134-138.

3. **Возна Н.Я.** Теорія та методологія побудови інтерактивних матричних моделей руху даних / **Возна Н.Я.**, Пітух І.Р. // Поступ в науку. Збірник наукових праць Бучацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач, 2010. - №6. Т1. – С.49-52.

4. **Возна Н.Я.** Теорія та методологія побудови клавіатур вводу даних комп'ютерних систем // Поступ в науку. Збірник наукових праць Бучацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач, 2010. - №6. Т1. – С.61-66.

5. **Возна Н.Я.** Методологія та інформаційна технологія побудови моделей "блок-схема алгоритму руху даних" в розподілених комп'ютерних системах реального часу // Збірник наукових праць Буцацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач, 2011 - №7. - С.336-339.

*Праці апробаційного характеру:*

1. **Возна Н.Я.** Метод формування та організації руху даних у розподілених комп'ютерних системах на основі багаторівневих матричних моделей / **Возна Н.Я.**, Николайчук Я.М. // Праці міжнародного симпозиуму: "Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXV)". – Київ: Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України, 2009. – Т.1. – С.120-125.

2. **Возна Н.Я.** Моделі руху даних у комп'ютерних системах з розпаралеленими інформаційними потоками / **Возна Н.Я.**, Пітух І.Р. // Праці міжнародного симпозиуму: "Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXV)". – Київ: Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України, 2009. – Т.1. – С.126-131.

3. **Natalia Vozna** Theory and methods of development of data flow models in distributed CS / **N. Vozna** // Advanced computer system and network: design and application: Proceedings of the 4-th international conference ACSN-2009. - Lviv, 2009. - P.304-307.

4. Гавришок О. Оптимізація енергоспоживання інструкцій вбудованих мікропроцесорів / О. Гавришок, З. Домбровський, **Н. Возна** // Матеріали Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції / В 2 т. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім.І.Пулюя, 2009. – Т.1. – С.42

5. Гавришок.О. Метод калібрування системи вимірювання енергії імпульсних споживачів / О. Гавришок., А. Боровий, **Н. Возна** // Матеріали Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції / В 2 т. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім.І.Пулюя, 2009. – Т.1. – С.271

6. **Vozna N.** Information Technology Traffic Data in the Banking System Based on Multi-matrix Models / **Natalia Vozna**, Alina Davletova, Igor Pituh // Proceedings of the X International Conference TCSET'2010. - Lviv, 2010. - PP. 267.

7. Концепція інформаційного моделювання руху структуризованих даних та взаємодії суб'єктів юриспруденції / Я.М. Николайчук, **Н.Я. Возна**, І.Р. Пітух, Л.М. Николайчук // Праці міжнародної молодіжної математичної школи "Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXVII)". - Київ: Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, 2011. - С.138-139.

8. **Возна Н.Я.** Теорія та оцінка інформативності структурованих графічних та відеозображень // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства" (ЮПС-2011). – Івано-Франківськ, 2011. – С.65-70

9. **Возна Н.Я.** Теоретичні основи руху структуризованих даних в інтерактивних комп'ютерних системах. / **Н.Я. Возна**, І.М. Панчук, М.М. Прокіпчук // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2013. - Тернопіль: ТНЕУ, 2013.- С.96-97.

10. **Возна Н.Я.** Основи теорії, функції та задачі структуризації даних в інформаційних системах / **Н.Я. Возна**, Я.М. Николайчук // Праці міжнародної наукової конференції "Питання оптимізації обчислень (ПОО-XL)". - Київ: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2013. - С.56-57.

11. **Возна Н.Я.** Концепція вирішення проблеми формування та опрацювання структуризованих даних у розподілених комп'ютерних системах / **Н.Я. Возна**, Я.М. Николайчук // Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції "Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості" Ів.-Фр., 2013. - С.50-51.

12. The concept of data structuring based on entropy forming, transmission and processing methods of information flows / **Nataliya Vozna**, Artur Voronich, Taras Pastuh, Volodymyr Gladyuk // Proceedings of the International Conference TCSET'2014. - Lviv, 2014. - PP. 549-551.

13. **Возна Н.Я.** Аналіз надлишковості передавання даних в протоколах сучасних комп'ютерних мереж / **Н.Я. Возна**, А.І. Дмитрів, Ю.В. Собчак. // Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2014. – Тернопіль: ТНЕУ, 2014. – С.57-58
14. **Возна Н.Я.** Концепція структуризації даних в розподілених інформаційних системах / **Н.Я. Возна** // Збірник матеріалів міжнародної координаційної наради ISCM-2014. – Тернопіль, 2014. – С.55-57
15. Люра О.П. Структура алгоритму розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних промислових електромережах / О.П. Люра, Я.М. Николайчук, **Н.Я. Возна** // Збірник матеріалів міжнародної координаційної наради ISCM-2014. – Тернопіль, 2014. – С.138-141.
16. Ідентифікація структуризованих даних на основі нелінійного квадратично-імпульсного перетворення / **Н.Я. Возна** Т.М. Заведюк, Я.М. Николайчук [та ін.] // Праці VII міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень". – Ужгород: УжНУ, 2014. - С.60-61.
17. Пітух І.Р. Оптимізація алгоритмів формування інтерфейсів в інтерактивних комп'ютерних системах / І.Р. Пітух, **Н.Я. Возна** // Праці VII міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень". – Ужгород: УжНУ, 2014. - С.202-203.
18. Круліковський Б.Б. Теоретичні основи та критерії оцінки структурної складності обчислювальних компонентів процесорів багаторозрядної арифметики / Б.Б. Круліковський, **Н.Я. Возна**, Я.М. Николайчук // Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції науковців. - Рівне: НУВГП, 2014. – С.65-67.
19. **Возна Н.Я.** Принципи та атрибути структуризації поліфункціональних даних в унітарному теоретико-числовому базисі / **Н.Я. Возна** // Праці міжнародної наукової школи-семінару "Питання оптимізації обчислень (ПОО-ХЛІ)". - Київ: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2015. С.35-36.
20. **Возна Н.Я.** Метод структурного розпізнавання накидів та коротких замикань в ЛЕП / **Н.Я. Возна**, О.П. Люра // Матеріали II Всеукраїнської

науково-практичної конференції "Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості". - Івано-Франківськ, 2015. –С.180-181.

21. **Возна Н.Я.** Характеристики та кількісні оцінки структуризованої інформації / **Н.Я. Возна** // Матеріали VI Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2016. – Тернопіль: ТНЕУ, 2016. – С.41-42.

22. **Возна Н.Я.** Образно-кластерна модель ідентифікації технологічних станів промислових об'єктів управління / **Н.Я. Возна**, Г.Я. Процюк // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства". – Івано-Франківськ, 2016. – С.77-82.

23. Метод прийняття рішень структуризованої ідентифікації станів промислових об'єктів в інтерактивних комп'ютеризованих системах / **Н.Я. Возна**, Г.Я. Процюк, І.Р. Пітух, Я.М. Николайчук // Праці VIII міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень". – Ужгород: УжНУ, 2016. – С.64-65

24. Метод розпізнавання сигналів на основі критерію ентропійно-структурної складності / **Н.Я. Возна**, Т.І. Пастух, А.Р. Воронич, В.С. Білінський // Праці VIII міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень". – Ужгород: УжНУ, 2016. – С.62-63

25. **Возна Н.Я.** Теоретичні основи методу оцінки ентропії структуризованих даних / **Н.Я. Возна**, Т.І. Пастух // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електротехніка". – Рівне: НУВГП, 2016. – С.109-111

26. Заставний О.М. Структура та системні характеристики високопродуктивного АЦП у теоретико-числових базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона / О.М.Заставний, **Н.Я.Возна**, Б.Б.Круліковський // Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю АСІТ'2017. – Тернопіль: ТНЕУ, 2017. – С.43-47.

27. Метод синтезованого формування та передавання алфавітно-цифрових даних з підвищеним захистом від несанкціонованого доступу / Г.В. Возна, В.В. Шевчук, Я.М. Николайчук, **Н.Я. Возна** // Матеріали Всеукраїнської

конференції з міжнародною участю АСІТ'2017. – Тернопіль: ТНЕУ, 2017. – С.50-52.

28. Люра О.П. Пристрої релейного захисту та компоненти спецпроцесора визначення квадратично-імпульсної функції / О.П.Люра, **Н.Я.Возна** // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства". - Надвірна, 2018. – С.130-134.

29. **Возна Н.Я.** Критерії оцінки структурної, інформаційно-структурної та ентропійно-структурної складності проблемно-орієнтованих даних / **Н.Я. Возна** // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції "Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту", Івано-Франківськ, 2018. - С.187-188.

30. **Возна Н.** Теорія та концепція цифрового опрацювання поліфункціональних даних / **Н.Возна** // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання". - Івано-Франківськ, 2019. - С.123-126.

31. А.Сидор Спецпроцесори визначення Хеммінгової віддалі при розпізнаванні образів / А.Сидор, **Н.Возна** // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання". - Івано-Франківськ, 2019. - С.40-43.

#### ***Патенти:***

1. Пат.107904 Україна МПК G06F 3/023 (2006.01) Пристрій для введення алфавітно-цифрових даних / Николайчук Я.М., Мельник А.О., **Возна Н.Я.**, Мельник В.А. №а201404203; заявл.18.04.2014; опубл.25.02.2015, Бюл. №4/2015.

2. Пат.103938 Україна МПК H02H 9/00 (2015.01) Пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач / Николайчук Я.М., **Возна Н.Я.**, Люра О.П., Островка І.І., Сабадаш І.І. №u201505713; заявл.09.06.2015; опубл.12.01.2016, Бюл. №1/2016.



3. Пат. 107039 Україна МПК G05B 23/00 (2016.01), G06F 11/277 (2006.01) Спосіб контролю параметрів технологічного процесу / Пітух І.Р., **Возна Н.Я.**, Процюк Г.Я.,Николайчук Я.М. №u201507057; заявл.15.04.2015; опубл.25.05.2016, Бюл. №10/2016.
4. Пат.107811 Україна МПК G06B 7/38 (2006.01) Числоімпульсний множильний пристрій / Давлетова А.Я.,Круліковський Б.Б., Николайчук Я.М., **Возна Н.Я.** №u201512080; заявл.07.12.2015; опубл.24.06.2016, Бюл. №12/2016.
5. Пат.109136 Україна МПК G06F 7/00 (2006.01) Однорозрядний суматор / Круліковський Б.Б., Давлетова А.Я., **Возна Н.Я.**, Николайчук Я.М.. №u201602122; заявл.04.03.2016; опубл.10.08.2016, Бюл. №15/2016.
6. Пат.109142 Україна МПК G06F 7/00 (2016.01) Однорозрядний суматор / Давлетова А.Я., Круліковський Б.Б., **Возна Н.Я.**, Николайчук Я.М. №u201602165; заявл.04.03.2016; опубл.10.08.2016, Бюл. №15/2016.
7. Пат. 116185 Україна МПК H03M 1/12 (2016.01), H03M 1/38 (2006.01) Аналого-цифровий перетворювач / **Возна Н.Я.**, Круліковський Б.Б., Николайчук Я.М., Грига В.М., Піх В.Я. №u201612017; заявл.28.11.2016; опубл.10.05.2017, Бюл. №9/2017.
8. Пат.117572 Україна МПК G06F 7/38 (2006.01) Суматор з прискореним переносом / Круліковський Б.Б., **Возна Н.Я.**, Грига В.М., Николайчук Я.М., Давлетова А.Я. №u201701336; заявл.13.02.2017; опубл.26.06.2017, Бюл. №12/2017.
9. Пат.121046 Україна МПК G06F 17/00 (2017.01) Пристрій для визначення ентропії / Воронич А.Р., Николайчук Л.М., **Возна Н.Я.**, Пастух Т.М. № u 2017 05669 заявл.08.06.2017; опубл.27.11.2017, Бюл. №22/2017.
10. Пат.115751 Україна МПК G06F 7/501 (2006.01) Комбінаційний суматор / **Возна Н.Я.**, Круліковський Б.Б., Грига В.М., Давлетова А.Я., Николайчук Я.М. № а 2017 01347 заявл.13.02.2017; опубл.11.12.2017, Бюл. №23/2017.
11. Пат.116176 Україна МПК H03M 1/38 (2006.01) Аналого-цифровий перетворювач / **Возна Н.Я.**, Круліковський Б.Б., Николайчук Я.М., Грига В.М., Піх В.Я. № а 2016 12016 заявл.28.11.2016; опубл.12.02.2018, Бюл. №3/2018.

12. Пат.116601 Україна МПК G06F 7/501 (2006.01) Комбінаційний суматор / Круліковський Б.Б., **Возна Н.Я.**, Грига В.М., Николайчук Я.М. № а 2017 00814 заявл.30.01.2017; опубл.10.04.2018, Бюл. №7/2018.

13. Пат. 124563 Україна МПК G06F 7/00 (2018.01) Повний однорозрядний суматор / Николайчук Я.М., Грига В.М.,**Возна Н.Я.**, Давлетова А.Я. № u 2017 11720 заявл.30.11.2017; опубл.10.04.2018, Бюл. №7/2018.

14. Пат.127093 Україна МПК G06F 7/00 (2018.01) Пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами / Сидор А.І., Круліковський Б.Б., **Возна Н.Я.**, Николайчук Я.М. № u 2018 02782 заявл.19.03.2018; опубл.10.07.2018, Бюл. №13/2018.

15. Пат.132145 Україна МПК G06F 7/00 (2018.01) G06F 7/40 (2006.01) Різницево-модульний квадратор / Сидор А.І., Николайчук Я.М., **Возна Н.Я.** № u 2018 09550 заявл.24.09.2018; опубл.11.02.2019, Бюл. №3/2019.

16. Пат.134154 Україна МПК (2019.01) G06F 17/40 (2006.01), G06F 15/00 G05B 23/02 (2006.01) Спосіб контролю параметрів технологічного процесу / Пітух І.Р., **Возна Н.Я.**, Николайчук Я.М., Николайчук Л.М. №u201809554; заявл.24.09.2018; опубл.10.05.2019, Бюл. №9/2019.

17. Пат.115182 Україна МПК (2017.01) G06F 7/00 G06F 7/38 (2006.1) Числоімпульсний пристрій для множення / Давлетова А.Я., Круліковський Б.Б., Николайчук Я.М., **Возна Н.Я.** №a201512081; заявл.07.12.2015; опубл.25.09.2017, Бюл. №18/2017.

#### ***Монографії та посібники:***

1. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем: Навчальний посібник / Я.М. Николайчук, **Н.Я. Возна**, І.Р. Пітух - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф". 2010. – 392с., іл.

2. Nykolaichuk Ya.M. Structuring the movement of data in computer systems / Ya.M. Nykolaichuk, **N.Ya. Vozna**, I.R. Pitukh - Ternopil: Terno-graf, 2013.- 284 p.

3. Methods of effective protection of information flows / **Natalia Vozna** and others / edited by Valeriy Zadiraka, Yaroslav Nykolaichuk. - Ternopil: Ternograf, 2014. - 308 p.

4. Computer technologies in information security / **Natalia Vozna** and others / edited by Valeriy Zadiraka, Yaroslav Nykolaichuk. - Ternopil: "Kart-blansh", 2015.- 387p.

5. **Возна Н.Я.** Теоретичні основи та методи структуризації інформаційних потоків даних // Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці: Монографія / за загальною редакцією Я.М.Николайчука / **Н.Я. Возна** – Тернопіль: "Бескиди", 2017. – 919 с. С. 199-288.

6. **Возна Н.Я.** Структуризація поліфункціональних даних: теорія, методи та засоби: монографія / **Н.Я. Возна** – Тернопіль: ТНЕУ, 2018. – 378 с.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	37
ВСТУП.....	39
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ (РКС).....	60
1.1 Тенденції розвитку та напрямки вдосконалення РКС.....	60
1.2 Структурна та функціональна організація моніторингових комп'ютеризованих систем.....	68
1.3 Мережі Петрі, кольорові мережі Петрі та моделі руху даних.....	74
1.4 Типи даних: формалізовані, проблемно-орієнтовані, структуризовані, поліфункціональні.....	75
1.5 Формалізація структур інформаційних потоків у багаторівневих РКС на основі матричних моделей руху даних.....	77
1.6 Розробка концепції структуризації даних. Постановка завдань дослідження.....	80
1.6.1 Класифікація атрибутів та формалізація процесів структуризації даних.....	81
1.6.2 Формування та опрацювання структуризованих даних....	82
1.6.3 Узагальнення теоретичних основ та функцій концепції структуризації даних.....	84
1.6.4 Постановка завдань дослідження.....	85
Висновки до першого розділу.....	87
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО ОПРАЦЮВАННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ У СТРУКТУРАХ ТА КОМПОНЕНТАХ РКС.....	89
2.1 Розробка та дослідження критеріїв структурної складності поліфункціональних даних.....	89
2.2 Способи організації руху поліфункціональних даних у структурах РКС.....	99
2.2.1 Систематизація структур та класів джерел інформації в РКС, які формують поліфункціональні дані.....	99
2.2.2 Структура та функції трьохрівневої мережевої КСУ.....	105
2.3 Системні характеристики джерел інформації у структурах РКС....	111

2.4	Теоретичні основи структуризації даних у кодових системах різних теоретико-числових базисів (ТЧБ).....	112
2.5	Методи кореляційного опрацювання структуризованих даних та логіко-статистичні інформаційні моделі.....	115
2.6	Методи ентропійного опрацювання структуризованих даних.....	116
	Висновки до другого розділу.....	127
<b>РОЗДІЛ 3. ОСНОВИ ТЕОРІЇ СТРУКТУРИЗАЦІЇ</b>		
<b>ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ СКЛАДНИХ</b>		
<b>КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ.....</b>		
		130
3.1	Теорія структуризації поліфункціональних елементів складних систем.....	130
3.2	Теоретичні основи кодування структуризованих даних в унітарному теоретико-числовому базисі.....	136
3.3	Метод формування структуризованих даних квазістаціонарних об'єктів на основі системи числення залишкових класів базису Крестенсона.....	142
3.4	Методи поліфункціональної структуризації пікселів кольорових зображень у кодових системах теоретико-числового базису Радемахера та залишкових класах.....	145
3.4.1	Аналіз алгоритмів опрацювання зображень.....	146
3.4.2	Методи опрацювання зображень на основі гістограм.....	148
3.4.3	Методи кольороутворення та кодування пікселів кольорових зображень.....	152
3.4.4	Методи поліфункціональної структуризації пікселів кольорових зображень у ТЧБ розширених полів Галуа....	156
3.4.5	Спосіб криптозахисту ПФД у ТЧБ Галуа.....	162
3.5	Теоретичні основи структуризації та розпізнавання образів у Хеммінговому просторі.....	168
	Висновки до третього розділу.....	174
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ</b>		
<b>СТРУКТУРИЗАЦІЇ ГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ ПРИ</b>		
<b>РОЗПІЗНАВАННІ ЗБУРЕНЬ У ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАНЬ.....</b>		
		177
4.1	Аналіз структурних характеристик гармонічних сигналів при виникненні перехідних процесів у високовольтних лініях електропередач.....	177

4.2	Методи структурних перетворень гармонічних сигналів та їх застосування для розпізнавання збурень у високовольтних ЛЕП....	179
4.2.1	Алгоритм рандомізації.....	181
4.2.2	Метод розпізнавання перехідних процесів в енергетичних системах на основі процесора з нейрокомпонентами квадратично-імпульсного перетворення гармонічних сигналів.....	184
4.2.3	Метод на основі нормованого коефіцієнта взаємкореляції.....	187
4.2.4	Метод на основі автокореляційних функцій ОНЧ та ОВЧ.....	190
4.3	Розробка інтегрально-диференціального методу структуризованого розпізнавання та ідентифікації накидів та коротких замикань у високовольтних ЛЕП.....	192
4.4.	Обґрунтування алгоритму розпізнавання сигналів промислової частоти енергосистем.....	206
4.5	Імітаційне та експериментальне моделювання характеристик алгоритму розпізнавання збурень в ЛЕП на основі інтегрально-диференціального методу.....	207
4.6	Розробка структури та розрахунок характеристик мікроелектронного пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач.....	211
	Висновки до четвертого розділу.....	215
	<b>РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ ПРИ ПОБУДОВІ ОБРАЗНО-КЛАСТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....</b>	<b>218</b>
5.1.	Структурна та функціональна організація моніторингових комп'ютеризованих систем.....	218
5.2.	Метод побудови образно-кластерної моделі контролю квазістаціонарних технологічних процесів.....	224
5.3.	Методологія суб'єктивного моніторингу промислових об'єктів керування.....	235
5.4	Метод побудови образно-кластерної моделі ОУ та розпізнавання станів об'єктів на основі оцінки Хеммінгової віддалі.....	237

5.5	Архітектура та функції інформативних моніторингових систем у нафтогазовій промисловості.....	242
5.6	Організація моніторингової системи електричної підстанції.....	247
5.7	Спосіб контролю параметрів технологічного процесу на основі образно-кластерної моделі.....	249
	Висновки до п'ятого розділу.....	254
<b>РОЗДІЛ 6 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СТРУКТУРИЗАЦІЇ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ У КОМПОНЕНТАХ СКЛАДНИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ.....</b>		
6.1.	Розробка та дослідження системних характеристик пристроїв структуризації даних на основі АЦП з вихідними кодами у різних теоретико-числових базисах.....	258
6.1.1.	Структура високопродуктивного АЦП та характеристики складності його компонентів у базисі Хаара-Крестенсона.....	258
6.1.2.	Поліфункціональний АЦП з розширеними функціональними можливостями у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона.....	270
6.2.	Реалізація удосконалених структур швидкодіючих однорозрядних та багаторозрядних суматорів базису Радемахера.....	274
6.3	Багаторозрядні комбінаційні суматори.....	275
6.3.1.	Багаторозрядний комбінаційний суматор пірамідального типу з парафазними інформаційними зв'язками.....	275
6.3.2.	Багаторозрядний комбінаційний суматор пірамідального типу з однофазними інформаційними зв'язками.....	279
6.3.3.	Багаторозрядний суматор з прискореним переносом.....	282
6.3.4	Структура та системні характеристики пристрою визначення Хеммінгової віддалі у кодах базису Радемахера.....	287
6.4	Багаторозрядні перемножувачі у різних ТЧБ.....	291
6.4.1	Перемножувач унітарних кодів у базисі Хаара-Крестенсона.....	291
6.4.2	Структура та системні характеристики швидкодіючого різницево-модульного квадратора у кодах Хаара-Крестенсона.....	295

6.4.3	Матричний перемножувач.....	300
6.4.4	Потоковий перемножувач.....	309
6.5	Процесор обчислення ймовірнісної ентропії.....	312
6.6	Удосконалення структур протоколів обміну даними в мережах низових рівнів кіберфізичних систем.....	317
6.7	Розробка та оцінка структурної складності малогабаритної синтезованої клавіатури введення алфавітно-цифрових даних.....	323
6.8	Результати мікроелектронної реалізації та синтезу СПП на ПЛІС...	324
	Висновки до шостого розділу.....	324
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	331
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	337
ДОДАТОК А1	Структури та характеристики класичних та кольорових мереж Петрі.....	379
ДОДАТОК А2	Аналіз та перспективи розвитку структур інформаційних потоків в РКС на основі матричних моделей руху даних..	383
ДОДАТОК Б1	Функціонально-інформативні характеристики МРД.....	393
ДОДАТОК Б2	Структурно-інформативні характеристики компонентів атрибутів МРД.....	395
ДОДАТОК В1	Структурна організація поведінки ОУ різних класів стаціонарності.....	398
ДОДАТОК В2	Дослідження характеристик способів структуризованого кодування станів джерел інформації.....	399
ДОДАТОК Г	Аналіз кодових системах різних теоретико-числових базисів.....	401
ДОДАТОК Д1	Аналітика та асимптотика автокореляційних функцій.....	409
ДОДАТОК Д2	Аналітика та продукційні моделі ЛСІМ.....	411
ДОДАТОК Е	Багаторозрядні незвідні поліноми.....	413
ДОДАТОК Є	Аналіз структурних характеристик перехідних процесів в електромережах під час запуску ПЕД.....	415
ДОДАТОК Ж1	Результати програмного моделювання розпізнавання накиду та короткого замикання.....	423
ДОДАТОК Ж2	Код програми розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах.....	425
ДОДАТОК З1	Аналіз характеристик пристроїв релейного захисту високовольтних ліній електропередач.....	439



ДОДАТОК 32 Розрахунок системних характеристик компонентів пристрою РНКЗ.....	442
ДОДАТОК 33 Схеми стенду для лабораторних випробувань дослідного зрізця ПРЗ.6-10.....	444
ДОДАТОК Й Копії програми та результатів лабораторних випробувань дослідних зрізців пристрою релейного захисту ПРЗ.6-10	447
ДОДАТОК К Розробка програми та верифікація алгоритмів побудови ОКМ для відображення технологічних станів ОУ на тестових та експериментальних сигналах.....	452
ДОДАТОК Л Структури відомих аналого-цифрових перетворювачів паралельного типу в базисах Радемахера і Хаара-Крестенсона та їх системні характеристики.....	472
ДОДАТОК М Принципи роботи удосконалених пристроїв.....	478
ДОДАТОК Н Реалізація удосконалених структур швидкодіючих однорозрядних та багаторозрядних суматорів.....	485
ДОДАТОК О Розрахунки системних характеристик відомого та запропонованого пристрою визначення ентропії.....	499
ДОДАТОК П Розробка та оцінка структурної складності малогабаритної синтезованої клавіатури введення алфавітно-цифрових даних.....	502
ДОДАТОК Р Реалізація VHDL-моделі удосконаленого інтегруючого квадратора в середовищі Active-HDL.....	506
ДОДАТОК С Акти впровадження.....	517
ДОДАТОК Т Копії патентів на винаходи.....	533
ДОДАТОК У Висновок експертної комісії про визначення оцінки структурної та інформаційної складності компонентів складних кіберфізичних систем.....	539

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

- АКФ - автокореляційна функція;
- АСУ – автоматизована система управління;
- АСУТП - автоматизована система управління технологічним процесом;
- АЦП - аналого-цифровий перетворювач;
- ДІ - джерело інформації;
- ЕС - елемент системи;
- КС - комп'ютерні системи;
- КСУ - комп'ютеризовані системи управління;
- КФС - кіберфізичні системи;
- ЛЕП - лінія електропередач;
- ЛСІМ - логіко-статистичні інформаційні моделі;
- ММРД - матрична модель руху даних;
- МРД – моделі руху даних;
- НКМ – низова комп'ютерна мережа;
- НОМ - низова обчислювальна мережа;
- ОКМ – образно-кластерна модель;
- ОМС - оператор – моніторингова система;
- ОУ - об'єкт управління;
- ПЕД - потужний електропривід;
- ПЛІС - програмовані логічні інтегральні схеми;
- ПОД - проблемно-орієнтовані дані;
- ПРЗ – пристрій релейного захисту;
- ПС – електрична підстанція;
- ПФД - поліфункціональні дані;
- РКС - розподілена комп'ютерна система;
- САУ - систем автоматизованого управління;
- СД - структуризовані дані;
- СЗК - системи числення залишкових класів;

СКС - спеціалізовані комп'ютерні системи;

СС - структурна складність;

ТЕД - техніко-економічні дані;

ТСД - теорія структуризації даних;

ТЧБ - теоретико-числовий базис.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Важливим функціональним середовищем сучасного суспільства є інформаційні телекомунікаційні системи та ІТ-технології формування, передавання, опрацювання, зберігання та використання даних. Найпоширенішою топологією такого класу інформаційних систем є розподілена інтерактивна та неінтерактивна структурна організація динаміки руху даних. Прикладом структурної організації такого класу існуючих розподілених інформаційних систем є дистрибутивні та корпоративні системи, мережа Інтернет, хмарні технології інформаційних взаємодій, системи стільникового зв'язку, моніторингу, функціонування та управління віддаленими технологічними об'єктами.

Слід зауважити, що поняття "розподілена комп'ютерна система" так само, як і поняття "система реального часу" та "кіберфізична система" є інваріантною до конкретних просторових чи часових параметрів. Тому у клас розподілених комп'ютерних систем (РКС) та сучасних кіберфізичних систем (КФС) безпосередньо входять комп'ютерні мережі, вбудовані на кристалі, структурна організація компонентів універсальних, спеціалізованих та реконфігурованих комп'ютерів або багатопроцесорних кластерів, топологія та структурна схемотехнічна організація обчислювальних пристроїв, організація асоціативної, зверхоперативної чи адресної пам'яті.

За цих умов все більшої ваги набуває ефективне вирішення наукової проблеми розвитку теорії, методології та удосконалення структур поліфункціональних обчислювальних засобів, які є компонентами складних комп'ютерних систем.

Перспективним напрямком створення удосконалених засобів обчислювальної техніки є розширення їх поліфункціональних характеристик шляхом структурно-часового інтегрування алгоритмів, обчислень та структур компонентів процесорів комп'ютерних систем з розширеними вихідними поліфункціональними характеристиками.

Відомі засоби обчислювальної техніки використовують компоненти, орієнтовані на вирішення окремих вузькоспеціалізованих обчислювальних задач і не забезпечують достатнього рівня поліфункціональності, тому проблема розвитку теорії, методології та удосконалення структур обчислювальних засобів з поліфункціональними характеристиками є актуальною і потребує подальших досліджень.

У ряді випадків ця проблема вирішується за рахунок розроблення нових теоретичних основ та технічної реалізації реконфігурованих процесорів класу "хамелеон" у складі кіберфізичних систем.

Отже, розроблення теоретичних засад, методології, комплексу критеріїв ефективності, оцінки структурної складності в умовах застосування пристроїв з поліфункціональними характеристиками є актуальною науковою проблемою, вирішенню якої присвячена дана робота.

Поняття поліфункціональних даних (ПФД) охоплює широкий клас типів інформаційних повідомлень у середовищі фізичних, логічних та віртуальних даних. Наприклад: аналогові та цифрові дані на виході сенсорів та аналого-цифрових перетворювачів, цифрові дані на виході кодерів стиснення, шифрування та захисту інформації від помилок, вихідні дані спецпроцесорів та контролерів цифрового опрацювання інформації, модульовані та маніпульовані сигнали систем передавання даних, фізичні та логічні дані баз даних та баз знань, алфавітно-цифрові дані, графічна інформація 1D, 2D та 3D оптичних зображень.

Поняття структуризації ПФД в широкому аспекті охоплює теорію систем та взаємодію їх компонентів, теорію кіберфізичних систем та архітектури комп'ютеризованих систем та пов'язується з процесами розвитку та вдосконалення інформаційних систем.

Під поняттям проблемно-орієнтованих даних (ПОД) розуміють окремі класи ПФД, які орієнтовані на виконання певних функцій формування, трансформації та використання ПФД. Наприклад, способи кодування цифрових даних на виходах аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) у різних теоретико-числових базисах належать до класу ПОД, аналогічно, способи маніпуляції

сигналів в системах передавання даних, методи представлення алгоритмів опрацювання даних та ін.

Викладене визначає концептуальну характеристику та поняття "поліфункціональних даних", які формуються, перетворюються, передаються, зберігаються, опрацьовуються та доцільно багатовекторно використовуються у сучасних РКС та КФС, абстраговано-інваріантних до відносних віддаленостей між компонентами.

Таким чином, слід визначити поняття ПФД в наступній редакції.

Поліфункціональні дані – це функціонально та проблемно-орієнтовані типи даних, які за способом представлення спрощують чи оптимізують їх наступні перетворення та застосування у РКС.

Виходячи із такого обґрунтування ПФД, предметом дослідження їх структурної організації є розробка теорії, методології та методів розв'язання наукової проблеми, представленої комплексом взаємопов'язаних прикладних задач на основі системи критеріїв оцінки структурної складності ПФД, що дозволяє вирішувати прикладні задачі порівняння структурної складності різних класів ПФД або їх модифікації у деякому класі, оптимізації характеристик структурної складності (СС) з метою вдосконалення системних характеристик ПФД. Наприклад: часової та апаратної складності структур формувачів цифрових даних, обчислювальних засобів, прийомо-передавачів сигналів, алгоритмів, способів кодування та перетворення ПФД, моделей руху даних у РКС та ін.

При створенні розподілених та моніторингових кіберфізичних систем і вдосконаленні їх компонентів згідно пріоритетного критерію максимальної швидкодії виникає суперечність, яка полягає в тому, що ці рішення приводять до зростання структурної, апаратної складності компонентів, зниження їх надійності та підвищення енергоспоживання. В окремих випадках, в дисертаційній роботі, досягнуто одночасне підвищення швидкодії і зменшення структурної та апаратної складностей при реалізації окремих обчислювальних компонентів. Однак, у загальному ця суперечність не може бути подолана без

відповідного зниження системних характеристик згідно критеріїв функціональної повноти та інформаційно-структурної складності.

Аналіз літературних джерел за концепцією, теорією та методах розв'язання прикладних задач, в основу яких покладена система критеріїв структурної складності свідчить, що в Україні та світовому просторі практично відсутній узагальнений підхід до проблеми розробки теоретичних основ, методології, методів аналізу та вдосконалення структурної організації ПФД у РКС, що є актуальною проблемою, яка є предметом дослідження даної дисертації і направлена на розробку теоретичних засад та практичну реалізацію методів оцінки та вдосконалення теорії структурної складності ПФД, що дозволяє ціленаправлено оптимізувати системні характеристики ПФД та відповідних структурних рішень апаратно-програмних засобів складних комп'ютеризованих систем.

Вперше питаннями теорії розробки та концепції фундаментальних основ структурної складності різних класів ПФД займалися відомі зарубіжні вчені: Дж.Мартін, В.Фрітч, Т.Харрісон, М.Бат [1-8]. Вагомий вклад у розвиток методології та технології рішення прикладних задач структурної організації та оптимізації структурної складності мереж Петрі внесли К.Петрі, В.М Локазюк, О.В.Поморова, Д.А.Зайцев, Ю.В.Нікольський, В.В.Пасічник [9-17]. Серед вітчизняних вчених науковий вклад у розвиток теорії складних систем, структурної складності засобів обчислювальної та комп'ютерної техніки внесли: В.М.Глушков, Б.М.Малиновський, О.В.Палагін, І.В.Сергієнко, В.П.Боюн, В.К.Задірака, М.А.Карцев, С.А.Майоров, Є.П.Угрюмов, А.І.Кондалев, В.П.Тарасенко, М.В.Черкаський, Г.Ф.Кривуля, А.О.Мельник, З.Р.Мичуда, Я.М.Николайчук, В.А.Мельник, Р.Б.Дунець, О.В.Дрозд, С.Г.Семенов, Г.Г.Швачич, О.В.Поморова, В.С.Глухов та ін. [18-62].

Системний виклад методів опрацювання результатів вимірювань, які представляються у цифровій формі, згідно теоретичних основ статистичного опрацювання випадкових величин та їх розподілів здійснено у роботах Б.І.Стадника, М.М.Дорожовця та ін.[63-66].

Значний науковий внесок у розвиток теорії систем числення та кодових систем теоретико-числових базисів на основі систем ортогональних функцій внесли Л.А.Залманзон, Н.Ахмед, Ж.Фур'є, В.Оmondi, N.Szabo, M.Hosseinzadeh, H.W.Lenstra, G.Lakhani, L.-L.Yang, L.Hanzo [67-78]. Теорію математичних перетворень даних у розширених полях Галуа розробили І.Й.Акушський, В.М.Амербаєв, Є.І.Брюхович, Я.М.Николайчук, В.С.Глухов [79-88], яка стала основою системи числення залишкових класів, а також фундаментальні математичні основи теорії чисел І.М.Виноградов, О.А.Бухштаб, В.С.Глухов та Я.М.Николайчук [50, 51, 86-89].

Вагомий вклад у розвиток теорії джерел інформації, кодових систем розширених полів Галуа та вдосконалення структурних рішень компонентів телекомунікаційних і комп'ютерних систем внесли фахівці IT-технологій наукової школи професора Я.М.Николайчука [90].

Питання оцінки структурної складності та розробки критеріїв розрахунку характеристик ПФД, які представлені матричними моделями руху даних (ММРД) в однорівневих та багаторівневих РКС викладені в наукових працях автора [91-94] у тому числі у монографіях [95-97] та навчальному посібнику [98].

Фундаментальні основи теорії складних систем та структуризації даних розроблені відомими зарубіжними вченими: L.aszlo Babai, J. Beck, Russell Impagliazzo, H. Buhrman, David A. Mix Barrington, C. H. Papadimitriou, M. Yannakakis, R. Raz, A. Yao, Thierry Warin, William Sanger, C.H. Hong Jia-Wei, И.Гайдышев та ін. [99-121], а також вітчизняними науковцями по моделюванню широкого класу структурних об'єктів: М.П.Дивак, В.М.Теслюк та ін.[122-127].

Незважаючи на успішне розв'язання низки окремих прикладних задач вирішуваної проблеми, розробка та узагальнення теоретичних основ структурної складності ПФД знаходиться у наш час у стадії становлення у питаннях уточнення концепції, розвитку методології, теорії, розробки системи критеріїв та методів розв'язання широкого класу новітніх прикладних задач даної галузі дослідження.



### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.**

Робота виконувалась у рамках науково-дослідних робіт кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету "Розробка теорії та комп'ютерних засобів спеціалізованих комп'ютерних систем на основі теоретико-числових базисів Крестенсона-Галуа" (2007-2012, державний реєстраційний номер 0106U012530), "Розробка теоретичних засад методів формування та цифрового опрацювання даних у розподілених спеціалізованих комп'ютерних системах" (2013-2018, державний реєстраційний номер 0112U008458) та госпдоговірних тем, пов'язаних з розробкою алгоритмів, методів та засобів розпізнавання збурень у високовольтних електромережах: № СКС-40-2012 "Розробка алгоритмів функціонування захистів електропередач за коротких замикань на основі теорії кореляційних функцій" (2012-2013рр., державний реєстраційний номер 0112U007886), № СКС-54-2013 "Розробка математичного забезпечення захисту ліній електропередач номінальною напругою 6-35 кВ на основі теорії розпізнавання сигналів" (2013-2014рр., державний реєстраційний номер 0113U007679), № СКС-67-2014 "Розробка теоретичних засад та алгоритмів ідентифікації запусків потужних електроприводів у високовольтних ЛЕП на основі теорії розпізнавання образів" (2014-2015рр., державний реєстраційний номер 0115U002340), № СКС-48-2015 "Розробка структурної схеми та компонентів дослідного взірця пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань на землю у високовольтних ЛЕП" (2015-2016рр., державний реєстраційний номер 0116U006790), № СКС-70-2016 "Авторський нагляд за розробкою схемних рішень та випробувань дослідних взірців пристрою релейного захисту в мережах 6-10 кВ" (2016-2017рр., державний реєстраційний номер 0117U000141); розробкою системи моніторингу квазістаціонарних об'єктів: № СКС-49-2016 "Розробка теорії, методології та алгоритмів структуризації образно-кластерних моделей моніторингу станів електричних підстанцій високовольтних ЛЕП" (2016-2017рр., державний реєстраційний номер 0116U006792) та реалізацією мікроелектронних компонентів кіберфізичних систем: № СКС-50-2017 "Розробка та реалізація

мікропроцесорного струмового захисту ліній електропересилань 6-35 кВ" (2017-2018рр., державний реєстраційний номер 0117U005103), № СКС-42-2019 "Проектування на ПЛІС мікроелектронних компонентів пристрою релейного захисту" (2019-2020 рр., державний реєстраційний номер 0119U103069).

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертаційних досліджень є формування концепції, узагальнення теоретичних основ структурної складності поліфункціональних даних, розробка теоретичних положень нових методів та системи критеріїв оцінки структурної складності різних класів ПФД, розробка методів підвищення ефективності мікроелектронних компонентів формування, перетворення, передавання, опрацювання та використання ПФД в КФС.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс взаємозалежних наукових задач:

- 1) на основі аналізу структур та функцій існуючих моніторингових комп'ютеризованих систем розробити теоретичні основи концепції структуризації ПФД, яка включає теоретичні основи, методи, способи представлення та опрацювання даних;
- 2) узагальнити існуючі та розробити нові критерії оцінки структурної та інформаційно-структурної складності поліфункціональних даних;
- 3) розробити теоретичні основи методів структуризації ПФД у теоретико-числових базисах (ТЧБ): Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона;
- 4) розробити метод визначення ентропії станів квазістаціонарного об'єкта згідно ймовірнісної та кореляційної інформаційних мір оцінки ентропії;
- 5) розробити метод структуризованого перетворення кодів пікселів кольорових зображень у системі RGB-кольороутворення на основі теоретико-числових базисів Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона;
- 6) розвинути можливості захисту кодів RGB-пікселів шляхом їх згортки з псевдовипадковими біт-орієнтованими послідовностями кодів поля Галуа;
- 7) розробити метод структурного опрацювання гармонічних сигналів та розпізнавання збурень у високовольтних електромережах;

- 8) розробити метод моніторингу станів квазістаціонарного об'єкта на основі опрацювання характеристик технологічного процесу та побудовою образно-кластерної моделі;
- 9) розробити схемотехнічні рішення перетворювачів, обчислювальних засобів та спецпроцесорів цифрового опрацювання даних з покращеними характеристиками структурної, апаратної та часової складності:
  - 9.1) швидкодіючі АЦП паралельного типу з вихідними кодами у базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона;
  - 9.2) однорозрядні неповні та повні двійкові суматори з комутованими прямими, парафазними та інверсними вхідно-виходами з гранично мінімальною затримкою сигналів суми та переносів;
  - 9.3) швидкодіючі однорозрядні та багаторозрядні двійкові суматори з інверсними та прискореними переносами;
  - 9.4) швидкодіючі перемножувачі унітарних та двійкових кодів у різних ТЧБ;
  - 9.5) пристрій для визначення ймовірнісної міри ентропії;
  - 9.6) пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач;
  - 9.7) спосіб контролю параметрів технологічного процесу на основі структури образно-кластерної моделі;
- 10) удосконалити структури протоколів обміну даними в мережах низових рівнів кіберфізичних систем;
- 11) удосконалити метод синтезованого формування алфавітно-цифрових даних;
- 12) реалізувати структурні рішення запропонованих апаратних компонентів КФС у мікроелектронному виконанні на ПЛІС.

**Об'єкт дослідження:** процеси структуризації та оцінки структурної складності елементів та функціональних компонентів складних РКС при формуванні, передаванні, опрацюванні, представленні та використанні структуризованих ПФД.

**Предмет дослідження:** методи та засоби структуризації даних у РКС та вдосконалення системних характеристик ПФД та спецпроцесорних компонентів РКС на основі розроблених теоретичних засад, методів та критеріїв оцінки їх структурної складності.

**Методи дослідження** в ході розв'язання, вирішеної у дисертації проблеми, використовувались методи теорії інформації при розробці нових способів кодування та цифрового опрацювання структуризованих даних, теорії складних систем при розробці матричних моделей руху даних, теорії ймовірностей при оцінці надійності мікроелектронних компонентів РКС та побудови статистичних, кореляційних, спектральних, ентропійних та кластерних моделей, теорії сигналів при реалізації методів аналого-цифрового перетворення, теорії розпізнавання образів у Хеммінговому просторі, теорії чисел при формалізації методів кодування у різних теоретико-числових базисах, теорії джерел інформації при формалізації та структуризації моделей контролю станів, на основі яких проводилось обґрунтування та вибір найбільш ефективних принципів та методів формалізації характеристик структурної організації різних класів ПФД, технологія проектування мікроелектронних компонентів РКС на ПЛІС, розробка та верифікація нових критеріїв оцінки та розрахунку структурної складності, що лягли в основу розрахунку та оптимізації системних характеристик компонентів обчислювальних засобів та компонентів РКС, на основі яких реалізовано відповідні схемотехнічні та програмні рішення формування, перетворення, передавання, опрацювання, зберігання, відображення та використання структуризованих ПФД у РКС.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У результаті проведення теоретичних, програмно-моделюючих та експериментальних досліджень, а також їх практичного впровадження, розв'язано важливу науково-технічну проблему підвищення ефективності формування, перетворення, передавання, опрацювання, зберігання, відображення та використання ПФД у складних РКС на основі структурного підходу, рішення якої забезпечує удосконалення

структурних та апаратно-часових характеристик компонентів та функціональних вузлів складних РКС.

При цьому отримано такі основні наукові результати:

- вперше розроблені функції та атрибути концепції структуризації поліфункціональних даних, яка охоплює процеси формування, кодування, передавання, опрацювання, зберігання та використання ПФД;
- вперше узагальнені існуючі та розроблені нові критерії оцінки структурної та інформаційно-структурної складності поліфункціональних даних, що дозволили формалізувати аналіз та покращити результати синтезу системних характеристик удосконалених компонентів РКС;
- вперше розроблено теоретичні засади методів:
  - 1) метод структуризації ПФД у ТЧБ: Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона, який дозволив зменшити обчислювальну складність та підвищити швидкодію алгоритмів цифрового опрацювання даних при побудові моделей станів квазістаціонарних об'єктів управління;
  - 2) метод визначення ентропії станів квазістаціонарного об'єкта згідно ймовірнісної та кореляційної інформаційних мір оцінки ентропії шляхом структурного аналізу станів джерел інформації та застосуванням кореляційної міри ентропії, що дозволив розширити функціональні можливості визначення та уточнення статистичних та спектральних характеристик джерела інформації у порівнянні з інформаційними мірами ентропії Р.Хартлі та К.Шеннона;
  - 3) метод структуризованого перетворення кодів RGB-пікселів кольорових зображень шляхом їх кодування у базисі Крестенсона та Хаара-Крестенсона, що у порівнянні з існуючим методом кодування пікселів у базисі Радемахера, дозволяє перевести коди пікселів з трьохвимірної кодової системи в одновимірну;
  - 4) метод інтегрально-диференціального опрацювання гармонічних сигналів та розпізнавання збурень у високовольтних ЛЕП, що у порівнянні з існуючими методами, дозволяє здійснити розпізнавання

збурень типу накидів, коротких замикань та запусків потужних електроприводів інваріантних до порогових змін амплітуд фазових струмів у лініях електропередач та підвищити швидкодню ідентифікації такого класу збурень;

5) метод моніторингу станів квазістаціонарного об'єкта на основі запропонованого характеристичного функціоналу цифрового опрацювання параметрів технологічного процесу та побудови образно-кластерної моделі, що дозволив, у порівнянні з існуючими способами моніторингу відхилень станів об'єктів від норми, зменшити структурну складність моделі, підвищити ергомічність та швидкість реакції операторів КС при виникненні нештатних, передаварійних та аварійних ситуацій;

- удосконалено метод синтезованого формування алфавітно-цифрових даних шляхом запропонованого двохпозиційного синтезованого формування символів, що дозволило удосконалити процеси їх введення з можливістю підвищеного криптозахисту;
- набув подальшого розвитку метод криптозахисту пікселів кольорових зображень методом згортки з псевдовипадковими послідовностями, який дозволив, у порівнянні з відомими методами, упростити обчислювальні операції над кодами RGB-пікселів Хаара-Крестенсона та кодами Радемахера у багаторозрядних потокових матричних перемножувачах.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені теорія, моделі, методи та засоби лягли в основу побудови ефективних програмно-апаратних засобів формування, перетворення, передавання, опрацювання, зберігання, відображення та використання структуризованих ПФД. Практична цінність отриманих результатів полягає у наступному:

- розроблені та реалізовані у мікроелектронному виконанні структурні рішення елементів та функціональних компонентів складних РКС та кіберфізичних систем наступних типів:

1. Швидкодіючий АЦП паралельного типу з вихідними кодами в базисі Хаара-Крестенсона, еквівалентний 10-ти бітному АЦП базису Радемахера, який у порівнянні з відомою структурною АЦП з матричним шифратором вихідних кодів Хаара-Крестенсона характеризується зменшенням структурної складності у 5,1 разів, інформаційно-структурної – у 6,2 рази, зменшенням апаратної складності при різних наборах модулів - у 2 рази та підвищенням швидкодії - у 2,25 рази.
2. Швидкодіючий мультибазисний АЦП паралельного типу на основі парафазних компараторів з розширеними функціональними можливостями та вихідними кодами у базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона, у якому при розрядності вихідних кодів 10 біт, досягнуто зменшення апаратної складності, у порівнянні з відомими АЦП аналогічної розрядності, при наборі модулів вихідного коду Хаара-Крестенсона ( $P_1 = 32$ ,  $P_2 = 33$ ) зменшується у 14 разів, а при наборі модулів ( $P_1 = 7$ ,  $P_2 = 12$ ,  $P_3 = 13$ ) – у 8 разів.
3. Удосконалені структури однорозрядних неповних двійкових суматорів з однофазними та парафазними вхідними та вихідними сигналами, які у порівнянні з відомими класичними структурами характеризуються зменшеною структурною складністю у 2-7 разів.
4. Однорозрядні повні суматори з парафазними комутованими входами та парафазними виходами призначені у якості компонентів швидкодіючих матричних перемножувачів, які, у порівнянні з відомими однорозрядними повними суматорами, характеризуються гранично максимальною швидкістю з затримкою сигналів переносів та сум на 1 мікротакт, що дозволило підвищити швидкість квадрататорів, матричних та потокових перемножувачів у 2 рази.
5. Однорозрядний повний двійковий суматор з прямими інформаційними входами, прямим виходом суми з затримкою сигналів 2 мікротакти та інверсними входами та виходами переносів із затримкою сигналів 1 мікротакт, який, у порівнянні з відомими структурами суматорів даного

класу, дозволили зменшити структурну складність: з одним комутуючим входом та парафазними входо-виходами – у 6,7 разів; з двома комутуючими входами та парафазними входо-виходами – у 7,8 разів; з класичним однорозрядним суматором з прямими входами та виходами – у 2,25 разів; з удосконаленим суматором на основі логічних елементів "Виключаюче І" з прямими входами та виходами – у 0,9 разів, що дозволило розширити клас компонентів процесорів кіберфізичних систем з гранично мінімальними системними характеристиками.

#### 6. Швидкодіючі багаторозрядні суматори:

- 6.1) пірамідального типу, реалізовані на основі удосконалених однорозрядних неповних суматорів з парафазними входами та виходами, які у порівнянні з відомим багаторозрядними комбінаційними суматорами, характеризуються зменшеною апаратною складністю, не залежно від розрядності двійкових кодів, що додаються, - у 1,5 рази, зменшеною часовою складністю – у 2 рази, зростанням структурної складності у 1,4 рази за рахунок наявності парафазних входо-виходів у компонентах суматора;
- 6.2) пірамідального типу на основі застосування однофазних неповних суматорів з прямими входами, прямими та інверсними виходами на основі логічного елемента "Виключаюче І", в якому, у порівнянні з відомими структурними рішеннями багаторозрядних пірамідальних суматорів такого класу, досягнуто зменшення апаратної складності у 1,8 разів, зменшення структурної складності у 1,9 разів;
- 6.3) з прискореним переносом, в якому запропонована заміна дублювання багаторозрядних модулів суматора схемами формування сигналів прискорених переносів та інкрементними суматорами їх корекції, що дозволило зменшити структурну складність у 2 рази незалежно від розрядності вхідних двійкових чисел та підвищити ефективність застосування такого класу суматорів у багаторозрядних процесорах криптозахисту даних;



- 6.4) пристрій визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами, які двома АЦП паралельного типу перетворюються у паралельні унітарні коди, які на виходах логічних елементів "АБО" та "І" відповідно формують інверсний паралельний код Хаара більшого та меншого з них, коди яких перетворюються шифраторами у відповідний прямий та інверсний двійкові коди базису Радемахера. У порівнянні з багатоканальним пристроєм визначення модульної кореляційної функції, запропонований пристрій дозволяє підвищити швидкодію у 14 разів та зменшити структурну складність на 1-2 порядки;
- 6.5) швидкодіючий різницево-модульний квадратор у кодах Хаара-Крестенсона, який реалізує оцінку квадратичної Евклідової відстані згідно застосування АЦП з вихідними кодами Хаара-Крестенсона та модульної арифметики системи залишкових класів, що дозволило підвищити швидкодію визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами за 8 мікротактів, не залежно від діапазону їх квантування, а також дозволило ефективно застосувати такі пристрої у процесорах кореляційного та спектрального опрацювання сигналів, розпізнавання образів та ін.

## 7. Перемножувачі у різних ТЧБ:

- 7.1) удосконалена структура перемножувача унітарних кодів у базисі Хаара-Крестенсона, які представляють діапазон квантування кольорів RGB-пікселів у діапазоні амплітуд  $0 \div 256$  рівнів, що дозволило, у порівнянні з відомим пристроєм, що реалізує обчислення у двійкових кодах базису Радемахера, підвищити швидкодію більш, ніж на 1 порядок, а також досягти більш високої регулярності мікроелектронної структури;
- 7.2) структура різницево-модульного квадратора, яка містить 2 АЦП паралельного типу з вихідними кодами у базисі Хаара-Крестенсона, реалізована шляхом застосування модульної арифметики СЗК та кодових матриць Хаара-Крестенсона. Запропонована структура

різницево-модульного квадратора, у порівнянні з відповідним компонентом у пристрої визначення Хеммінгової віддалі, дозволила підвищити швидкодію обчислень модульних різниць квадратів більше, ніж на 1 порядок. При діапазоні кодування вхідних чисел  $N = 255$ , що відповідає кількості рівнів квантування окремих кольорів RGB-пікселів, пристрій дозволяє реалізувати визначення Хеммінгової віддалі між пікселями кожного з кольорів зображень. При накопиченні кодів отриманих окремих різницевих квадратів, згідно матриці пікселів відеозображення, реалізується можливість розпізнавання двох зображень на основі інтегральної оцінки Хеммінгової віддалі у квадратичному Евклідовому просторі;

- 7.3) структура матричного перемножувача двійкових чисел, у якому застосовані запропоновані удосконалені структури однорозрядних неповних та повних суматорів, дозволила, без зменшення швидкодії пристрою, зменшити його структурну складність, більше, ніж у 5 разів, а апаратну складність зменшити у 2,5 рази;
  - 7.4) структура потокового перемножувача двійкових чисел, в якому, шляхом розпаралелення процесів запису, перемноження та зчитування даних, досягнуто зменшення структурної складності вхідних та вихідних шин  $4n/2$  та без втрати швидкодії досягнуто зменшення у 2,5 рази апаратної складності перемножуваної матриці. У порівнянні з відомими потоковими перемножувачами досягнуто розширення функціональних можливостей шляхом застосування на вихідній шині логічного елемента "Виключаюче АБО", який дозволив здійснити перевірку достовірності результатів множення та криптозахист вихідних кодів реалізацією операції  $\oplus$  з біт-орієнтованою багаторозрядною кодовою послідовністю.
8. Пристрій для визначення ентропії згідно інформаційної міри К.Шеннона, в якому, шляхом структурного розпаралелення визначення мультиплікативних ймовірнісних та інтегральних функцій, вилучено

комутатор, що дозволило, у порівнянні з відомими пристроями, підвищити регулярність структури, спростити топологію мікроелектронної реалізації на кристалі та досягнути зменшення структурної складності у 31,86 рази, апаратної складності - у 5,78 разів, підвищити швидкодію у 2,65 рази.

9. Мікроелектронний пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач, який дозволив розпізнавати накиди, замикання на землю та запуски потужних електроприводів на інтервалі 0,5-1,5 періода промислової частоти, у порівнянні з відомими, характеризується інваріантністю до амплітуди струмів збурень.
10. Удосконалені структури протоколів обміну даними в мережах низових рівнів кіберфізичних систем шляхом використання надлишкових кодів на виходах АЦП при різних класах точності сенсорів дозволило розширити можливості використання регістрових кодів та підвищити заводо захищеність запропонованих структур 4, 6, 7, 8-ми бітних кодів фреймів, що дозволило, у порівнянні зі стандартними протоколами HDLC, вилучити операцію "біт-стаффінгу" та ліквідувати випадкові зміни кількості бітів у пакетах даних.
11. Удосконалена синтезована малогабаритна клавіатура, яка містить 16 клавіш, та спосіб введення алфавітно-цифрових даних шляхом формування символу двома 4-хбітними фрагментами, які об'єднуються згідно логічної функції  $a \wedge b \wedge c \wedge g_1 \vee g_2 \wedge d \wedge e \vee f$  компонентів структурно стилізованого зображення символів, що у порівнянні з відомими QWERTY-клавіатурами ПК, дозволило у 8 разів зменшити кількість клавіш, а також забезпечило криптозахист при передаванні алфавітно-цифрових даних шляхом застосування кодових масок, відомих тільки абонентам, які здійснюють обмін даними.

Основні результати дисертаційної роботи знайшли застосування при організації процесів моніторингу технологічних станів електричних підстанцій високовольтних ЛЕП в Інституті мікропроцесорних систем керування

об'єктами електроенергетики (м.Львів) та конструкторському бюро "Стріла" (м.Тернопіль); при організації систем передавання захищених від несанкціонованого доступу даних в управлінні поліції охорони Тернопільської обл.; при побудові образно-кластерної моделі станів високовольтного електричного обладнання на підприємстві "Енерготех НГ" (м.Калуш); метод диференціально-різницевого розпізнавання збурень в електромережах для захисту потужних електроприводів від коротких замикань та перевантажень на Львівському державному заводі "Лорта" (м.Львів); при розширенні функціональних властивостей та оптимізації системних характеристик компонентів програмно-апаратних та мережевих засобів вимірювально-інформаційних системи контролю та управління технологічних параметрів на науково-виробничій фірмі "Зонд" (м.Івано-Франківськ).

Розроблені теоретичні основи, методи, моделі та засоби організації руху ПФД впроваджено у навчальному процесі ТНЕУ на кафедрах: Спеціалізованих комп'ютерних систем та Кібербезпеки при викладанні дисциплін: "Основи метрології", "Комп'ютерна криптографія", "Теорія автоматичного управління", "Проектування комп'ютеризованих систем управління", що підвищило науковий та педагогічний рівень викладання цих дисциплін.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати здобувачем отримані особисто. У наукових працях, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належить: [92] - розроблення формалізації однорівневої моделі взаємодії структуризованих даних; [96] - розроблення методів та алгоритмів моделювання організації руху структуризованих даних в РКС; [128, 129] - розроблення теоретичних засад одномірних та багатомірних авто- та взаємкореляційних моделей та побудови решітчатих функції цифрових потоків даних; [96, 129-131] - розроблення способу та пристрою синтезованого вводу алфавітно-цифрових даних; [129, 132-137] - розроблення та формалізація сукупності багаторівневих моделей та епюр собівартості руху структуризованих даних; [140] - розроблення методу формування структуризованих даних квазістаціонарних об'єктів; [141-145] - розроблення

структури фреймів систем з різною організацією інтерфейсних зв'язків; [146] - розроблення формалізації циклів руху даних складних інформаційних систем; [147] - розроблення класифікації атрибутів теорії та процесів структуризації даних; [148, 149] - розроблення теоретичних засад спектрального косинусного перетворення Фур'є на основі кореляційних функцій; [138, 139, 150, 201] - розроблення концепції та теоретичних основ вирішення задач структуризації даних; [129, 136, 151-154] - розроблення концепції структуризації даних на основі ентропійного підходу; [52] - розроблення методології побудови моделей руху структуризованих даних на основі графів мереж Петрі та атрибутів їх "кольорових" вершин; [155-158] - постановка задачі та розроблення методів та засобів цифрового опрацювання сигналів перехідних процесів у високовольтних лініях електропередач; [159-162] - розроблення та застосування критерію оцінки структурної складності поліфункціональних даних; [163] - реалізація схемотехнічного рішення пристрою для введення алфавітно-цифрових даних; [136] - розроблення математичних положень цифрового опрацювання поліфункціональних даних у теоретико-числових базисах Фур'є, Радемахера, Галуа та Крестенсона та дослідження відхилень станів квазістаціонарних об'єктів на основі логіко-статистичних інформаційних моделей; [159, 164-167, 200, 203] - розроблення методу та функціоналу цифрового опрацювання структуризованих даних та реалізація способу побудови образно-кластеної моделі; [168] - структуризація та моделювання інформаційної взаємодії оператор-інформаційна система моніторингу об'єктів нафтогазової галузі; [169-172, 191] - реалізація методу та пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач; [161, 193, 201, 205] - формалізація алгоритмів цифрового опрацювання даних у Хеммінговому просторі; [174, 175] - застосування критерію оцінки структурної складності мікроелектронних реалізацій однорозрядних цифрових суматорів; [176] - розроблення модуля статистики опрацювання даних у структурі адаптивної системи дистанційного навчання; [173, 177, 178, 202] - реалізація структури системи методу контролю параметрів технологічного процесу; [179, 209, 180] - реалізація схемотехнічних рішень мікроелектронного число-

імпульсного множильного пристрою у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона та різницево-модульного квадратора; [181, 182] - реалізація інверсних компонентів структур швидкодіючих однорозрядних двійкових суматорів; [183] - розроблення нормованої кореляційної матриці коефіцієнтів взаємокореляції образно-кластерної моделі; [160, 184] - реалізація структурної схеми паралельного АЦП з вихідними кодами у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона; [185, 186, 204] - реалізація алгоритмів сортування даних; [187, 188] - реалізація структури інкрементного багаторозрядного двійкового суматора з прискореним переносом; [184] - дослідження формалізованого структурного рішення формування паралельних кодів у різних ТЧБ; [189, 190] - реалізація структури модуля формування інверсного коду Хаара швидкодіючого АЦП у базисі Хаара-Крестенсона; [192, 193] - розроблення схемотехнічного рішення пристрою визначення Хеммінгової віддалі; [194, 195] - реалізація схемотехнічного рішення пристрою визначення ентропії; [196, 197] - реалізація схемотехнічних рішень комбінаційних суматорів; [198, 199] - розроблення методів криптозахисту пікселів кольорових зображень у різних кодових системах; [206, 207] - удосконалення структури фреймів обміну даними; [208] - удосконалення структур пристроїв перемноження.

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення, наукові результати та практичні розробки дисертації доповідались та обговорювались на національних і міжнародних конференціях та презентувались у збірниках наукових праць:

- International Conference "Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science" (TCSET) (Lviv-Slavske, Ukraine, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018);
- International Conference "The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics" (CADSM) (Polyana-Svalyava, Ukraine, 2011, 2015, 2017, 2019);
- International conference "Perspective technologies and methods in MEMS design" (MEMSTECH) (Polyana, Ukraine, 2017, 2019);

- Міжнародного симпозіуму "Питання оптимізації обчислень" (Київ, 2009);
- 4-th international conference "Advanced computer system and network: design and application" (Lviv, Ukraine, 2009)
- Міжнародної молодіжної математичної школи "Питання оптимізації обчислень" (Київ, 2011);
- Міжнародної наукової конференції "Питання оптимізації обчислень" (Київ, 2013);
- Міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень" (Ужгород, 2014, 2016);
- Міжнародної наукової школи-семінару "Питання оптимізації обчислень" (Київ, 2015);
- Проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства" (Івано-Франківськ, 2011, 2016, 2018);
- Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів "Сучасні комп'ютерні інформаційні технології" (Тернопіль, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017);
- International conference "Intelligent data acquisition and advanced computing systems" (IDAACS'2017) (Bucharest, Romania, 2017);
- International conference "Advanced computer information technology" (ACIT) (Чеське Будейовіце, Чехія, 2018, 2019);
- Міжнародної координаційної наради "Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління" (ISCM) (Тернопіль-Карпати, 2014);
- Міжнародної науково-практичної конференції (Рівне, 2014);
- Всеукраїнської науково-практичної конференції "Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості" (Івано-Франківськ, 2013, 2015);
- Міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми науково-технічного та правового забезпечення кібербезпеки у сучасному світі" (Харків, 2016);

- Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електротехніка" (Рівне, 2016);
- Всеукраїнської науково-практичної конференції "Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту" (Івано-Франківськ, 2018);
- Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання" (Івано-Франківськ, 2019);
- Міжнародний науковий симпозіум питання оптимізації обчислень (Київ, 2019).

### **Публікації.**

За темою дисертації опубліковано 107 наукових праць, з них 5 монографій (1 - одноосібна), 20 праць входять в міжнародну наукометричну базу SCOPUS, 1 навчальний посібник у співавторстві, 25 статей у фахових наукових виданнях України (з них 8 одноосібних), 8 статей у закордонних періодичних наукових виданнях, 5 статей у наукових журналах, 17 патентів України (5 патентів на винаходи, 12 – на корисні моделі), 49 доповідей в тезах та матеріалах міжнародних та національних конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку літературних джерел з 389 найменувань та 27 додатків. Загальний обсяг роботи – 540 сторінок, з яких основний зміст викладено на 298 сторінках машинописного тексту, включаючи 133 рисунки та 54 таблиці. Додатки на 158 сторінках містять акти впровадження результатів роботи та додаткові результати розробки та досліджень.



## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ (РКС)

### 1.1. Тенденції розвитку та напрямки вдосконалення РКС.

Фундаментальні математичні основи теорії інформації та кібернетики, які стали базовими при реалізації інформаційних технологій та побудові РКС, заклали відомі вчені: К.Шеннон та Н.Вінер [210, 211]. Основою цих досліджень стали теоретичні засади математичних перетворень Ш. Фур'є, П.-С. Лапласа, К. Гауса, а також теорії полів Е.Галуа. При чому Е.Галуа вперше визначив перспективу розв'язання широкого класу задач у скінчених полях та методами дискретної модульної математики. Організацією руху даних в РКС займалися зарубіжні вчені. Т.Харрісон [6, 7] визначив головну тезу цілі проектування РКС, основною функцією якої є опрацювання даних у моменти переходу складних систем та об'єктів управління у квазістаціонарні стани, що виникають при нештатних передаварійних та аварійних ситуаціях, оскільки у стані норми функції управління об'єктом виконують регулятори та мікроконтролери низового рівня комп'ютерної мережі. М.Бат [212] удосконалив теорію спектрального косинусного перетворення Фур'є шляхом врахування експоненціального затухання енергії автокореляційних функцій, що дозволило ліквідувати уявні "від'ємні" частоти в результаті обчислення дискретного косинусного перетворення Фур'є. Дж.Мартін [213, 214] вперше ввів поняття "одиниця руху даних" у вигляді відношення числа зчитування до об'єму записів даних в активних вузлах РКС.

Досвід розробки та перспективи розвитку розподілених комп'ютерних систем з вбудованими спецпроцесорами опрацювання сигналів та даних програмно викладені в праці О.В.Палагіна та Я.М.Николайчука [25].

Теоретичну основу РКС складає теорія мереж Петрі, розроблена Карлом Петрі в якості моделей асинхронних систем, що функціонують як сукупність

паралельних взаємодіючих процесів, а також їх модифікацій у вигляді кольорових мереж Петрі, які системно описані в роботах Д.А. Зайцева, В.Є. Котова [215-217], в тому числі методи проектування РКС з ознаками кольорових мереж на основі матричних моделей руху даних [95, 96].

В Україні фундаментальні основи розробки складних кібернетичних систем та їх компонентів – РКС розроблені академіком В.М. Глушковым [218] на основі теорії дискретної алгебри цифрових автоматів, який визначив перспективи розвитку та становлення теорії безпаперової інформатики, а також відомими вченими Б.М. Малиновським [20, 21], який формалізував теоретичні основи кібернетичних систем та основи керуючих систем гнучкими автоматизованими виробництвами; І.В. Сергієнко, який створив математичні основи системного аналізу багатокомпонентних розподілених систем [27, 28]; А.І. Кондалєвим, який розробив теорію перетворювачів форми інформації і заклав основи теорії структуризації поліфункціональних даних на основі аналого-цифрових перетворень [37]; а також спеціалістами в галузі обчислювальних систем та багаторівневих конвеєрних комп'ютерних мереж К.Г. Самофалов, В.П. Тарасенко, З.Р. Мичуда, Р.Б. Дунець, Г.Г. Швачич, С.Г. Семенов [38, 39, 47, 49, 54, 58, 59, 61], які заклали основи розподілених та вбудованих спеціалізованих комп'ютерних систем, А.О. Мельника [43-45], який узагальнив теорію комп'ютерних засобів з реконфігурованою архітектурою та впорядкованим доступом до пам'яті, Я.М. Николайчук, який розробив теорію джерел інформації [50], кодових систем Галуа [51] та, у співавторстві, спеціалізованих комп'ютерних технологій в інформатиці [90]; Б.П. Русин, який розробив системи розпізнавання образів та їх криптографічний захист [219, 220].

В роботі [221] О.В. Поморовою системно викладені теоретичні основи та структурні моделі складних інформаційних систем, які відображають сукупність стійких внутрішніх зв'язків об'єкта, структурні властивості оригіналу, елементний склад та міжелементні зв'язки.

Як показано в роботі Д.А. Зайцева [14], цінність інформаційних ресурсів, результативність їхнього опрацювання, продуктивність інформаційної взаємодії

залежать від вирішення питань організації доступу до інформаційних ресурсів, захисту інформації, систематизації різноманітної інформації і документів, узгодженості управління та представлення структурованих даних і неструктурованого "контенту" [15].

У сучасній інформатиці існують 5 підходів до виміру інформації [14]: ентропійних, алгоритмічний, комбінаторний (алгебраїчний) , семантичний та прагматичний.

Крім того розрізняють процесуальну та структурну складові інформації. Структура визначає статичну організацію, процесуальна – відображає динаміку отримання, перетворення, представлення, збереження, відтворення інформації та використання [16].

При опрацюванні інформації важливі як структурна, так і процесуальна складові. Структури утворюються під час опрацювання інформації, а процеси – певними функціями, які керовані структурами. Структури та процеси перетворення інформації поєднуються і реалізуються в єдиній інформаційній системі.

В [14] показано, що РКС є системоутворюючою складовою сучасних інформаційних інфраструктур, а комп'ютерні технології забезпечують інформаційну інтегрованість при географічній розподіленості джерел інформації. При цьому характерними особливостями РКС є: відкритість, паралельність, масштабованість, відмовостійкість, прозорість, спільність використання ресурсів.

Крім названих особливостей для РКС властиві також складність та квазістаціонарність.

Як показано Я.М. Николайчуком [50, 98] розробка програмно-апаратного забезпечення для РКС значно відрізняється від технології проектування централізованих систем, оскільки вони проектуються, виходячи з умови обслуговування просторово розподілених об'єктів управління при виникненні відхилень від норми, перехідних процесах та непередбачуваних зовнішніх збуреннях.

Проблемним є криптозахист компонентів та елементів РКС у процесах формування, передавання, цифрового опрацювання, зберігання та відображення цифрових даних [32, 33, 222-224]. До важливих характеристик РКС слід віднести: працездатність, безвідмовність, безпечність, захищеність та живучість [6, 7].

У процесах створення та опрацювання інформації в РКС в діалоговому режимі приймає участь людина (оператор). Тому РКС відносяться до класу діалогових систем [225, 226].

Сучасна методологія розробки та проектування РКС, особливо проблемно-орієнтованих спеціалізованих комп'ютерних систем (СКС), передбачає формування та структуризацію моделей руху даних [98], обґрунтування системних рішень згідно законів доцільності [227], епюр руху даних, критеріїв оцінки часової, апаратної та структурної складності компонентів та програмно-апаратних засобів обчислювальної техніки [160, 188], а також принципів інтеграції та взаємоузгодженості цифрових даних в процесі їх перетворень [149, 160].

Формалізація участі людини у процесах опрацювання інформації в РКС здійснюється шляхом функціонального опису статичних, кореляційних, ентропійних та інших характеристик об'єктів управління шляхом побудови структуризованих відображень образно-кластерних моделей [159, 173].

Концепція та парадигма створення РКС базується на інтеграції наступних функціональних механізмів: розпізнавання, відновлення, адаптація, реорганізація, реконфігурування та реконструкція [223, 224].

Ідеологія проектування та розробки живучих РКС дозволяє вирішувати наступні задачі [223, 224]:

- досягнення загальносистемної цілі функціонування у непередбачуваних умовах функціонування;
- адаптивне керування безпекою РКС;
- захист, підтримка цілісності й конфіденційності у процесах передавання та зберігання даних.

Теорія та методологія проектування РКС, які адаптовані до конкретних галузей промисловості та технологічних процесів, адекватно реалізується згідно принципів, методів та інформаційних технологій побудови СКС, які належать до проблемно-орієнтованих систем, що викладено в роботах [90, 97, 98].

Концепція розвитку СКС, як галузі національної науки і техніки, у найближчому майбутньому принципово викладена у праці професорів А.О. Мельника та В.П. Тарасенка, Я.М. Николайчука [98, 228].

Загальний аналіз методології створення і використання СКС показує, що їх можна розділити на три основні групи: проблемна орієнтація РКС, зумовлена особливими вимогами до реалізації комп'ютерних систем (КС), які полягають в екстримізації (тобто в максимальному наближенні до теоретичних границь) деяких їх характеристик, наприклад продуктивності (швидкодії), надійності (безвідмовності, живучості, відновлюваності, довговічності тощо), вартості та складності, точності, габаритів, маси та ін.

Особливістю проблеми створення РКС, які є складними програмно-технічними комплексами, є необхідність задоволення багатьох суперечливих вимог. Аналіз математичних методів оптимізації СКС показує, що вони сприяють виявленню недоліків таких систем і їх "слабкі місця", простежують взаємозв'язок характеристик системи, визначають загальний напрямок підвищення їх ефективності та оцінюють різні варіанти СКС. Однак ці методи, як правило, не дають конструктивних розв'язків і шляхів удосконалення СКС, не визначають змістовної сторони різних варіантів їх організації і реалізації. Генезис таких варіантів формальними математичними методами практично ускладнений. Тому процес створення оптимізованих СКС має характер багатоступеневої ітераційної процедури, де в різних відношеннях комбінуються формальні та конкретно-змістовні методи, що відіграють аналітичну (оціночну) та синтетичну (генеративну) роль [98, 228].

Важливою задачею є розробка проблемної орієнтації архітектури та удосконалення компонентів РКС, які є розширенням топології комп'ютерних мереж, узагальнена архітектура яких показана на рис.1.1 [98].

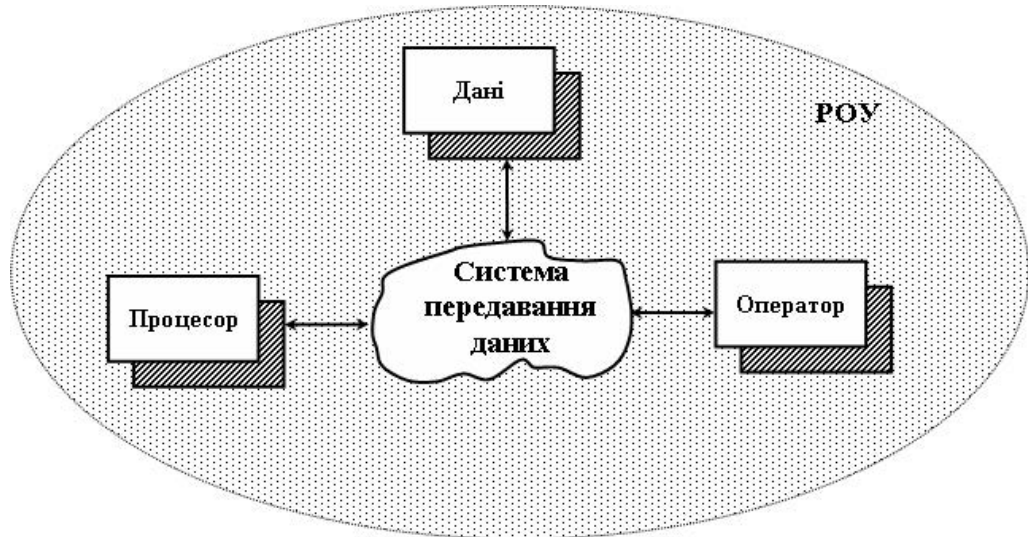



Рис.1.1 - Архітектура комп'ютерних мереж (РОУ – розподілений об'єкт управління;  – ознака багаточисельності).

Розподілені КС реального часу можуть належати двом класам:

- універсальні РКС, які належать до класу корпоративних систем [25, 229, 230];
- спеціалізовані РКС або спеціалізовані КС [35, 53];.

Універсальні РКС також можуть бути реалізовані на основі різних архітектур та топологій, в тому числі – на основі вбудованих однокристальних СКС з мережевим обміном даними [231]. Глобальна модель таких систем показана на рис.1.2.

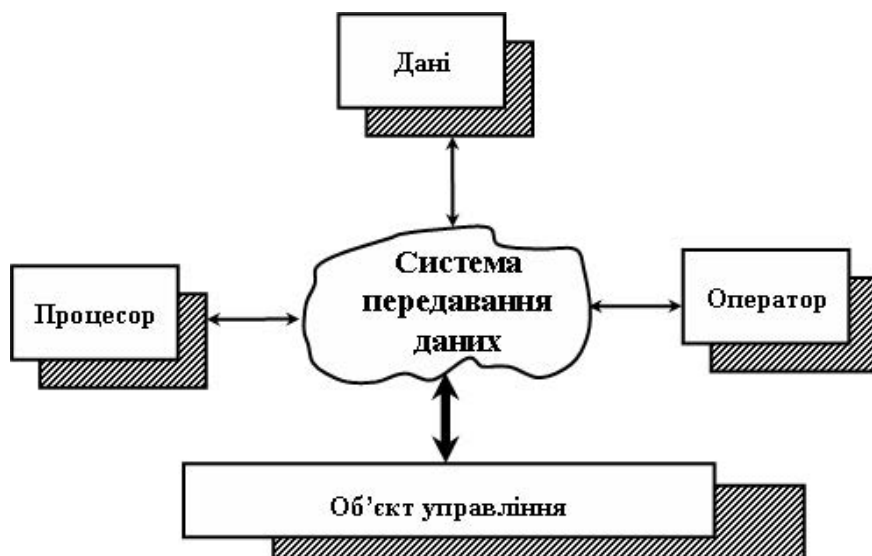


Рис.1.2 - Глобальна модель РКС.

Особливістю такої архітектури є обов'язкова наявність об'єктів управління у глобальній моделі.

Базовими функціями РКС, як показано в працях Дж. Мартіна [3, 213, 214], є концепція структуризації даних та організація руху даних, яка охоплює: збір, розпізнавання, перетворення, шифрування, впорядкування, кодування, відображення, реєстрацію, передавання, цифрове опрацювання, архівацію, зберігання, використання [98].

Спеціалізовані комп'ютерні системи відрізняються від універсальних та інших класів комп'ютерних систем умовами максимізації або мінімізації системних характеристик їх компонентів.

Виходячи з ресурсних характеристик системних об'єктів, глобальна модель СКС (рис.1.2) описуються узагальненим функціоналом:

$$Eco = F(T, V, M, S),$$

де  $T$  – час використання ресурсу,  $V$  – швидкість виконання системних операцій (формування, передавання, цифрова обробка та зберігання даних),  $M$  – об'єм використовуюваного ресурсу пам'яті,  $S$  – системні функції.

До характеристик кортежу функціоналу, на відміну від універсальних комп'ютерних систем, висуваються особливі мінімаксні вимоги наступного виду [98]:

$$\begin{array}{ll} T = \min \vee \max; & M = \min \vee \max; \\ V = \min \vee \max & S = \min \vee \max \end{array}$$

Існують три перспективні напрямки створення РКС, сформовані групою провідних фірм, зокрема Mentor Graphics, Synopsys, LSI Logic, Cadence, Design Systems, які створюють програмні продукти для різних етапів проектування електронних компонент. Другий напрямок передбачає створення комп'ютерних засобів підтримки проектування електронних компонент, де спостерігається лідерство фірм-виробників робочих станцій Sun та Hewlett Packard на базі потужних персональних комп'ютерів з процесорами фірми Intel. Третій, напрямок передбачає розробку мікроелектронних компонент, які тиражуються фірмами АВВ, Analog Devices, Motorola. Протягом останніх 10-15 років у розробках РКС значно зросла частка структурних рішень, які можна

використовувати як комплектуючі компоненти, до яких належать програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС), базові матричні кристали, тощо, які випускаються фірмами Altera та Xilinx.

На сьогодні в теорії РКС сформувалися два основні підходи до організації їх структур. Перший ґрунтується на використанні стандартних універсальних процесорів, другий - базується на використанні проблемно-орієнтованих спецпроцесорів, які реалізують алгоритми апаратним способом. Такі процесори, функціонально або апаратно-орієнтовані, належать до класів ASIC, ASIP [232, 233].

Основна перевага процесорів універсальної архітектури – гнучкість. Запис програм виконання заданого набору алгоритмів у пам'ять програм дає можливість створити спеціалізований процесор із заданими функціями. Такі процесори підлягають перепрограмуванню заміною вмісту пам'яті програм. При створенні відповідних трансляторів програмне забезпечення СКС може бути написане мовами програмування високого рівня, що робить їх доступними для широкого кола користувачів. Крім того, дуже суттєвою перевагою цього підходу є можливість використання створених раніше програмних засобів. Разом з тим, існує ряд причин, через які використання стандартних процесорів універсальної архітектури для побудови СКС може бути недоцільним.

Висока трудомісткість розробки РКС полягає у тому, що крім самого універсального процесора, необхідно включити також засоби для реалізації інтерфейсних функцій, синхронізації, розширення пам'яті програм і пам'яті даних тощо.

Універсальна архітектура може бути надлишковою у функціональному і структурному відношеннях для розв'язання однієї прикладної задачі.

Універсальний процесор може не задовольнити вимог щодо продуктивності РКС. Забезпечити необхідну продуктивність можна шляхом побудови багатопроцесорних РКС. Однак їх використання може бути функціонально надлишковим, як це спостерігається у тиражованих багатofункціональних мікроконтролерах.



РКС реалізуються на основі обчислювальних мереж та віддалених процесорів-сателітів, які обслуговуються та інформаційно взаємодіють з одним або багатьма системними серверами.

При цьому важливою проблемою, яка дозволяє суттєво оптимізувати системні характеристики складних, особливо проблемно-орієнтованих РКС, є розробка концепції та фундаментальних теоретичних основ структуризації даних, які характеризуються поліфункціональною орієнтацією формування, передавання на різних рівнях РКС. Це дозволяє суттєво підвищити характеристики апаратної, часової, функціональної, структурної складності компонентів та РКС в цілому.

1.2. Структурна та функціональна організація моніторингових комп'ютеризованих систем.

Розробка та впровадження комп'ютеризованих систем моніторингу широкого класу технологічних об'єктів різних галузей промисловості, а також технічної та екологічної безпеки їх експлуатації, є особливо актуальною науково-прикладною задачею. Такими об'єктами є установки буріння, видобутку, підготовки, транспортування, переробки та зберігання нафтопродуктів і газу [234, 235].

Прикладом найбільш популярних систем моніторингу стану розподілених об'єктів, до яких належить більшість промислових установок є:

- інтегрована система фірми АВВ, яка виконує: централізоване ліцензування; узгоджений обмін даними між контролерами; централізоване конфігурування структури та резервування; опрацювання аварійних сигналів високого рівня пріоритету; збір, зберігання і перегляд графічних трендів історії і даних; реєстрація подій по всій системі;

- система CMS фірми SPM, яка дає змогу виконувати інформаційно-вимірювальні функції, моніторинг технічного стану, спектральний аналіз, реєстрацію відхилень обладнання від норми, формування сигналів тривоги та накопичення інформації в реальному часі;

- система адаптивної моніторизації COMPASS фірми Брюль і К'ер, система VIBROCAM-4000 фірми SCHENCK та ES-Configurator, представника F&F "Електросвіт" фірми F&F, які оснащені повнофункціональними наборами компонентів типу: сенсорів, комутаційних та програмованих реле, таймерів, цифрових регуляторів, контролерів, індикаторів та моніторів абонентських станцій операторів. Приклади архітектури таких систем подано на рис.1.3-1.6. [236-238].

ABB 800xA System являє собою платформу, на якій можуть бути створені розподілені системи управління з різною структурою і функціональністю.

Основне застосування 800xA System - створення автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) в різних галузях промисловості.

На рис.1.3 представлена структура типової системи 800xA [239].

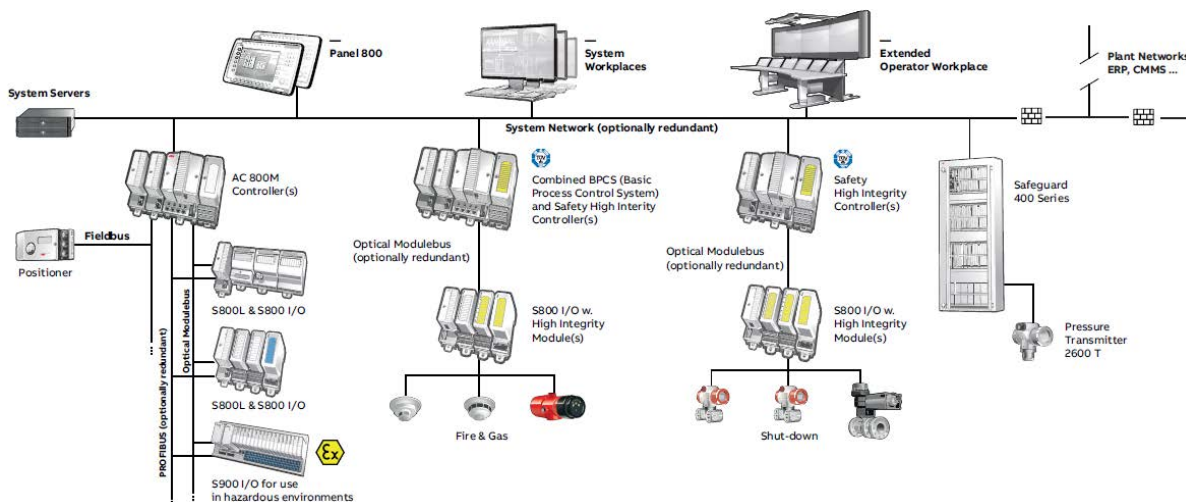


Рис.1.3 - Типова структура АСУТП на базі 800xA System.

Перший рівень - низове обладнання, датчики і виконавчі механізми. Зв'язок з польовим обладнанням по фізичних лініях забезпечується системою введення-виведення S800 виробництва АВВ, а також стандартними польовими шинами: Modbus, Profibus, Foundation Fieldbus.

Другий рівень - контролери технологічної частини автоматизованої системи управління (АСУ) енергоблоку. Виконують технологічні алгоритми і обмінюються даними з серверами зв'язку і між собою через мережу управління, використовуючи протокол MMS. Мережі управління і клієнт-сервер будуються на базі Ethernet.

Третій рівень - сервери зв'язку та бази даних. На серверах зв'язку встановлений OPC сервер, який збирає значення змінних, аварійні повідомлення і події з контролерів за протоколом MMS (для контролерів серії AC800M) і надає їх клієнтам по протоколу OPC. Операторські станції отримують доступ до даних через, так званий, Data Access сервіс, який в свою чергу отримує їх з OPC сервера. Сервери бази даних (так звані Aspect Servers), призначені для зберігання конфігурації системи управління (відеокадри, база даних сигналів, технологічні програми, бібліотеки функцій, документи та інші подібні об'єкти).

Четвертий рівень - операторські станції. Призначені для відображення даних технологічного процесу, звітів, історичних даних, документації, управління технологічним процесом.

Багаторівнева архітектура забезпечує гнучкість системи, на кожному з рівнів в неї можуть бути інтегровані нові компоненти виробництва ABB або сторонніх виробників. Таким чином здійснюється, наприклад, підтримка більшості "класичних" систем виробництва ABB - Advant, Harmony, MOD300. Їх підтримка реалізується включенням в систему спеціалізованого сервера зв'язку (Connectivity Server), який підтримує специфічні протоколи характерні для відповідних систем.

Система моніторингу "Диспетчер" компанії "Балт-Систем" призначена для безперервного моніторингу роботи промислового устаткування і виробничого персоналу на підприємстві та відноситься до інформаційних систем класу MDC ( Manufacturing Data Collection) [240].

Мета системи - підвищення ефективності роботи промислового устаткування і виробничого персоналу на підприємствах. Все виробниче обладнання підприємства, незалежно від типу, виробника, року випуску об'єднується в єдину локальну обчислювальну мережу. Під управлінням спеціалізованого програмного забезпечення і, при необхідності, за допомогою додатково встановлених верстатних терміналів, це обладнання автоматично передає дані про свою роботу на сервер системи моніторингу "Диспетчер" (рис.1.4) [240].

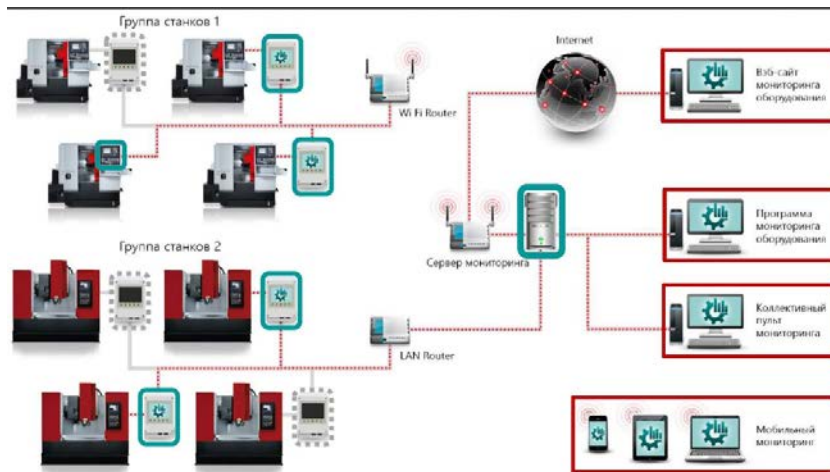


Рис.1.4 - Система моніторингу "Диспетчер".

Centum VP - це система управління виробництвом реального часу, що включає станцію оператора і станцію управління (FCS), які пов'язані за допомогою маркувальної шини V (рис.1.5) [241].

Система управління Centum забезпечує: збір, зберігання і аналіз даних технологічного процесу; безпечне ведення технологічних процесів; рішення задач оптимального управління; стійкість процесів регулювання та оптимізації; управління періодичними процесами; взаємодію з підсистемами верхнього і нижнього рівня практично з будь-якими промисловими стандартними протоколами [241].

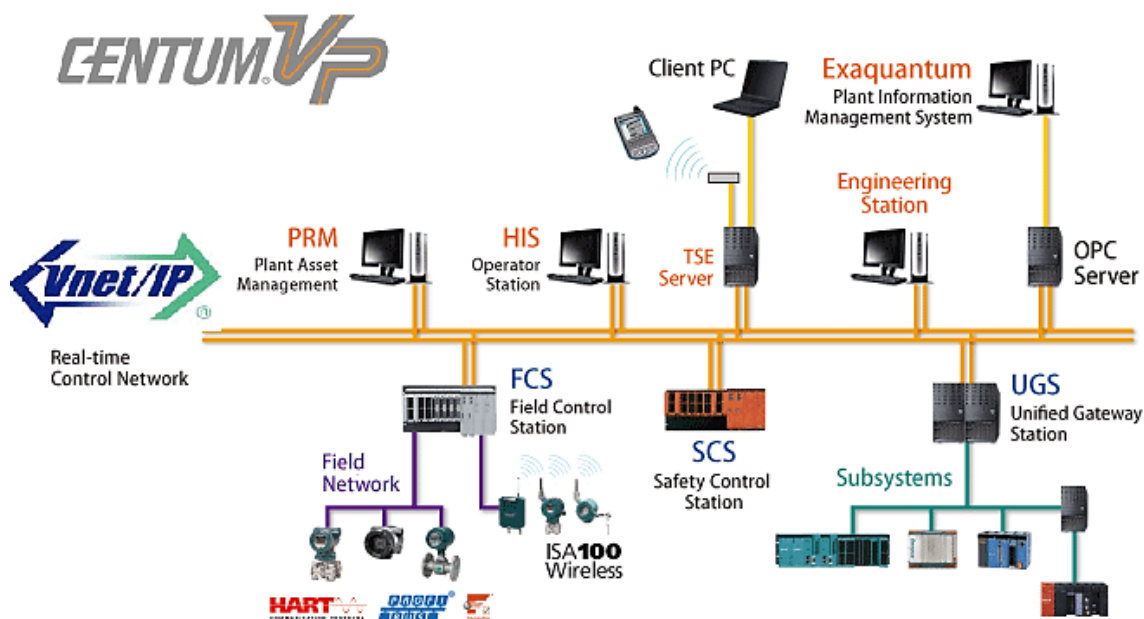


Рис.1.5 - Система управління виробництвом Centum VP.

Програмне забезпечення, що запускається на станції оператора HIS і на станції управління, забезпечує виконання відповідно функцій управління/контролю і функцій управління. Для зв'язку між станціями оператора може використовуватися також мережа Ethernet.

Станція оператора (HIS) є інтерфейсом оператора для управління, контролю та інжинірингу. Пакети програмного забезпечення інстальовані на персональному комп'ютері загального призначення або на консольній станції оператора HIS, що складається з ПК загального призначення і комплекту консолі з монітором відкритого типу, що виконує відповідні функції.

Станція управління (FCS) контролює технологічний процес і управляє з'єднаннями з підсистемами, наприклад, з програмованими логічними контролерами (PLK). Для різних додатків можуть використовуватися різні типи станцій управління: стандартна, розширена або станція компактного типу.

Експертна система моніторингу, діагностики та керування "Есмду-Транс" (рис.1.6) [242] призначена для: контролю технічного стану трансформаторного обладнання у процесі експлуатації; формування діагностичних, попереджувальних та аварійних повідомлень; ведення бази даних; передачі інформації про технічний стан обладнання у автоматизовану систему управління підстанції.

Апаратне забезпечення ЕСМДУ-ТРАНС має трирівневу структуру (рис.1.6) [242]:

1-й рівень – датчики та первинні перетворювачі. На даному рівні здійснюється перетворення вимірюваних фізичних параметрів в уніфіковані сигнали для передачі даних вимірювань на 2-й рівень.

2-й рівень – контролери та пристрої вводу/виводу. На цьому рівні здійснюється обробка сигналів з 1-го рівня, виконання розрахунків ряду діагностичних параметрів і формування цифрових потоків для передачі інформації на рівень 3.

3-й рівень – сервер збору даних та експертних оцінок. На цьому рівні здійснюється збір та обробка цифрових потоків, ведення архівів, виконання

експертних оцінок, відображення інформації на екрані монітору та інформаційний зв'язок з суміжними системами більш високого рівня.



Рис.1.6 - Експертна система моніторингу та керування "Есмду-Транс".

В якості систем дистанційної взаємодії компонентів провідного та безпроводного інтерфейсного зв'язку використовується [238]: сервери OPC і SCADA, GSM та LAN-мережі, Internet GSM, CSD, Clip, Voice IBR, DIMF, GPRS, MS SQL, MY SQL, Modbus RTU/TCP.

Важливими функціями описаних систем є організація інтерактивної взаємодії "оператор – моніторингова система", яка реалізується на рівні абонентської станції оператора.

Типовими формами такої взаємодії є (рис.1.7) [236-245]:

- таблиця групи технологічних параметрів;
- тренди графіків реєстрації параметрів у часі;
- реалістичне структуризоване представлення об'єкта чи процесу моніторингу на базі Windows WPF.

Слід зауважити, що в системі 800А та Centrum VPRS значна увага приділена факторам ефективності роботи оператора. При цьому метою

інтегрованого інтерфейсу оператора є надання йому можливості швидкого і спрощеного користування засобами прийняття рішення для аналізу, пошуку та ліквідації несправності, як у звичайному режимі, так і при наявності збоїв і відмов керуючого, виконавчого та інформаційного обладнання.

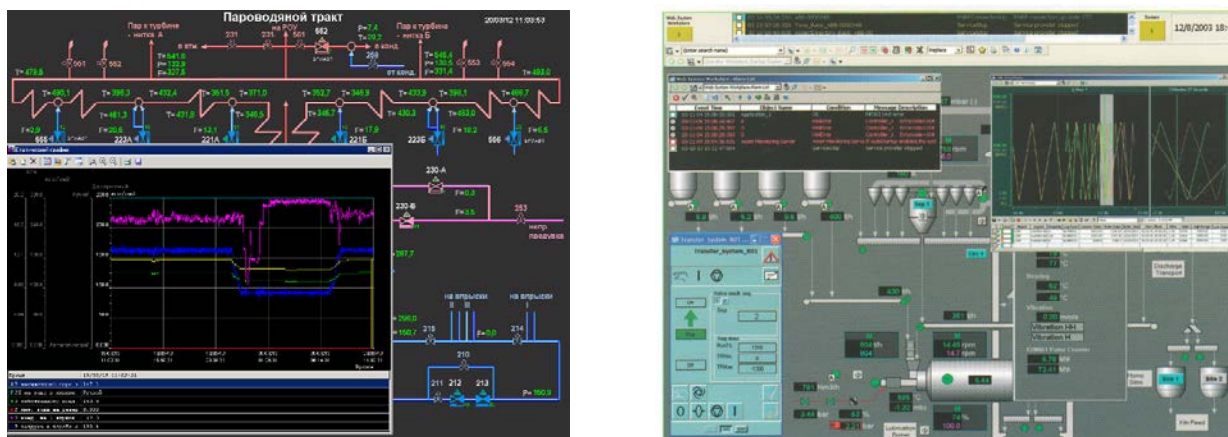


Рис.1.7 - Структуризація моніторингових даних в існуючих системах

Моніторинг технологічних об'єктів нафтогазової та інших галузей промисловості в наш час здійснюється за допомогою інтегрованих розподілених комп'ютеризованих систем [234, 235, 238, 239, 243, 246]. Програмно-апаратні засоби такого класу інформаційних систем тиражуються і впроваджуються відомими зарубіжними фірмами: ABB, Motorola, F&F, SPM, Schenck, Yokogawa та їхніми представництвами в Україні (Електросвіт, ООО "Йокогава Електрик Україна") [238, 239, 243].

### 1.3. Мережі Петрі, кольорові мережі Петрі та моделі руху даних

Мережі Петрі графічно моделюють структури систем, а також синхронні та асинхронні процеси. Запропонована Карлом Петрі методологія їх побудови, одержала подальший розвиток у роботах: Тадао Мурата, Анатолія Слепцова, Дмитра Зайцева [10, 11, 247-249]. Галузі застосування мереж Петрі включають проектування та дослідження телекомунікаційних мереж, мережевих протоколів, обчислювальних систем та процесів, виробничих і організаційних систем [236-245].



Приклади графів мереж Петрі, структурні відношення між елементами, що описуються матрицями суміжності, оргграфи булевої матриці інциденцій та елементи вузлів кольорових мереж Петрі, які відповідають символіці вузла матричної моделі [9, 14, 15, 215, 217, 250], подані в додатку А1.

1.4. Типи даних: формалізовані, проблемно-орієнтовані, структуризовані, поліфункціональні.

На рис.1.8 показані форми представлення, види і властивості інформаційних повідомлень.

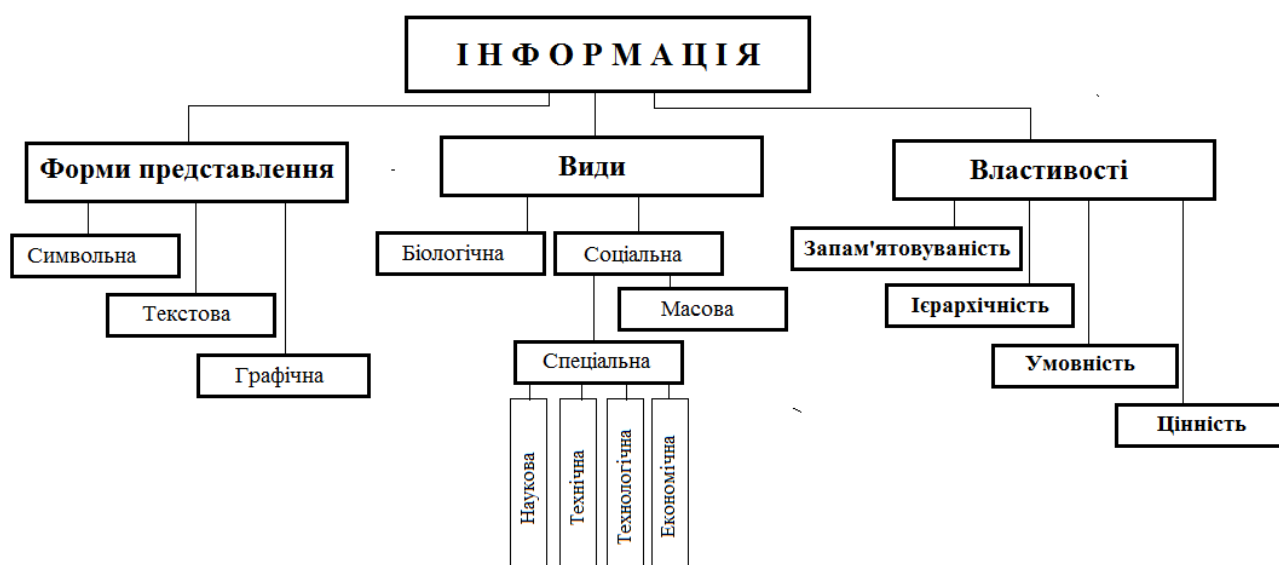


Рис.1.8 - Форми представлення, види і властивості інформаційних повідомлень.

Основною формою подання інформаційних повідомлень, які можуть бути представлені у вигляді: електричних, світлових, звукових та радіосигналів; алфавітно-цифрових повідомлень, креслень, чорно-білих та кольорових зображень, голограм; просторових переміщень об'єкта та ін., є дані [251].

Згідно класифікації у інформатиці визначають наступні класи даних: фізичні, логічні, віртуальні.

Фізичні дані розміщуються на фізичних носіях або представляються сигналами.

Логічні - формалізовані у вигляді математичного опису (графами, алгоритмами, аналітичними формулами).



Віртуальні – дані, які не реєструються, а виникають як проміжні інформаційні повідомлення в процесі обчислень, опрацювання, перетворення.

Дані можуть бути неструктуризовані, структуризовані, моно- та поліфункціональні.

Неструктуризовані дані представляють собою конгломерат окремих компонентів, які функціонально не зв'язані між собою.

Структуризовані дані характеризуються внутрішньою структурною організацією у вигляді функціональних кластерів, які за багатьма ознаками відрізняються від інших кластерів.

Монофункціональні дані є проблемно-орієнтованими до окремої функції застосування, використання. Наприклад, цифри та літери – для представлення алфавітно-цифрової інформації, сигнали – фізичні носії даних у каналах інформаційних повідомлень.

Поліфункціональні дані (ПФД) – проблемно-орієнтовані структури даних, які призначені для багатофункціонального застосування при вирішенні широкого класу інформаційних задач. Наприклад, цифрові коди, які можуть застосовуватися для відображення інформації, цифрового опрацювання згідно різних алгоритмів, стиснення об'ємів інформації, криптозахисту та ін.

Крім того, важливою характеристикою поліфункціональних даних є такі форми їх представлення, які забезпечують підвищення ефективності наступних етапів проблемно-орієнтованого опрацювання, передавання, перетворення, опрацювання, архівації та використання інформації, а також їх сумісність з іншими способами, характеристиками та класами даних. До ПФД слід віднести структури трендів, зображень, алфавітно-цифрових даних, аналітику та графіки функцій, структурну організацію алгоритмів, програмних продуктів, інтерфейсних вікон, алгоритмів функціональних перетворень даних, сигналів та кодів, алгоритмів стиснення та шифрування даних та ін.

Процеси опрацювання даних містять в собі наступні операції, які включають: збір, формалізацію, фільтрацію, сортування, групування, архівацію, захист, транспортування, перетворення.

ПОД та ПФД можна адаптовано представити у кодах різних систем числення та теоретико-числових базисах. Ефективність адаптації такого класу даних дозволяє суттєво спростити алгоритми та оптимізувати структури апаратних засобів у подальших процесах цифрового опрацювання та організації руху даних.

1.5. Формалізація структур інформаційних потоків у багаторівневих РКС на основі матричних моделей руху даних.

При проектуванні чи модернізації систем автоматизованого управління (САУ), низових обчислювальних мереж (НОМ) чи інших складних мережевих структур виникають проблеми узгодження в часі і в просторі виконання операцій, передавання даних, визначення необхідних ресурсів та каналів зв'язку, рівномірний розподіл навантажень. За допомогою побудови комплексу взаємопов'язаних інформаційних моделей руху даних успішно вирішуються поставлені проблеми та забезпечується створення ефективних РКС з функціонально узгодженими на всіх рівнях інформаційними потоками.

Прикладом успішного застосування основ теорії структуризації даних, яка знаходиться у стадії активного становлення та розвитку, є формалізація структур та організація опрацювання даних у багаторівневих РКС на основі сімейства матричних моделей руху даних (ММРД) [95, 96].

В роботах [93-96] автором запропонована класифікація базових матричних та похідних моделей руху даних:

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1) матрична модель;                  | 3.4) суміщений часовий граф;             |
| 2) модель граф – розгалужене дерево; | 4) модель – алгоритм обробки інформації; |
| 3) часові моделі:                    |  |
| 3.1) параметрична часова модель;     | 5) граф-алгоритмічна модель;             |
| 3.2) структурно-часова модель;       | 6) блок-схема алгоритму;                 |
| 3.3) модель – мережевий граф;        | 7) епюри собівартості.                   |

В додатку А2 представлене розширення символіки атрибутів моделей руху даних (МРД), які враховують коефіцієнти руху даних, запропоновані Дж.Мартіном та автором.

Додаток А2 також містить систематизацію умовних позначень типів операцій, що виконуються в активних вузлах та типів каналів передавання інформаційних потоків між вузлами (табл.А2.2)

Для багаторівневих РКС автором розроблена структура взаємодії вложений матричних моделей руху даних [98] (рис.А2.2), які формалізують типову тривірневу архітектуру інформаційних систем контролю та управління промисловими об'єктами.

На основі ММРД визначені перспективи розвитку формалізованих функціоналів математичних засад структуризації даних в РКС. У додатку А2 міститься аналіз методів формування та організації структуризованих даних у однорівневих та багаторівневих ММРД.

Таким чином, система розроблених функціоналів, які дозволяють реалізувати структурну організацію руху даних в багаторівневих розподілених комп'ютерних системах, на основі евристичних експертних оцінок та реалізації епюр циклів руху даних між джерелами інформації та пунктами їх використання, дозволяють ідентифікувати "вузькі" економічно, інформаційно, алгоритмічно, програмно, апаратно, енерго та організаційно неефективні вузли проєктованих чи удосконалюваних багаторівневих РКС, адаптованих до конкретних умов їх функціонування на конкретних промислових об'єктах.

Розроблені методи формалізації руху даних, технологія проєктування та системного аналізу досліджуваного класу КС добре узгоджується з відомими у світі технологіями та засобами проєктування складних КС на основі математичного апарату теорії категорій та онтологічних моделей типу: Cross-industry Standart Process for Data Mining (CRISP-DM), SEMMA (Sample, Explore, Modify, Model, Assess), Team Data Science Process (TDSP). [247, 253]. Приклади функціональних архітектур формування та опрацювання даних у сучасних РКС приведені на рис.1.9 [254].

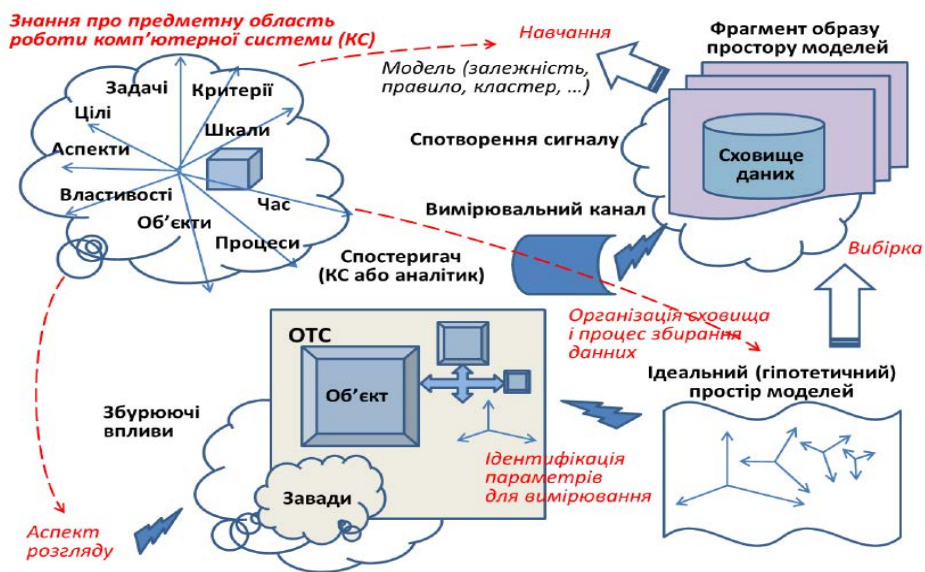
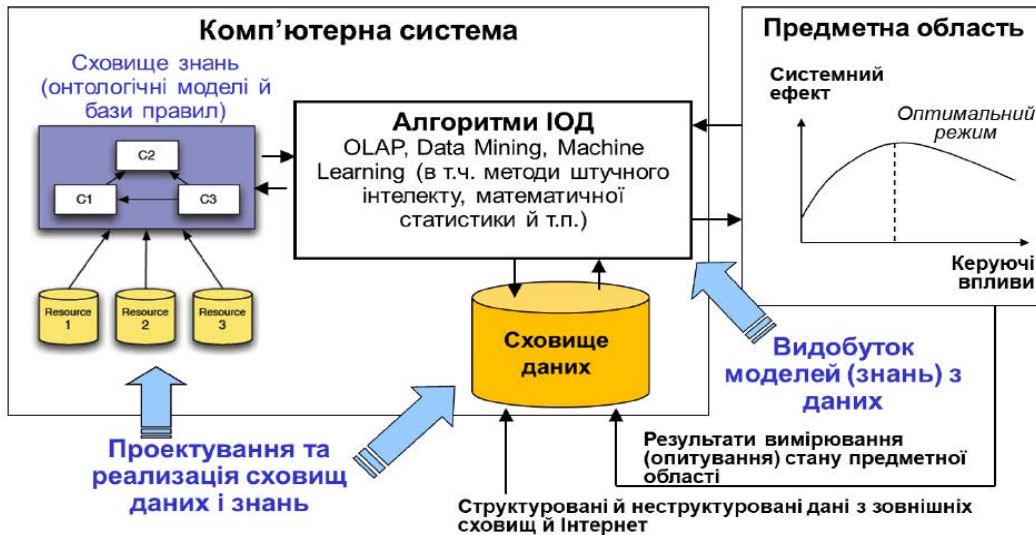


Рис.1.9 - Функціональні архітектури формування та цифрового опрацювання структуризованих даних у сучасних РКС.

Теоретичне обґрунтування реалізації функціоналів з позиції оптимізації процесів обчислень при формуванні, опрацюванні, передаванні та використанні структуризованих даних в активних вузлах ММРД потребують підвищення ефективності реалізації системних функцій РКС шляхом вдосконалення відповідних програмно-апаратних засобів, до яких належать аналого-цифрові перетворення одномірних та двомірних інформаційних потоків, цифрових зображень, обчислювальних пристроїв статистичного, кореляційного, спектрального, логіко-статистичного, кластерного та ентропійного аналізів.

Перспективним напрямом оптимізованої реалізації перелічених моделей – атрибутів функціоналів є розвиток теоретичних засад структуризації поліфункціональних даних на основі їх проблемної орієнтації до задач цифрового перетворення та опрацювання на основі наступних теоретико-числових базисів [96, 97, 149, 160, 255, 256] : унітарного, Хаара, Крейга, Грея, Уолша, Радемахера, Крестенсона та Галуа.

Важливою задачею при цьому є оптимізація системних характеристик компонентів РКС, які реалізуються програмно-апаратними засобами на основі системи критеріїв: апаратної, часової, структурної, інформаційно-структурної, ентропійної складностей.

Створення фундаментальних основ теорії структуризації даних стає потужним інструментом підвищення ефективності та розширення функцій сучасних інформаційних систем та успішного вирішення завдань переходу до інформаційного суспільства.

1.6. Розробка концепції структуризації даних. Постановка завдань дослідження.

В роботі [256] викладено семантико-евристичне поняття структуризації в широкому аспекті, який охоплює теорію систем та взаємодію їх компонентів, теорію інформації та архітектури комп'ютеризованих систем [150].

Поняття структуризації пов'язується з процесами розвитку та вдосконалення інформаційних систем: "Напрямок розвитку відбувається не просто до складного, але й до реального Світу, тобто структуризованому під його реалії." "Оскільки все, що існує у Світі структуризується під його реалії" [256].

Фундаментальним прикладом структуризації інформаційних конгломератів є структура та інформаційна організація ДНК, яка демонструє роль відбору та виживання в системі структурно стійкіших та інформаційно досконаліших форм живої матерії. При цьому фундаментальною теоретико-логістичною основою виступає ентропійний принцип оптимальності [257].

Тому усвідомлення концепції структуризації процесів, інформаційних даних та узагальнення фундаментальних теоретичних основ є актуальною проблемою.

Швидкий розвиток сучасних інформаційних технологій, комп'ютерних мереж та комп'ютеризованих систем викреслює дослідження проблеми структуризації в даній галузі як найперспективнішу задачу, оскільки практично всі напрямки розвитку сучасної цивілізації тісно пов'язані з інформатизацією суспільства та відповідною структуризацією інформаційних потоків [27, 258].

Щоб краще зрозуміти роль інформації та ефективно використовувати її у процесі функціонування систем, необхідно знати її структуризацію. Найвищим рівнем структуризації інформації є виділення її як системи для конкретного об'єкта і відповідних підсистем [259]. Проте будь-яку систему можна розчленовувати аж до виявлення неподільних одиниць.

1.6.1. Класифікація атрибутів та формалізація процесів структуризації даних.

Викладення концепції вирішення проблеми структуризації інформаційних процесів та даних дозволяє підійти до узагальнення фундаментальної теорії структуризації та піти шляхом систематизації наукових дисциплін, які є компонентами теорії та методології структуризації. На рис.1.10 приведено приклад такої систематизації [97, 139, 150].

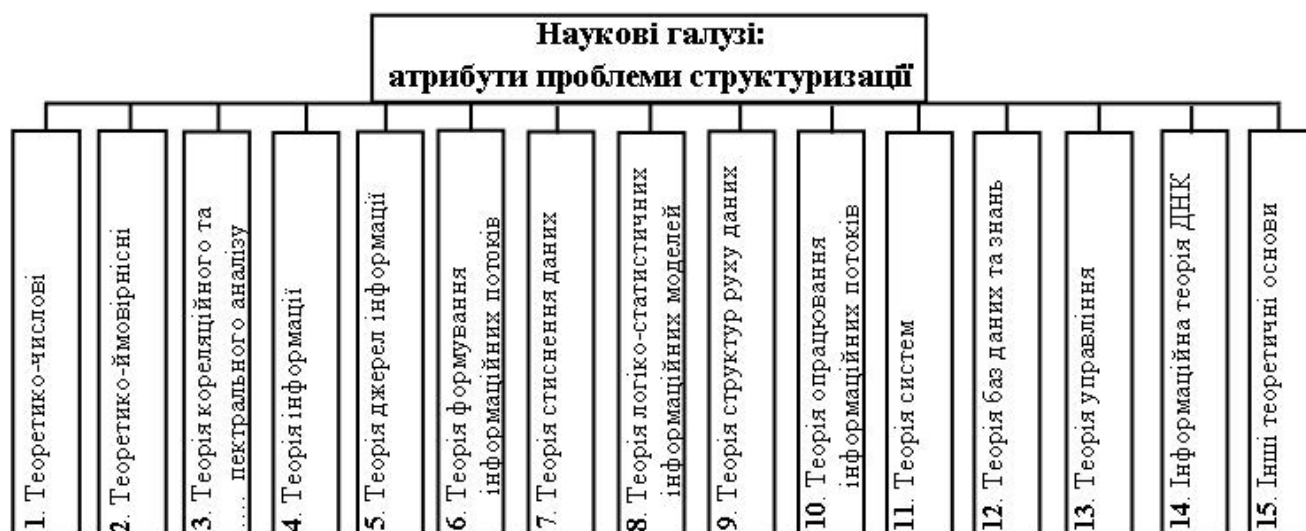


Рис.1.10 - Класифікація атрибутів теорії структуризації.

На рис.1.11 показано узагальнені процеси структуризації інформаційних потоків джерел інформації, де ДІ – джерело інформації, S - сенсорна система, # - процеси дискретизації у Хеммінговому просторі, FS - функціонал структуризації,  $F(U, \cap)$  - операції структурного об'єднання та розмежування.

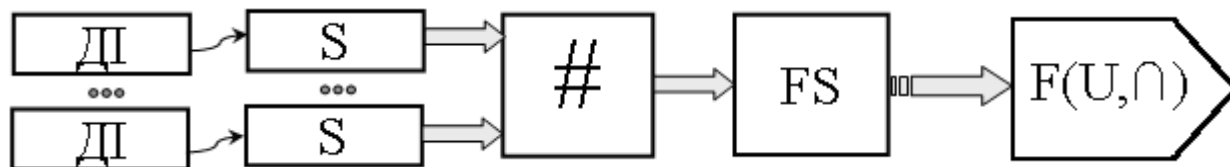


Рис.1.11 - Процеси структуризації.

### 1.6.2. Формування та опрацювання структуризованих даних.

Успішне вирішення проблеми формування та опрацювання структуризованих даних (СД) у розподілених комп'ютерних системах концептуально пов'язано з доцільним застосуванням широкого класу фундаментальних теоретичних засад у галузі інформатики, кібернетики та системотехніки. При цьому необхідно сформулювати основні атрибути положення та інформаційні процедури узагальненої теорії структуризації даних.

Теоретичні та прикладні резерви такого узагальнення дозволяють суттєво вдосконалити математику формування, передавання та цифрового опрацювання даних та досягнути відповідного значного підвищення ефективності функціонування компонентів, алгоритмів та результативності використання опрацьованих даних у розподілених комп'ютерних системах.

Дослідження світового досвіду реалізації засобів формування структуризованих даних, методів аналого-цифрового перетворення потоків технологічних даних, методів оптимізації кодування техніко-економічних даних (ТЕД) та методів організації руху даних в РКС показують, що подальше вдосконалення та оптимізація характеристик апаратно-програмних засобів РКС успішно реалізується завдяки:

- високому рівню паралелізму реєстрації технологічних даних в багатоканальних аналого-цифрових перетворювачах (АЦП), які на рівні

аналого-цифрових кодерів реалізують функції зниження надлишковості кодування даних та їх захисту від помилок;

- використанню математичних основ новітніх теоретико-числових базисів (ТЧБ): Крестенсона, Галуа, Уолша та ін. для представлення даних у вигляді фреймів СД, максимально адаптованих до низових рівнів РКС та роботи в умовах інтенсивних промислових заводів;
- вдосконаленню методів кодового представлення ТЕД;
- розширенню сукупності та вдосконаленню методів побудови моделей руху даних, а також ідентифікованих моделей собівартості руху даних.

При цьому на основі комплексу даних рішень на рівні РКС та мереж успішно реалізуються наступні задачі:

- формування СД та організації руху потоків даних у РКС;
- визначення перспективних методів структуризації різних типів даних у вигляді фреймів;
- розробка критеріїв оптимізації процесів формування алфавітно-цифрових, технологічно-економічних та структуризованих даних;
- дослідження засобів формування даних на основі критеріїв оптимізації;
- розробка теоретичних основ синтезованого формування алфавітно-цифрових та структуризованих даних;
- узагальнення теорії побудови багаторівневих інтерактивних моделей руху даних розподілених комп'ютеризованих систем реального часу на основі подальшого вдосконалення принципів формалізації атрибутів граф-алгоритмічних моделей руху даних та ідентифікованих епюр руху даних;
- вдосконалення алгоритму реалізації стратегії проектування РКС на основі законів доцільності та ідентифікованих циклів руху даних;
- розробка атрибутів та програмних засобів побудови багаторівневих граф-алгоритмічних моделей РКС;
- розробка мобільних апаратно-програмних засобів синтезованого вводу СД для низових рівнів РКС;



- вдосконалення структур та алгоритмів опрацювання даних компонентами КС в різних ТЧБ.

1.6.3. Узагальнення теоретичних основ та функцій концепції структуризації даних.

Впорядкування, структуризація різних видів даних, побудова моделей складних комп'ютеризованих систем є актуальною задачею, яка направлена на вдосконалення теорії, методології, практики їх проектування та діагностики штатності функціонування в реальному масштабі часу. В методологічному плані вирішення такої задачі потребує врахування проблемної орієнтованості, цілісності та складності, невизначеності, адаптивності, а також універсальності комп'ютеризованої системи. При цьому відповідно визначається ступінь цілеспрямованості та мета функціонування системи, можливості опису системи однією моделлю, оцінка ентропії, що відображає необхідну кількість керуючої інформації, можливості пристосування системи до впливу зовнішніх факторів, а також опис системи математичними моделями, що мають однакову структуру, незалежно від класу об'єктів – джерел інформації.

Аналіз методів структуризації даних, обґрунтування перспективного напрямку розвитку теорії, методології та техніки їх структуризації в сучасних комп'ютеризованих системах є актуальною задачею сьогодні [96].

Структуризація даних при виконанні функції формування, передавання, цифрового опрацювання, зберігання та використання структуризованих фреймів для управління об'єктами зображена на рис.1.12 [139, 150].

Приведена на рис.1.12 схема продукційної взаємодії функцій структуризації даних показує шлях формування та математико-алгоритмічного опрацювання даних згідно їх проблемної орієнтації. Наприклад, розпізнавання образів, стиснення даних, захист від несанкціонованого доступу, результати розв'язаних задач та ін.

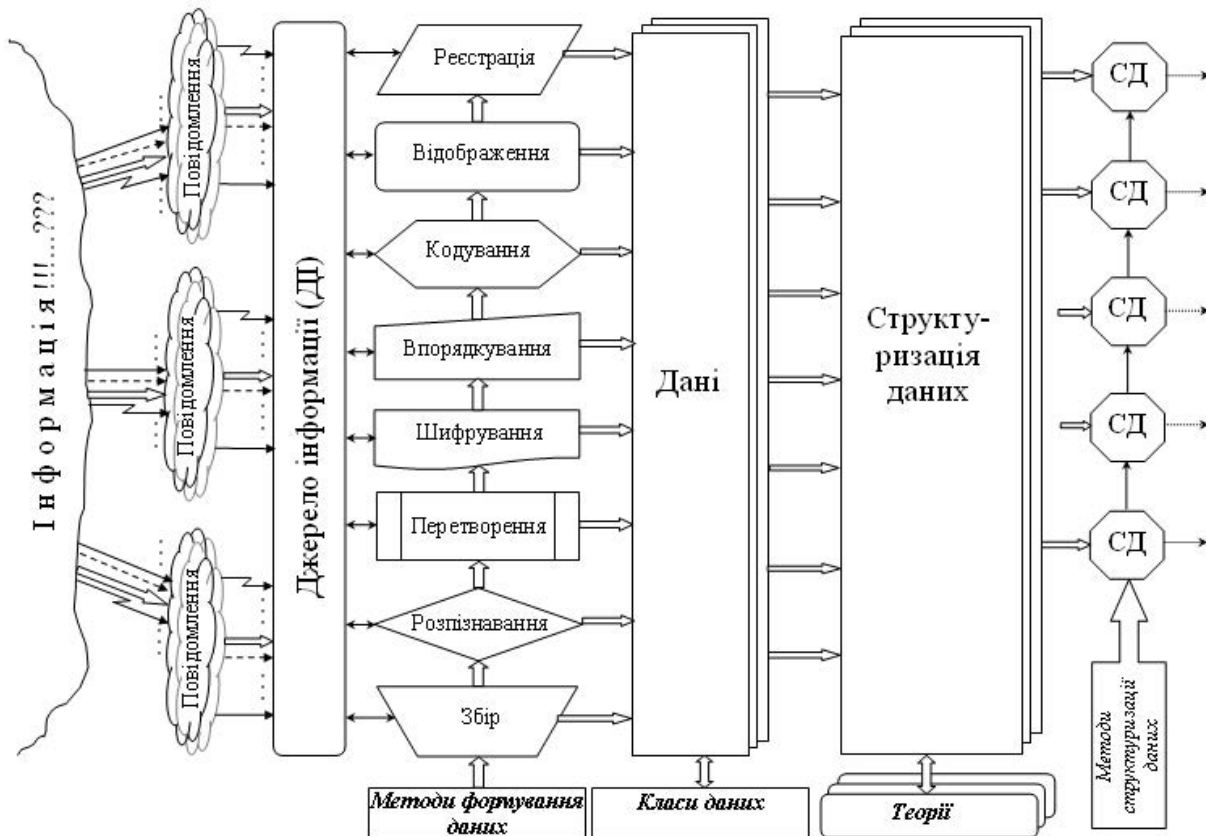


Рис.1.12 - Узагальнена схема функцій концепції структуризації даних.

#### 1.6.4. Постановка завдань дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс взаємозалежних наукових задач:

- 1) на основі аналізу структур та функцій існуючих моніторингових комп'ютеризованих систем розробити теоретичні основи концепції структуризації ПФД, яка включає теоретичні основи, методи, способи представлення та опрацювання даних;
- 2) узагальнити існуючі та розробити нові критерії оцінки структурної та інформаційно-структурної складності поліфункціональних даних;
- 3) розробити теоретичні основи методів структуризації ПФД у теоретико-числових базисах (ТЧБ): Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона;
- 4) розробити метод визначення ентропії станів квазістаціонарного об'єкта згідно ймовірнісної та кореляційної інформаційних мір оцінки ентропії;

- 5) розробити метод перетворення кодів RGB-пікселів кольорових зображень на основі ТЧБ Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона;
- 6) розширити можливості захисту кодів RGB-пікселів шляхом їх згортки з псевдовипадковими біт-орієнтованими послідовностями кодів поля Галуа;
- 7) розробити метод структурного опрацювання гармонічних сигналів та розпізнавання збурень у високовольтних електромережах;
- 8) розробити метод моніторингу станів квазістаціонарного об'єкта опрацюванням характеристик технологічного процесу та побудовою образно-кластерної моделі;
- 9) розробити схемотехнічні рішення перетворювачів, обчислювальних засобів та спецпроцесорів цифрового опрацювання даних з покращеними характеристиками структурної, апаратної та часової складності:
  - 9.1) швидкодіючі АЦП паралельного типу з вихідними кодами у базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона;
  - 9.2) однорозрядні неповні та повні двійкові суматори з комутованими прямими, парафазними та інверсними вхідно-виходами з гранично мінімальною затримкою сигналів суми та переносів;
  - 9.3) швидкодіючі однорозрядні та багаторозрядні двійкові суматори з інверсними та прискореними переносами;
  - 9.4) швидкодіючі перемножувачі унітарних та двійкових кодів у різних ТЧБ;
  - 9.5) пристрій для визначення ймовірнісної міри ентропії;
  - 9.6) пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач;
  - 9.7) спосіб контролю параметрів технологічного процесу на основі структури образно-кластерної моделі;
- 10) удосконалити протоколи обміну даними в мережах кіберфізичних систем;
- 11) удосконалити метод синтезованого формування алфавітно-цифрових даних;
- 12) реалізувати структурні рішення запропонованих апаратних компонентів КФС у мікроелектронному виконанні на ПЛІС.

## Висновки до першого розділу

1. Виконаний аналіз стану розвитку теорії, методів та засобів РКС. Досліджені тенденції та напрямки розвитку РКС. Здійснено аналіз робіт зарубіжних та вітчизняних фундаторів теоретичних основ розробки інформаційних технологій та побудови РКС, що дозволило сформулювати базові напрямки розвитку теорії, методології та техніки РКС.

2. Здійснена систематизація компонентів архітектур дистрибутивних та корпоративних РКС, на основі якої показана актуальність вирішення задач формалізації руху даних в РКС, які охоплюють проблеми контролю та управління промисловими об'єктами.

3. Систематизовані характеристики структур і компонентів мереж Петрі та моделей руху даних, які графічно моделюють структури РКС, які дозволили формалізувати технологію побудови матричних моделей руху даних в РКС.

4. Показано, що ресурсні характеристики системних об'єктів глобальної моделі СКС, описуються узагальненим функціоналом:  $Eco = F(T, V, M, S)$ , де  $T$  – час використання ресурсу,  $V$  – швидкість виконання системних операцій (формування, передавання, цифрова обробка та зберігання даних),  $M$  – об'єм використовуваного ресурсу пам'яті,  $S$  – системні функції, які для спеціалізованих РКС характеризуються мінімаксними характеристиками:  $T = \min \vee \max$ ;  $V = \min \vee \max$ ;  $M = \min \vee \max$ ;  $S = \min \vee \max$ , що дозволяє здійснювати реалізацію оптимізованих компонентів згідно мінімаксних характеристик.

5. Проаналізовані характеристики інформаційних процесів цифрового опрацювання даних на основі онтологічних моделей в існуючих системах, які розроблені і тиражовані відомими фірмами: Mentor Graphics, Synopsys, LSI Logic, Cadence, Design Systems, Sun, Hewlett Packard, Intel, ABB, Analog Devices, Motorola, Altera та Xilinx, що дозволило встановити їх недоліки та функціональні обмеження.

6. В результаті встановлено, що важливою проблемою, яка дозволяє суттєво оптимізувати системні характеристики складних, особливо проблемно-орієнтованих РКС, є розробка концепції та фундаментальних теоретичних основ структуризації даних, які характеризуються поліфункціональною орієнтацією на різних рівнях формування, передавання та опрацювання даних в РКС. Це дозволяє суттєво підвищити характеристики апаратної, часової, функціональної, структурної складності компонентів та РКС в цілому.

7. Розроблена концепція структуризації даних, яка охоплює теоретичні основи, методи та програмно-апаратні засоби оптимізації організації руху та цифрового опрацювання даних в РКС.

8. Здійснена постановка задач дослідження.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО ОПРАЦЮВАННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ У СТРУКТУРАХ ТА КОМПОНЕНТАХ РКС

2.1. Розробка та дослідження критеріїв структурної складності поліфункціональних даних.

Синтез та аналіз структур та компонентів РКС потребує чіткого визначення системи критеріїв, на основі яких здійснюється порівняння та оптимізація системних характеристик створюваних програмно-апаратних засобів. Найбільш поширеними у сучасній практиці аналізу системних характеристик обчислювальних засобів, які є компонентами РКС, є оцінки апаратної та часової складності. Крім названих, одним з важливих критеріїв оцінки досконалості архітектури компонентів, пристроїв та ПФД є критерій структурної складності.

Теоретичні основи оцінки структурної складності вперше запропоновані в теорії графів, мереж Петрі, які стали основою розрахунку структур мереж Петрі [10-12, 14-17]. При цьому ефективно застосування теоретичних засад формалізації оцінок структурної складності графів, що представляють мережі Петрі, дозволило систематизувати способи їх структурного представлення, а також формалізувати їх функціональні перетворення при склеюванні, диференціації, представленні у вигляді дерев та інш. [10-17].

Результатом розвитку такого напрямку структуризації даних став розвиток теорії та практичних застосувань так званих "кольорових" мереж Петрі, які характеризуються розширеним функціональним описом атрибутів активних вузлів та ребер мереж. Це дало змогу диференціювати атрибути вузлів мереж Петрі типу джерело інформації, пункт опрацювання даних та пункт приймання, затвердження та використання даних, що показано в наукових працях автора [91-94].

При цьому функціональні перетворення у структурі мереж Петрі виконуються згідно матриць суміжності ( $C_{ij}$ ) та інциденцій ( $A_{ij}$ ), які можна вважати первинними оцінками структурної складності в РКС, які представлені

$$\text{графами мереж Петрі: } C_{ij} = \begin{cases} V_j \rightarrow V_{j+1} = -1; \\ V_j \leftarrow V_{j+1} = +1, \end{cases} \quad A_{ij} = V_i \& V_j \in \overline{0 \vee 1}.$$

Загальна оцінка структурної складності мереж Петрі визначається відношенням кількості вершин ( $V_k$ ) до сумарної кількості однонаправлених ( $b_n$ ) та двонаправлених ( $b_m$ ) ребер:

$$k_c = \frac{V_k}{b_n + b_m},$$

де  $k, n, m$  - відповідно кількість вершин, однонаправлених та двонаправлених ребер.

Важливою проблемою є розробка критеріїв розрахунку структурної складності топологій та мікроелектронних компонентів операційних пристроїв обчислювальної техніки. Першим прикладом такої оцінки є метод Квайна [260] на основі оцінки сумарного числа входу-виходів мікроелектронної структури, який розраховується згідно виразу:

$$S_K = \sum_{i=1}^n X_i + \sum_{j=1}^m Y_j,$$

де  $X_i$  - входи (input),  $i \in 1, n$ ;  $Y_j$  - виходи (output),  $j \in 1, m$ ;

$n, m$  - відповідно число входів та виходів структури.

Оптимізаційний критерій рівня структури по Квайну визначається за трьома критеріями: мінімальної кількості логічних вентилів у структурі, мінімальної кількості входу-виходів у структурі, мінімальної часової затримки сигналів. Останні два критерії відповідають оцінкам апаратної та часової складності структур обчислювальних пристроїв.

Компонентами критерію оцінки складності по Квайну є, запропонована М.А.Карцевим, С.А.Майоровим, оцінка структурної складності шляхом визначення апаратної складності пристрою [34, 35]. Розрахунок такої оцінки

виконується обчисленням кількості логічних елементів та вентилів у структурі пристроїв з різною кількістю ієрархій та типів компонентів: однорівневі або

різних типів -  $A_{II} = \sum_{i=1}^n A_i$ ; дворівневі -  $A_{II} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_{ij}$ , трьохрівневі -

$A_{II} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l A_{ijk}$ , де  $A_{II}$  - загальна оцінка апаратної складності,  $i, j, k$  - типи

компонентів або рівнів структури пристроїв,  $m, n, l$  - відповідна кількість типів різних компонентів або рівнів структури пристрою.

Функціональні обмеження такого критерію полягають в тому, що він не враховує топологію типів, кількість зв'язків, їх пересічень, габарити кристалу, кількість входів та виходів та інше, що є важливою характеристикою при мікроелектронному проектуванні пристрою на ПЛМ, ПЛІС та засобах нанотехнологій.

М.В.Черкаським запропонований критерій, який в певній мірі вирішує цю проблему [40, 41] на основі SH-моделі алгоритму, що враховує апаратні засоби в явній формі:

$$B = \langle D, Q, g_0, g_f, G, P, M \rangle,$$

де  $D$  - кінцева множина символів зовнішнього алфавіту;  $Q$  - кінцева множина станів SH-моделі;  $q_0$  і  $q_f$  початковий і кінцевий стани,  $q_0, q_f \in Q$ ;  $G$  - конфігурація апаратних засобів моделі  $G = (X, U)$ ,  $X$  - множина елементарних перетворювачів:  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ;  $U$  - множина з'єднань:  $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ;  $P$  - програма;  $M$  - пам'ять.

В даній моделі використовується поняття "елементарний перетворювач"  $x_i$ , який є одиницею апаратної складності і перетворює деяку сукупність початкових вхідних даних  $d_i$  в сукупність вихідних даних  $d'_i$ :  $x_i : \{d_i\} \rightarrow \{d'_i\}$ .

При використанні SH-моделі пропонується використовувати наступні характеристики складності: апаратну; часову; ємнісну; програмну і структурну, де апаратна складність - кількість елементарних перетворювачів і елементів оперативної пам'яті; часова складність визначається кількістю елементарних



перетворювачів в максимальному шляху розповсюдження сигналу  $L = |\max X_i|$ ; програмна складність визначається за формулою [40, 41]:

$$P = -F \log_2 \frac{F}{n \cdot m},$$

де  $F = \sum_L f_l$ ;  $n$  – кількість входів керування;  $m$  – кількість дискретів часу часової діаграми;  $f_l$  – кількість сигналів керування 1-го фрагменту часової діаграми;  $L$  – кількість фрагментів часової діаграми, конфігурації яких не повторюються.

Структурна складність алгоритмічного пристрою визначається за наступною формулою [40, 41]:

$$S = -E \log_2 \frac{E}{n(n-1)},$$

де  $E$  – кількість елементів трикутної матриці суміжності системи;  $n$  – кількість вершин графу.

Цей критерій знайшов застосування при оцінці структурної складності операційних пристроїв та функціональних вузлів персональних комп'ютерів.

Функціональне обмеження даної оцінки полягає у тому, що при розрахунку структурної складності однорідних та регулярних середовищ, виникає  $\log_2 = 1$  і диференціація структурної складності стає неможливою.

Розрахунок часової складності структури виконується шляхом визначення сумарної кількості мікротактів затримки сигналів у найдовшому ланцюгу послідовно з'єднаних логічних або функціональних елементів між відповідними входами та виходами пристрою:

$$\tau = \sum_{j=1}^m \tau_j,$$

де  $m$  – кількість послідовно з'єднаних компонентів;  $\tau_j$  – затримка сигналів у кожному  $j$ -му компоненті.

У сучасній теорії опрацювання цифрових бінарних та кольорових зображень застосовується широкий клас математичних виразів, які дозволяють

класифікувати, розмежовувати, розпізнавати шляхом аналізу структурної складності компонентів зображень згідно відповідних алгоритмів та функціоналів [261, 262].

Розрахунок структурної складності вузлів матричних моделей руху даних на основі характеристик емерджентності, запропонований Дж. Мартіном [3, 4, 214] згідно оцінки одиниці руху даних, відповідає відношенню числа зв'язків до числа компонентів системи та становить:

$$K_d = \frac{N_i}{N_0},$$

де  $N_i$  - кількість зв'язків,  $N_0$  - кількість компонентів.

У роботі [263] здійснено розширення символіки атрибутів мереж Петрі на основі МРД, де враховуються коефіцієнти руху даних, запропоновані Дж. Мартіном:

$$K_d = \frac{S}{G},$$

де  $S$  - число зчитувань або запитів,  $G$  - число записів або оновлень даних, та автором:

$$K_{ed} = \frac{S_i \cdot G_0}{S_0 \cdot G_i},$$

де  $S_i, S_0, G_i, G_0$  - відповідно фактичне число запитів, максимально можливе число запитів, фактичне число записів або оновлень, максимально можливе число записів або оновлень у вузлі матричної моделі.

Структурна складність топології мікроелектронного пристрою, запропонована В.С. Глуховим [62, 86, 264], оцінюється загальною довжиною горизонтальних  $g_i$  та вертикальних  $v_i$  з'єднань на умовній ПЛІС:

$$L = \sum_{i=0}^{m-1} (g_i + v_i) \approx (1/2 \dots 3/4)m^2, \text{ де } g_i = x_i + 1, v_j = m + d_i + 1$$

Недоліком розглянутих критеріїв є відсутність класифікації компонентів структур з врахуванням їх інформативності та вагових оцінок компонентів структурних одиниць.

Автором в роботах [162, 265-267] запропонована оцінка структурної складності схемотехнічних структур, графічних зображень та поліфункціональних даних:







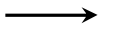
$$k_c = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i, \quad (2.1)$$

де  $P_i \in (l, P, x, d, r, h, z, b, c, i, n, a, f)$  - інформативні параметри атрибутів структур,  $\alpha_i$  - вагові коефіцієнти експертних оцінок структурної складності елементів та компонентів структуризованих даних.

Запропонований критерій, отриманий на основі експертних оцінок, належить до елементів побудови онтологічних моделей у системах інтелектуальної обробки даних в організаційно-технічних комплексах [268, 269].

У табл.2.1 приведена символіка атрибутів структурних компонентів МРД та експертні оцінки коефіцієнта складності  $\alpha_i$  та класифікованих інформативних параметрів  $l, P, x, d, r, h, z, b, c, i, n, a$  [162, 265-267].

Таблиця 2.1 - Експертні оцінки структурної складності елементів та атрибутів МРД

№ п/п	Тип позначення елемента	Зміст елемента	Символи	$\alpha_i$
1	$l$	лінія		1
2	$P$	поворот		2
3	$x$	пересічення		3
4	$d$	дотик		2
5	$r$	розгалуження		2
6	$h$	штрихування		2
7	$z$	направлений зв'язок		2
8	$b$	літера	Aa, Бб...	8
	$c$	цифра	1, 2, ... 0	4
	$i$	індекс	<sup>1, 2,</sup> ..., g, j, ...	4
	$n$	знак	<, >, .., ::, -, +, ....	2

В процесі застосування експертних оцінок коефіцієнтів оцінки структурної складності виявлені наступні функціональні обмеження:

- обмежена кількість елементарних структурних компонентів, які містять різні способи відображення;
- відсутнє розширення різних типів направлених зв'язків;
- не враховані різні способи заливки елементів структур та ін.

Тому автором [159] запропонована удосконалена систематизація елементів графічних зображень та їх експертних оцінок (табл.2.2), яка характеризується значним розширенням типів характеристик

Таблиця 2.2 - Розширена систематизація експертних оцінок структурної складності компонентів структур

№ п/п	Тип позначення елемента	Зміст елемента	Символи	$\alpha_i$	Символи	$\alpha_i$
1	<i>l</i>	Лінія		1		1,2
				1,5		1,2
				1,1		1,7
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		6,2
6	<i>h</i>	Заливка		2		2
7	<i>z</i>	Направлений зв'язок		2		2,5
				3		3,4
				2,4		3,5
8	<i>b</i>	Літера	Aa...Яя, ..., Aa...Яя, Aa...Яя.	8-10	Aa...Zz, ..., Aa...Zz Aa...Zz	8-10
	<i>c</i>	Цифра	1, 2,...0....	4	<b>1, 2,...0</b>	4
	<i>i</i>	Індекс	1, 2,...0, a, A	4	1, 2,...0, a, A	4
	<i>s</i>	Символ	©, ®, π, ψ, ω, &, %, @, §, Θ,	4	©, ☀, ♪, μ, \$, *, € Π, ♀, ♂,	4
	<i>n</i>	Знак	+, -, <, >, =, ±, ≡, ≈..	2	≠, ≤, ≥, (, “, {, !, ?...	2

На основі критерію (2.1) та даних табл.2.2 виконується оцінка структурної складності мікроелектронних компонентів процесорів (табл.2.3).

Таблиця 2.3 - Інформативні характеристики структурної складності логічних елементів комп'ютерної техніки

№ п/п	Назва функції, тип компонента	Умовне графічне позначення	Параметри критерію структ. складності <i>l, P, x, d, r, h, z, b, c, i, n</i>	Сумарна оцінка структурної складності
1	Заперечення		2,3,-,3,-,-,-,-,-,-,-	14,8
2	Диз'юнкція		1,2,-,3,-,-,-,-,-,-,-	11,6
3	Заперечення диз'юнкції		2,2,-,4,-,-,-,-,-,-,-	14,8
4	Кон'юнкція		1,2,-,3,-,-,-,-,-,-,-	11,2
5	Заперечення кон'юнкції		2,2,-,4,-,-,-,-,-,-,-	14,4
6	Еквівалентність		2,2,-,3,-,-,-,-,-,-,-	12,8
7	Заперечення еквівалентності		3,2,-,4,-,-,-,-,-,-,-	16
8	Імплікація		3,2,-,6,-,-,-,-,-,-,-	20
9	Заборона		3,2,-,6,-,-,-,-,-,-,-	19,6

Запропонований критерій оцінки структурної складності не враховує характеристики інформативності компонентів структури, тому автором [94, 162, 267] запропонований критерій ефективності структури ПФД шляхом розрахунку відношення між інформаційною та структурною складністю згідно виразу:

$$k_e = K \cdot \frac{F_C}{k_c} = K \cdot \frac{\sum_{j=1}^m f_j}{\sum_{i=1}^n \alpha_i P_i} \Rightarrow \max, \quad (2.2)$$

де  $K$  – ідентифікатор рівня ПФД ( $K = n, \dots$  – відповідно для  $n$ -рівневих структур);  $F_C$  - інформаційна складність пристрою;  $f_j$ - функціонально-інформаційна характеристика структури пристрою.

Таким чином максимальне зростання значення  $k_e$  є порівняльною характеристикою різних реалізацій структур пристрою та ПФД. Наприклад, при заданій структурній складності  $k_c$  здійснюється розширення функціональних можливостей структур або при заданих функціональних можливостях досягається зменшення структурної складності. При цьому можуть змінюватися цільові характеристики шляхом зменшення апаратної, часової або обчислювальної складності.

Функціонально-інформаційна характеристика структури пристрою може бути представлена наступними оцінками:

1. Повнота функціональності входу-виходів пристрою, яка визначається сумарною оцінкою  $f_j = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot f_{input} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot f_{output}$ , де  $f_j$  - функціонально-інформаційна характеристика структури пристрою,  $\beta, \lambda$  - коефіцієнти інформативності функцій входу-виходів,  $m, n$  - кількість входу-виходів,  $f_{input}, f_{output}$  - функції входу-виходів (наприклад: вхідний/вихідний канал, вхідна/вихідна  $x/y$   $n/m$  розрядні шини, вхід синхронізації, вибір кристалу  $c/s$ ,  $+/-$  живлення);

2. Ступінь відображення окремих функцій у формалізованих структурах похідних моделей МРД. Приклад розрахунку здійснюється згідно виразу

$$f_j = \sum_{i=1}^m f_i$$

і приведений у додатку Б1

На рис.2.1 показана діаграма функціонально-інформативних характеристик досліджуваної сукупності МРД, які відповідають сумі  $\sum_{j=1}^m f_j$  (1 – матрична модель, 2 – модифікована матрична модель, 3 – граф-розгалужене дерево, 4 – параметрично-часова модель, 5 – структурно-часова модель, 6 – модель "мережевий графік", 7 – суміщений часовий граф, 8 – блок-схема алгоритму, 9 – граф-алгоритмічна модель, 10 – сигнальна епюра руху даних, 11 – інтегрально-глобальна характеристика, 12 – ступінь використання ресурсів).

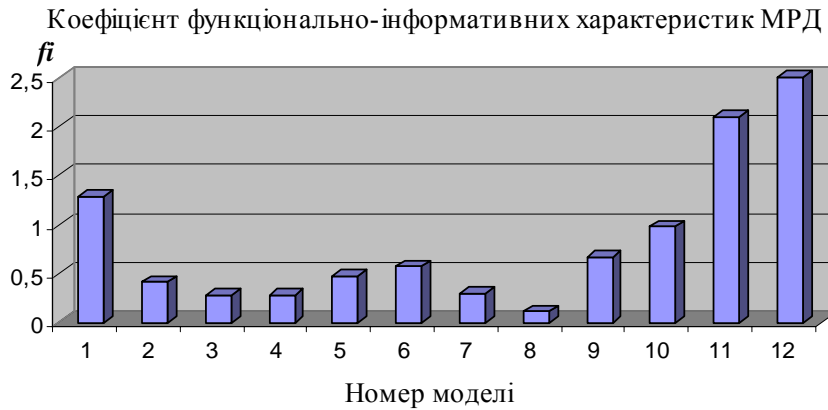


Рис.2.1 – Функціонально-інформативні характеристики МРД.

3. Оцінка структурної складності на основі ентропійних характеристик вхідних обчислювальних та вихідних інформаційних потоків.

При цьому оцінки ентропії розраховуються згідно кодової (Р.Хартлі), ймовірнісної (К.Шеннон) та кореляційної (Я.Николайчук) інформаційних мір ентропії [29, 50, 268, 269]:

- Р.Хартлі:  $H = n \cdot \hat{E}[\log_2 S] = n \cdot \log_2 S$ ;

- К.Шеннона:  $H = -k \sum_{j=0}^S p_j \log p_j$ ;

- Я.Николайчука:  $I_x = n \cdot \hat{E} \left[ \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \times \sum_{j=1}^m (D_x^2 - R_{xx}(j)) \right]$ ,

де  $H$  – об’єм інформації;  $S$  – число незалежних рівноймовірних станів джерела інформації (ДІ);  $n$  – число вибірок;  $\hat{E}[\bullet]$  – цілочисельна функція з округленням до більшого цілого;  $k$  – додатній коефіцієнт, який враховує основу логарифма;  $p_j$  – ймовірність  $s_j$ -го стану дискретного ДІ;  $S$  – число незалежних

станів ДІ;  $x_i^\circ = x_i - M_x$  – центровані значення масиву даних;  $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2$

– дисперсія  $x_i$ ;  $M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  – математичне сподівання;  $R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^\circ \cdot x_{i+j}^\circ$

– автокореляційна функція (АКФ);  $m$  – число точок функції  $R_{xx}(j)$  на інтервалі кореляції;  $j = 0, 1, \dots, m$

Таким чином оцінка функціонально-ентропійної складності має вигляд:

$$f_j = I_{input} + I_X + I_{output},$$

де  $I_{input}$ ,  $I_X$ ,  $I_{output}$  - кількісна оцінка ентропії відповідно на вході, під час перетворення та на виході структури.

На основі запропонованого критерію (2.1) розроблений метод оцінки структурної складності атрибутів матричних та граф-алгоритмічних моделей руху даних багаторівневих РКС, а також алфавітно-цифрових та функціональних символів, які відображаються на моніторах та твердих копіях фізичних даних.

Структурно-інформативні характеристики компонентів атрибутів МРД приведені в додатку Б2 [93, 95, 98].

## 2.2. Способи організації руху поліфункціональних даних у структурах РКС.

У теорії формування СД широко використовується цифрове опрацювання інформаційних потоків згідно статистичного, кореляційного, спектрального, логіко-статистичного, кластерного, ентропійного та інших системних підходів. В той же час, практично, відсутня узагальнена інтегрована теорія формалізації аналітично заданих та поліфункціональних даних, які формуються джерелами інформації. Дана проблема особливо актуальна при визначенні та застосуванні критерію структуризації різних класів даних, що формуються в реальному масштабі часу різними класами джерел інформації.

### 2.2.1. Систематизація структур та класів джерел інформації в РКС, які формують поліфункціональні дані.

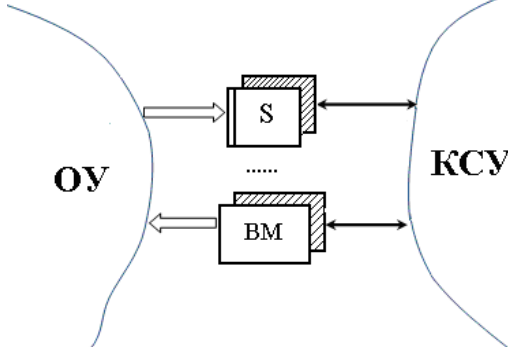
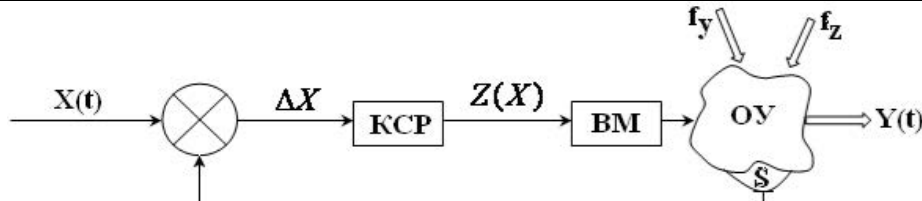
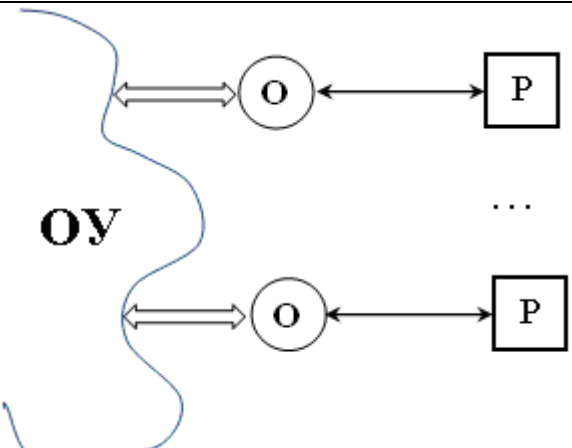
Систематизація структур та класів джерел інформації в РКС, які формують поліфункціональні дані приведена в табл.2.4.

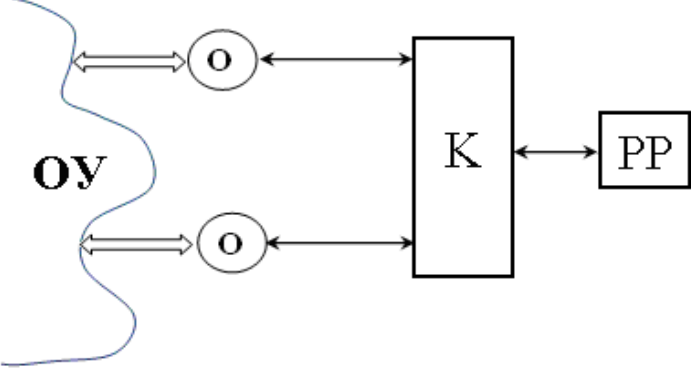
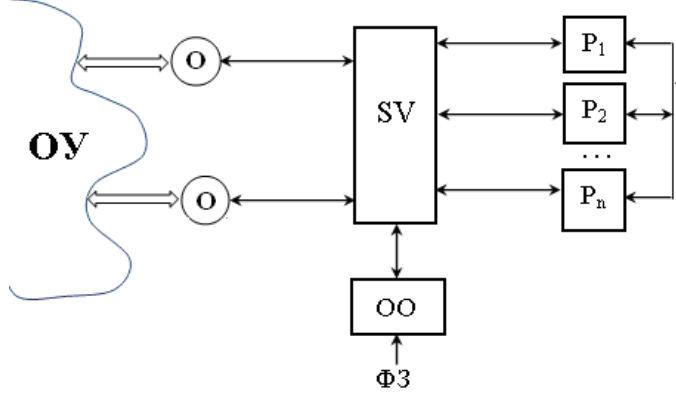
КСУ призначена для людинно-машинного управління промисловими технологічними об'єктами у реальному масштабі часу. В таких системах



автоматичне управління виконується спеціалізованими комп'ютерними засобами, а людина-оператор виконує функції моніторингу станів об'єкта управління (ОУ), їх ідентифікацію в стані норми, не норми та аварії.

Таблиця 2.4 – Структури джерел інформації в РКС

№ п.п.	Назва та $k_c$ структури	Структурне відображення системи
1	Структура комп'ютеризованої системи управління $k_c = 148,4$	 <p>ОУ – об'єкт управління, S, ВМ – інтелектуальні сенсори та виконавчі механізми, КСУ – комп'ютеризована система управління</p>
2	Структура системи автоматичного регулювання $k_c = 246$	 <p>⊗ – схема порівняння; КСР – контролер системи регулювання; ОУ – об'єкт управління; S – сенсор; <math>f_y</math> – вхідна функція; <math>f_z</math> – функція зовнішніх впливів; Y(t) – вихідна функція.</p>
3	Структура моноканальної системи моніторингу $k_c = 104$	 <p>О – оператор, P – процесор</p>

4	Структура КСУ розділеного часу $k_c = 119$	 <p>К – комутатор, PP – потужний процесор</p>
5	Структура мультипроцесорного опрацювання даних $k_c = 262$	 <p>ОО – оператори обчислювального центру; ФЗ – фонові задачі, які мають найнижчий рівень пріоритету</p>

Спеціалізовані комп'ютерні засоби таких систем мають структуру джерел формування даних, представлену у п.1 табл.2.4.

Такі джерела формують два двонаправлених потоки функціональних даних між парами: сенсори – КСУ, ВМ – КСУ.

При цьому ОУ, що є генераторами даних, класифікуються як прості (один технологічний параметр, один технологічний процес, один соціальний об'єкт), складні (одна технологічна установка, група операторів) та надскладні (цех, підприємство, організація).

У структурі системи автоматичного регулювання (п.2 табл.2.4.) розрізняються наступні класи даних:  $X(t)$  – параметр задання, уставка;  $\Delta X$  – різницева функція;  $Z(X)$  – функція управління.

В моноканальній структурі системи моніторингу оператори виконують функції моніторингу та керування параметрами ОУ (п.3 табл.2.4.). В даній структурі використовуються два типи двонаправлених потоків даних: ОУ-

оператор, оператор-процесор, процесор-оператор. При цьому інформаційний потік даних ОУ-оператор реалізується шляхом опрацювання оптичних зображень. Дана структура (п.3 табл.2.4.) характеризується максимальним паралелізмом руху даних, внаслідок цього має максимальну надійність та живучість. Крім того, кожен оператор володіє всіма ресурсами процесорів, включаючи повний об'єм пам'яті, швидкодію, операційне та прикладне програмне забезпечення, час.

Основними недоліками такої архітектури є відсутність інформаційних зв'язків між процесорами, висока собівартість опрацювання даних, недостатнє використання часового ресурсу процесорів, вплив професійного рівня операторів на ефективність організації потоків руху даних.

Архітектура розділеного часу характеризується наступними парами потоків даних (п.4 табл.2.4): оператор-комутатор (О-К), комутатор-потужний процесор (К-РР).

Така організація потоків даних не забезпечує високопаралельного режиму обміну, що обумовлено наявністю комутатора.

При цьому також виникають ефекти старіння інформації, а також висока ймовірність утворення черг. Позитивними характеристиками такої організації руху ПФД є зниження собівартості опрацювання даних за рахунок більш ефективного завантаження КС в часі та колективного користування програмним забезпеченням і масивами даних.

Основними недоліками даної організації руху ПФД є суттєве зниження надійності, яке обумовлене наявністю комутатора та одного колективного процесора, а також обмеження ресурсів часу для опрацювання даних кожного оператора.

Структура мультипроцесорного опрацювання даних (п.5 табл.2.4.) забезпечує суттєве підвищення надійності системи, можливості розпаралелення інформаційних потоків та суттєве зниження собівартості опрацювання даних за рахунок одночасного використання супервізора та групи процесорів різної потужності.

При цьому супервізор не тільки аналізує активність та характер задач, які виконуються операторами, але й розподіл потужностей процесорів та їх головних ресурсів. Незалежність від активності сенсорних даних забезпечується цілодобовим рішенням фонових задач, які завантажуються в супервізор операторами через комутатор. Позитивною характеристикою такої організації руху даних є наявність прямих інформаційних зв'язків між процесорами на основі високошвидкісної паралельної шини.

Описані системи формування та обміну ПФД класу належать до класу комп'ютеризованих систем управління.

Мережеві архітектури комп'ютеризованих систем управління (КСУ) організовуються на основі реалізації функцій формування, цифрового опрацювання, зберігання, управління об'єктами та передавання інформації мережевими станціями (СТ) з базовою архітектурою, яка показана на рис.2.2, де формуються наступні інформаційні потоки між парами об'єктів, які характеризуються різною структурною складністю, проблемною орієнтацією, об'ємом та швидкістю обміну даними: ОУ-О, О-АП, АП-Р, Р-ММ, ММ-КМ, S-КНМ, КНМ-ВМ, КНМ-Р, КНМ-КМ.

Компоненти мережевої станції виконують наступні функції: збір та аналіз технологічних та техніко-економічних даних в реальному масштабі часу виконують оператори (О), оснащені спеціалізованими абонентськими пунктами у вигляді промислових комп'ютерів, спеціалізованих пультів, табло, панелей перемикачів та ін.

Базовий процесор станції (Р) виконує функції оперативної архівації даних на заданому інтервалі часу, побудові інформаційних моделей ОУ згідно характеристичного функціоналу  $X_{OU}$ , контролю відхилень станів ОУ від норми та організації мережевого зв'язку через модем з іншими станціями та серверами КСУ.

На рис.2.2: ОУ - об'єкт управління; О – оператор; АП – абонентський пункт; Р – процесор; ММ – модем; КМ – комп'ютерна мережа; S – сенсор; КНМ – контролер низової мережі; ВМ – виконавчий механізм.

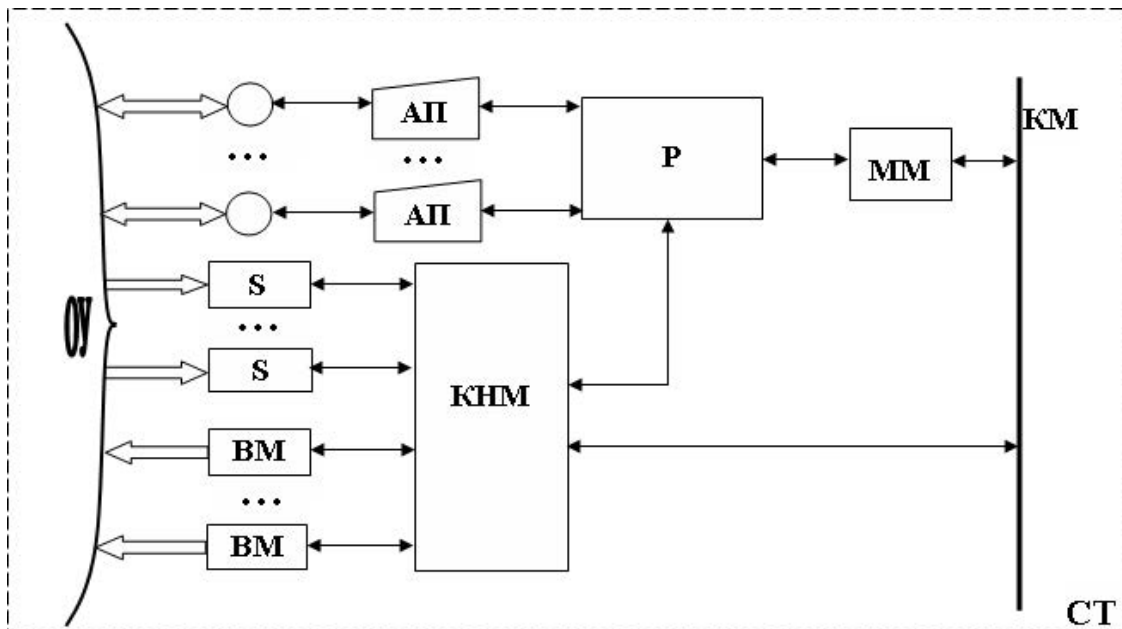


Рис.2.2 - Архітектура мережевої станції КСУ ( $k_c = 410,6$ ).

Результати опрацювання параметрів технологічного процесу у вигляді функціоналу структуризованих даних  $X_{OU}$ , який формується на виході процесора P у вигляді образно-кластерної моделі моніторингових станів ОУ, описує набір аналітичних функцій, згідно яких виконується опрацювання даних сенсорів, розрахунок функцій та математичних сподівань, кореляцій та ін., які використовуються для моніторингу стану ОУ та контролю його відхилень від норми.

Магістральна організація руху даних характеризується зниженням собівартості опрацювання розподілених даних за рахунок суттєвого зниження вартості магістрального фізичного каналу зв'язку на основі провідних ліній (витої пари та коаксіального кабеля) або волоконно-оптичних ліній.

Головними перевагами такої структури є можливість встановлення безпосередніх інформаційних зв'язків між станціями, а також колективне використання ресурсів сенсорних даних та сервера.

В той же час дана структура має ряд суттєвих недоліків, обумовлених можливістю колізій та конфліктів, які ліквідуються на основі спеціальних складних протоколів доступу, а також низьку надійність, обумовлену одним каналом зв'язку.

## 2.2.2. Структура та функції трьохрівневої мережевої КСУ.

Усі три класи системи управління синтезовані та структурно-об'єднані на виробництві у вигляді трьохрівневої мережевої КСУ (рис.2.3).

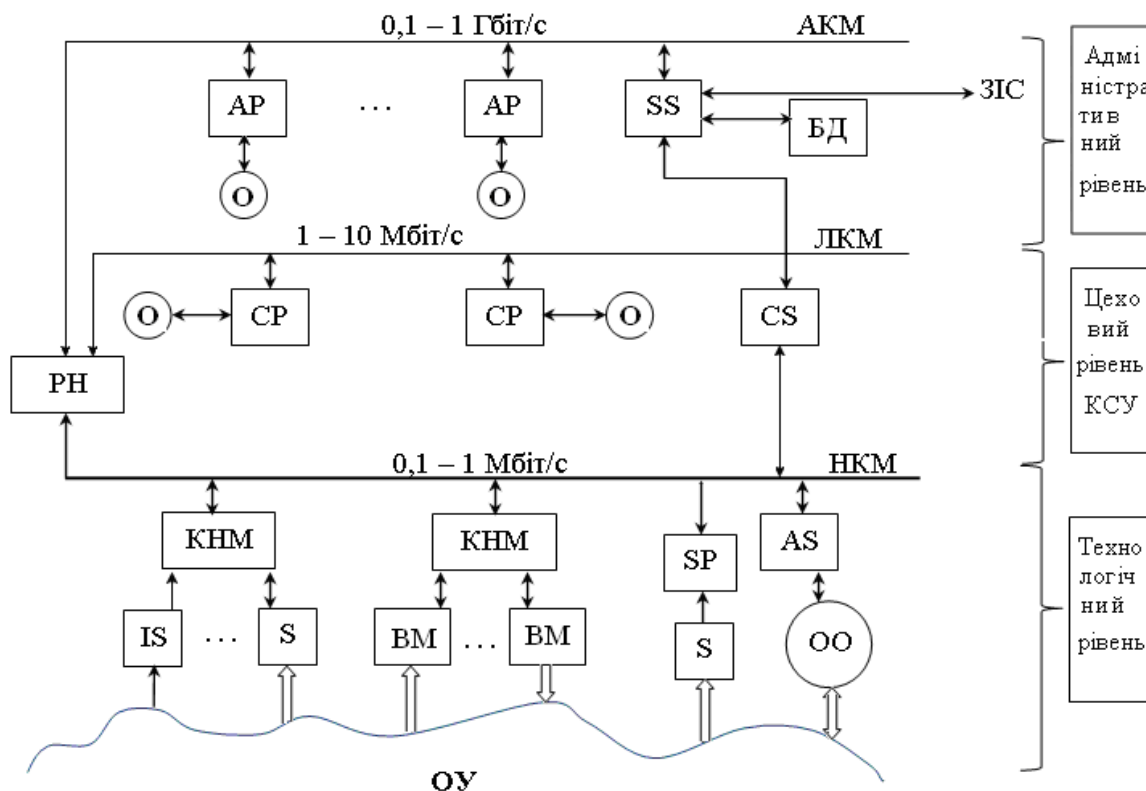


Рис.2.3 - Структура трьохрівневої мережевої КСУ ( $k_c = 871,2$ ).

Складові компоненти трьохрівневої КСУ:

ОУ – складний об'єкт управління, що представляє собою комплекс взаємопов'язаних інформаційно та матеріально технологічних установок по випуску конкретної продукції, який обслуговується інформаційною вимірювальною системою, системами автоматичного регулювання та операторами трьох рівнів (технологічного, цехового та адміністративного), які оснащені автономними процесорами програмного опрацювання даних;

S – сенсори виконують функції вимірювання фізичних значень технологічних параметрів та перетворення в стандартні електричні сигнали;

IS – інтелектуальний сенсор;

BM – виконавчі механізми – пристрої управління, оснащені інтерфейсними засобами дистанційного зв'язку, які виконують фізичне регулювання технологічними параметрами;

SP – спецпроцесори, які виконують функції побудови моделей ОУ на основі статистичного, кореляційного, спектрального, логіко-статистичного, кластерного та ентропійного опрацювання сигналів;

ОО – група операторів, які виконують функції моніторингу та управління об'єктом в ручному режимі;

AS – абонентська станція оператора, оснащена промисловим комп'ютером та модемом для телекомунікаційного зв'язку з низовою комп'ютерною мережею (НКМ);

КНМ – контролери низової мережі, які виконують функції аналого-цифрового перетворення сигналів сенсорів, цифрове опрацювання даних, їх кодування та забезпечення інтерфейсного зв'язку з верхніми рівнями системи;

РН – процесор-шлюз виконує функції комутації пакетів даних між різними рівнями мережі та узгодження швидкості їх передавання;

НКМ – низова комп'ютерна мережа виконує функції інтерфейсного зв'язку між різними КНМ та РН-процесором;

СР – цеховий процесор – персональні комп'ютери, якими оснащені оператори цехів, що виконують операції збору інформаційних даних та їх опрацювання згідно моделей ОУ;

О – оператори виконують функції моніторингу станів окремих технологічних установок або окремих груп параметрів (витрата електроенергії, газу, води...)

CS – комутаційний сервер призначений для організації черезрівневого інформаційного зв'язку між технологічним та адміністративним рівнями системи;

ЛКМ – локальна комп'ютерна мережа виконує функції інтерфейсного зв'язку між процесорам та операторами цехового рівня, має швидкодію на порядок вищу по відношенню до швидкодії НКМ;

АР – адміністративний процесор представляє собою ПК, яким оснащені оператори адміністративної системи (гол.інженер, гол.метролог, гол.енергетик, гол.технолог та оператори бухгалтерської підсистеми);

SS – системний сервер виконує функції організації інтерфейсних зв'язків всіх трьох рівнів, а також зв'язку з вищими рівнями управління;

БД – база даних;

АКМ – адміністративна комп'ютерна мережа, яка має високу швидкість і захищена від зовнішнього впливу;

ЗІС – зовнішнє інформаційне середовище (інтернет та інформаційне хмарне середовище);

ККМ – корпоративна комп'ютерна мережа.

У даній структурі джерелами інформації формуються наступні пари потоків даних:

сенсор-КНМ,	НКМ-РН,	Оператор-СР,
КНМ-виконавчий механізм,	РН-ЛКМ,	АР-ККМ,
ОУ-оператор,	ЛКМ-СП,	ККМ-SS,
КНМ-НКМ,	СР-ЛКМ,	SS-ККМ,
AS-НКМ,	СР-оператор,	SS-ЗІС.

Розробка та реалізація теорії структуризації даних, з врахуванням їх поліфункціональних характеристик та проблемної орієнтації, дозволяє оптимізувати процеси перетворень інформаційних потоків та спростити алгоритми обчислень та реалізацію програмно-апаратних засобів при організації руху інформаційних потоків в РКС. Практичне застосування даної теорії також дозволяє суттєво підвищити функціональні можливості оцінки впливу рівня структуризації даних на процеси збору, опрацювання, передавання, зберігання, відображення даних та керування складними об'єктами, що, в свою чергу, знижує вартість комп'ютерних систем, собівартість організації руху даних, підвищує рівень достовірності ідентифікації станів ОУ, а в загальному, підвищує рівень надійності та безпеки функціонування розподілених комп'ютерних систем [3, 9].

Оператор технологічної установки (О) виконує функції евристичної ідентифікації семантичних та екологічних станів ОУ, які інваріантні різним



технологічним та інформаційним станам ОУ, і не можуть бути однозначно визначені логічними аналізаторами  $S_i, X_j, I_k$  автономно.

Інформаційна система контролю та ідентифікації станів ОУ дає змогу зменшити надлишковість даних на етапі первинної обробки. Обсяг даних, що формується усіма сенсорами, на порядок перевищує обсяг вихідних даних промислового контролера, що через НКМ надходять до комп'ютера-сервера. Скорочення обсягів даних досягається за рахунок кодування стану ОУ та формалізованого параметра, що описує даний стан. Якщо об'єкт контролю має 15 сенсорів, кожний з яких формує 10-ти розрядне значення і може перебувати в одному з восьми станів, то застосування запропонованої системи дозволяє скоротити обсяг даних зі 150 біт до 13 біт, а в окремих випадках до 3 біт.

Інформаційна система контролю та ідентифікації станів ОУ повинна бути обладнана відповідними засобами автоматики і включати: сенсори ( $C_p$ ); логічні та евристичні аналізатори семантичних ( $S_i$ ), технологічних ( $X_j$ ) та інформаційних ( $I_k$ ) станів ОУ; промислові контролери (ПрК), низову комп'ютерну мережу (НКМ) та базовий комп'ютер-сервер диспетчерського центру (рис. 2.4).

Структура модуля оцінки стану об'єкту управління представлена рис.2.4 і характеризується показниками інформативності та структурної складності на основі даних табл. 2.1, 2.2 та додатків Б1, Б2 (табл.2.5) [97, 98, 159, 265-267].

Таблиця 2.5 - Експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів системи ідентифікації станів

Назва об'єкта	Інформаційна складність	Структурна складність	Кількість об'єктів
Сенсори (С)	100	27	n
Аналізатори логічних, евристичних та технологічних станів ( $S_i, X_j, I_k$ )	15	35	3
Промисловий контролер (ПрК, КНМ)	30	47	1
Низова комп'ютерна мережа (НКМ)	5	31	1
Процесор (Р)	40	21	1
Оператор (О)	15	13,2	1

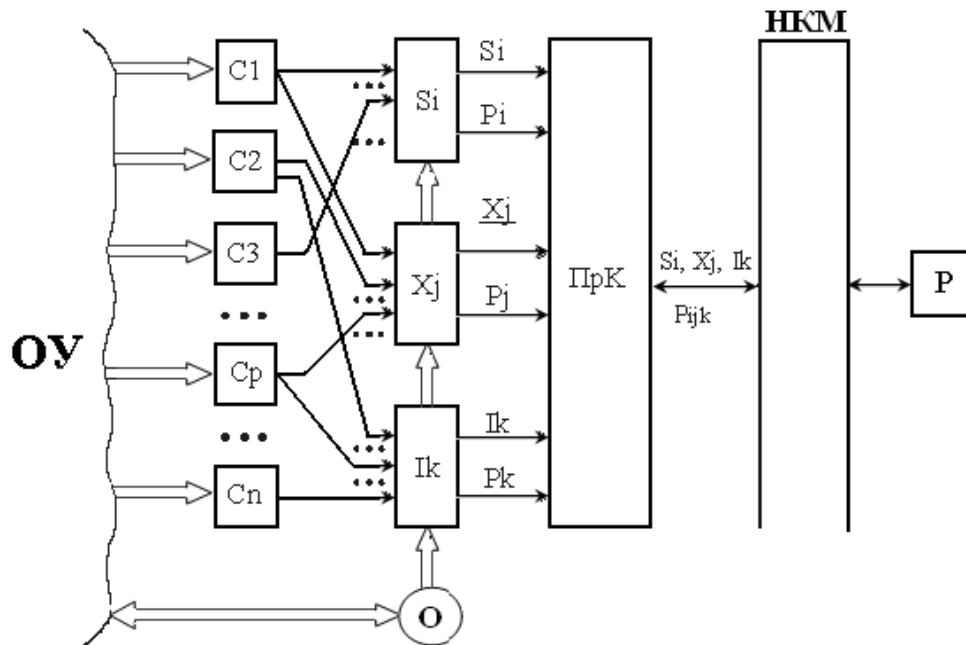


Рис. 2.4 - Архітектура системи ідентифікації семантичних, технологічних та інформаційних станів ОУ: О – оператор технологічної установки;  $P_i, P_j, P_k$ , – формалізовані параметри семантичних, технологічних та інформаційних станів ОУ;  $P_{ijk}$  – характеристичний параметр технологічного стану ОУ.

Відповідно до даних таблиці 2.5 та згідно критерію (2.2), оцінка інформативності архітектури системи ідентифікації станів становить  $F_C = 100n + 135$  одиниць, структурної складності -  $k_c = 27n + 217,2$  одиниць, а ефективність структури -  $k_e = \frac{100n + 135}{27n + 217}$  одиниць.

Одержана інформація про ОУ та про сигнали, що його описують, подається у формах:

- доступних безпосередньо вимірюванню входів, виходів, змінних стану;
- моделей ОУ, ДІ або сигналів;
- оцінок сигналів та станів.

Властивості кожного з вищезгаданих класів ОУ можуть бути описані у вигляді сигнальної, статистичної та ентропійної моделей.




Інформація про ОУ надається у НКМ у цифровому вигляді. Тому у названих моделях доцільно дослідити системні властивості різних класів

дискретних ОУ, відповідно властивості аналогових ОУ можуть бути описані в класі дискретних ОУ з певною заданою точністю.

Визначення інформаційних станів ОУ ґрунтується на теорії і технології кодування дискретних ОУ. При цьому найбільш актуальним завданням є кодування квазістаціонарних ОУ, до яких відносять широкий клас промислових об'єктів.

Виконана систематизація та дослідження архітектур в попередньому розділі дозволила встановити пари активних вузлів у структурі РКС, де реалізується формування та обмін різними типами функціонально-орієнтованих даних. Класифікація таких типів даних приведена в табл.2.6.

Таблиця 2.6 - Типи пар компонентів РКС, між якими виконується обмін даними

№ п.п	Пов'язані компоненти	Тип даних	Біт-орієнтовані дані	Байт-орієнтовані дані	Структура організації руху даних на рис.
1	S - КСУ	Інформаційно-вимірjувальні дані (ІВД)	+	+	п.1 табл.2.4
2	КСУ ↔ ВМ	Цифрові потоки даних (ЦПД)	+	+	п.1 табл.2.4
3	X(t) - 	ІВД		+	п.2 табл.2.4
4	 - КСР	ІВД		+	п.2 табл.2.4
5	КСР - ВМ	ІВД		+	п.2 табл.2.4
6	S - 	ІВД		+	п.2 табл.2.4
7	O ↔ P	ЦПД		+	п.2 табл.2.4
8	O ↔ AP	ЦПД		+	2.3
9	AP ↔ АКМ	Мережно-структуризовані дані (МСД)	+		2.3
10	SS → БД	ЦПД		+	2.3
11	SS ↔ АКМ	МСД	+		2.3
12	SS ↔ ЗІС	МСД	+		2.3
13	O ↔ СР	ЦПД		+	2.3
14	SS ↔ CS	МСД	+		2.3
15	АКМ ↔ РН	МСД	+		2.3
16	ЛКМ ↔ РН	МСД	+		2.3
17	СР ↔ ЛКМ	МСД	+		2.3
18	СР ↔ РН	ЦПД	+		2.3

19	PH ↔ НКМ	МСД	+		2.3
20	CS ↔ НКМ	МСД	+		2.3
21	КНМ ↔ НКМ	МСД	+		2.3
22	SP ↔ НКМ	МСД	+		2.3
23	AS ↔ НКМ	МСД	+		2.3
24	S → КНМ	ІВМ	+	+	2.3
25	IS ↔ КНМ	ІВМ, ЦПД	+	+	2.3
26	BM ↔ КНМ	ЦПД	+	+	2.3
27	S → SP	ІВМ	+	+	2.3
28	OO ↔ AS	ЦПД		+	2.3

В даний час існує велика кількість тиражованих РКС, які реалізують досліджені архітектури та їх компоненти та випускаються відомими зарубіжними та українськими виробниками.

Проведені дослідження дозволяють встановити наступні типи поліфункціональних даних, які використовуються при обміні інформаційними потоками між компонентами РКС: інформаційно-вимірювальні аналого-сигнальні та цифрові біт та байт орієнтовані дані (ІВМ), цифрові байт орієнтовані потоки даних (ЦПД), мережно-інтерфейсні сигнально-маніпульовані біт орієнтовані дані (МІД, СМД), які передаються по фізичних, безпроводних та оптичних лініях зв'язку електричними, електромагнітними та оптичними сигналами.

Приведені класифіковані типи ПФД, які застосовуються при обміні інформаційними потоками між різними компонентами у структурі РКС, є складовою предмету теоретичних та прикладних досліджень даної дисертаційної роботи.

### 2.3. Системні характеристики джерел інформації у структурах РКС.

В залежності від системних характеристик ОУ виконується проблемно-орієнтована реалізація САУ.

Загальні характеристики ОУ описуються атрибутами  $F(\cdot)$  функціоналу  $X_{OU}$ :

$$X_{OY} = F(\{x_i\}, \{x_j\}, S_{oy}, M_x, M_j, M_v, D_x, \delta_x, R_{xx}, R_{xy}, S_w, L_i, \rho_{ij}, S_{ij}, P_{ij}, I_x), (2.3)$$

де:  $\{x_i\}, \{x_j\}$  - масиви оцифрованих моніторингових даних параметрів ОУ;

$S_{oy}$  - відповідно семантичний, інформаційний та технологічний стани ОУ;

$M_x, M_j, M_v$  - відповідно вибіркове, ковзне та вагове математичні сподівання;

$D_x, \delta_x$  - відповідно дисперсія та середньоквадратичне відхилення;

$R_{xx}, R_{xy}$  - автокореляційна та взаємкореляційні функції;

$S_w$  - спектри параметрів ОУ у різних теоретико-числових базисах;

$L_i$  - логіко-статистичні інформаційні моделі (ЛСІМ),  $i \in \overline{1, 5}$ ;

$\rho_{ij}, S_{ij}, P_{ij}$  - відповідно матриці коефіцієнтів взаємкореляції, кластерної моделі ймовірнісних переходів та ентропійних станів;

$I_x$  - кореляційна міра ентропії стану ОУ.

В залежності від поведінки ОУ у часі, існують наступні класи ОУ: стаціонарні, квазістаціонарні, нестаціонарні. Приклади поведінки ОУ різних класів стаціонарності описані в додатку В1

2.4. Теоретичні основи структуризації даних у кодових системах різних теоретико-числових базисів (ТЧБ).

Швидкий розвиток сучасних інформаційних технологій, комп'ютерних мереж та комп'ютеризованих систем викреслює дослідження проблеми структуризації в даній галузі найперспективнішою задачею, оскільки практично всі напрямки розвитку сучасної цивілізації тісно пов'язані з інформатизацією суспільства та відповідною структуризацією інформаційних потоків [150, 255].

Щоб краще зрозуміти роль інформації та ефективно використовувати її у процесі функціонування систем, необхідно знати її структуризацію. Важливою проблемою теорії складних систем є декомпозиція їх компонентів, систематизація інформаційних, матеріальних та керуючих інтерактивних зв'язків [141]. Найвищим рівнем структуризації інформації є виділення її як

системи для конкретного об'єкта і відповідних підсистем. Проте, будь-яку систему можна піддати декомпозиції до виявлення неподільних одиниць.

Структуризація даних стосується методів алгоритмів та архітектурних рішень при виконанні вимірювань, формуванні кодів даних у різних кодових системах, системах числення та спеціалізованих перетворень над інформаційними потоками. Структуризація може виконуватися шляхом кодування структурних конгломератів даних у різних ТЧБ: Фур'є, Унітарному, Хаара, Радемахера, Крестенсона, Уолша та Галуа. Можливість структуризації інформації і переходу від одних структур до інших (частіше від традиційних безмашинних до машинних і навпаки) забезпечує основу для ефективного аналізу, оцінювання та опрацювання інформації, її перегрупування. При цьому вдається уникнути дублювання й надлишковості.

Аналіз кодових систем Фур'є, унітарної, Хаара, Радемахера, Крестенсона, Галуа та їх перетворень відображено у додатку Г.

Аналіз світового досвіду структуризації даних та створення процесорів для комп'ютерних систем з застосуванням теоретико-числового базису (ТЧБ) Радемахера, який породжує двійкову систему числення, демонструє тенденцію все ширшого застосування інших ТЧБ, в тому числі: унітарного, Хаара, Крестенсона та Галуа. Реалізація спеціалізованих, сигнальних, комутаційних та проблемно-орієнтованих процесорів цифрової обробки даних часто виконується на базі сумісного використання комбінацій названих ТЧБ, наприклад Радемахера-Хаара, Крестенсона-Галуа та ін.

Перспективним напрямком розвитку теорії та технологій побудови спеціалізованих програмно-апаратних комп'ютерних засобів на основі різних методів структуризації даних є реалізація супершвидкодійних мультибазисних RCG-процесорів на основі базисів Радемахера, Крестенсона і Галуа. Відомі успішні спроби розвитку теорії та техніки побудови матричних процесорів на основі двовимірних базисів Радемахера та Галуа, а також конвеєрних спецпроцесорів у базисі Галуа.

У зв'язку з цим існує проблема глибокого дослідження теорії, методів структуризації та характеристик кодових систем "нерадемахерівських" ТЧБ та

граничних можливостей їх застосування для реалізації компонентів як спеціалізованих, так і універсальних процесорів. При цьому перспективним, крім найбільш сьогодні масового одновимірного (векторного) представлення чисел та виконання арифметико-логічних операцій у базисі Радемахера, є застосування двовимірних систем числення, вертикальної інформаційної технології у базисі Галуа та різних форм багатовимірного представлення чисел у вигляді залишків різних форм системи залишкових класів базису Крестенсона.

Теоретичні засади ортогональних функцій є основою різних ТЧБ та кодових систем, деякі з них породжують системи числення. Це базиси Галуа, Радемахера, Крестенсона, Унітарний [68, 270].

Принциповим недоліком кодування даних в базисі Радемахера є значна надлишковість кодів та незахищеність даних від помилок, що потребує виконання додаткових процедур захисту [18].

У порівнянні з двійковим кодуванням, застосування кодових систем Галуа забезпечує можливість вибору одного з кодових упорядкувань, згідно обраного вектора зворотних зв'язків та порядку векторного набору, що дозволяє обмежити несанкціонований доступ до повідомлень на рівні формування інформаційних потоків, а також зменшити інтенсивність інформаційного обміну в мережі внаслідок зменшення кількості необхідних бітів для кодування повідомлень у порівнянні з відомими методами кодування [271]. Кодові системи Галуа дозволяють ефективно кодувати інформацію, вирішуючи ряд проблем, які виникають в типових системах [272], що визначило актуальність досліджень в напрямку використання рекурсивних методів кодування. Клас надлишкових завододозахисних кодів (Галуа, деревовидних та арифметичних) породжується похідними вибірковими комбінованими базисами функцій і сьогодні набув широкого застосування при завододозахищеному інформаційному обміні.

Дослідження характеристик способів структуризованого кодування станів джерел інформації приведено в додатку В2 [273].

2.5. Методи кореляційного опрацювання структуризованих даних та логіко-статистичні інформаційні моделі.

Концептуальним аспектом інтегрованої теорії формування СД та їх моделей є сукупність інформаційних технологій на основі різних кореляційних функцій (додаток Д1) [274, 275].

На основі аналізу аналітики та асимптотики кореляційних функцій з використанням критерію СС (2.1) розраховані кількісні оцінки структурної складності кореляційних функцій, які приведені на діаграмі (рис.2.5) згідно алфавітного ідентифікатора, аналітики та графічної асимптотики. На рис.2.5 використана наступна нумерація кореляційних функцій: 1 - знакова, 2 - релейна, 3 - коваріаційна, 4 - кореляційна, 5 - нормована кореляційна, 6 - структурна, 7 - модульна, 8 – еквівалентності.

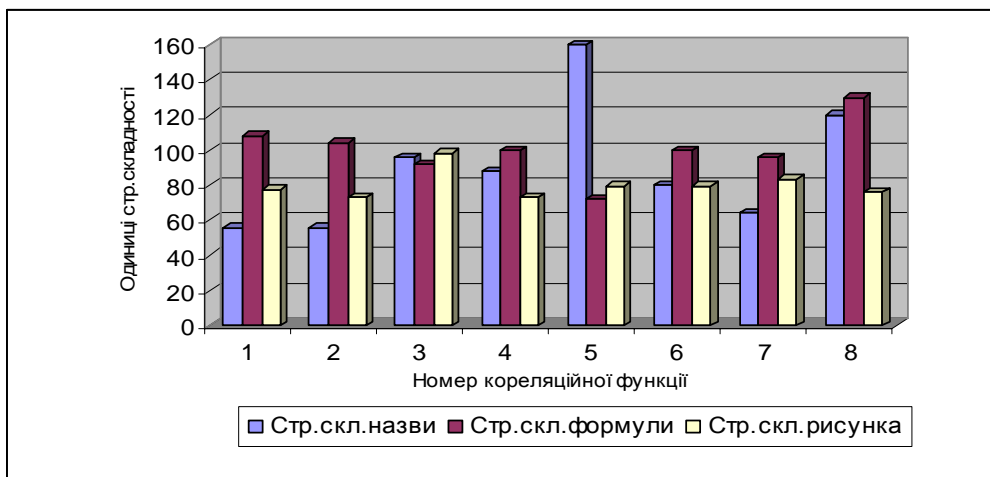


Рис.2.5 - Діаграма структурної складності кореляційних функцій.

З діаграми видно, що кількісна оцінка структурної складності асимптотики автокореляційних функцій є меншою у порівнянні з оцінкою СС їх математичної аналітики.

Система логіко-статистичних інформаційних моделей (ЛСІМ) у структурі функціоналу (2.3) дозволяє охопити широкий клас задач дослідження сигналів, що формуються ОУ, первинної обробки повідомлень в реальному часі, контролю відхилень та ідентифікації станів ОУ [68, 73, 74, 79].

Аналітики ЛСІМ приведені у додатку Д2 [286].



## 2.6. Методи ентропійного опрацювання структуризованих даних.

Одним з перспективних напрямків розвитку та вдосконалення теорії інформації та інформаційних процесів в науці, суспільстві та промисловості є структуризація даних, що дозволяє наблизитись до власної ентропії джерел інформації на основі ентропійних методів формування, передавання та опрацювання інформаційних потоків у комп'ютерних системах та мережах. Тому концепція структуризації даних на основі ентропійного підходу має виключно важливе значення для оцінки ефективності та результативності застосування проблемно-орієнтованих структуризованих даних.

Актуальною концептуальною проблемою є створення теоретичних основ декомпозиції системних характеристик ПФД та ПОД на основі інформаційного та ентропійного підходів. Актуальними науковими задачами також є побудова принципів та алгоритмів розрахунку рівня структуризації даних на основі критеріїв та коефіцієнтів структурної складності бінарних, напівтонових та кольорових масивів даних та зображень.

Вирішення окресленої проблеми дозволяє з єдиних позицій охопити та формалізувати характеристики СД, що відкриває шлях до успішного вирішення прикладних задач порівняння, розпізнавання, перетворення, ефективного кодування та використання ПФД та ПОД у сучасних складних розподілених неінтерактивних та інтерактивних комп'ютерних та комп'ютеризованих системах (КС).

Фундаментальні дослідження у середовищі теорії структуризації даних (ТСД) та їх ентропійного аналізу представлені у роботах відомих зарубіжних [276-278] та вітчизняних вчених [29, 62, 279-282]. Вагомий вклад у ТСД внесено проф. Николайчуком Я.М. [50, 270] та на основі матричних моделей руху даних автором [95, 96].

У той же час практично відсутні наукові роботи, які розвиток теорії структуризації даних пов'язують з ентропійними підходами розв'язання прикладних задач у галузях вимірювання та метрології, кодування, захисту від помилок та передавання даних, розпізнавання образів, побудови проблемно-

орієнтованих та спеціалізованих процесорів, а також спецпроцесорів з нейрокомпонентами.

Тому розробка теоретичних засад оцінки ентропії ПФД та ПОД на базі цифрового опрацювання 1D, 2D та 3D масивів даних є актуальною прикладною задачею, яка дозволить суттєво розширити та удосконалити інформаційні технології та алгоритми порівняння, розпізнавання, кодування та перетворення даних на основі розширення математики теоретичних основ ТСД.

Систематизація аналітики відомих оцінок ентропії з певною повнотою викладена в роботах [53, 96, 282], де класифікуються наступні оцінки міри ентропії (табл.2.7) [284].

Таблиця 2.7 - Аналітика оцінок ентропії

№	Міра ентропії	Аналітичний вираз	Пояснення складових
1.	Р. Хартлі	$H = \log_2 S^n = n \cdot \log_2 S$ $H = n \cdot \hat{E}[\log_2 S] = n \cdot \log_2 S$	$H$ – кількість інформації; $S$ – число незалежних рівномірних станів джерела інформації (ДІ); $n$ - число вибірок; $\hat{E}[\bullet]$ – цілочисельна функція з округленням до більшого цілого.
2.	К. Крампа	$I_x = \log_2 \sqrt{2\pi e \sigma_x^2}$ $I_x = \hat{E}[\log_2 3\sigma_x]$	$e - const = 2,73$ ; $\sigma_x$ - середньоквадратичне відхилення
3.	Н. Колмогорова	$H_\varepsilon \leq \frac{T}{\Delta t} + \log \frac{C}{\varepsilon}$ <p>при</p> $\varphi(t) = 2^{\frac{T}{\Delta t} H_\varepsilon} \leq \log \left( \frac{C}{\varepsilon} \cdot 2^{\frac{T}{\Delta t}} \right)$	$\Delta t$ – крок дискретизації, що забезпечує точність квантування $\varepsilon$ , $C$ – діапазон квантування; $T$ – інтервал часу спостереження ДІ
4.	К. Шеннона	$H = -k \sum_{j=0}^S p_j \log p_j$	$k$ – додатній коефіцієнт, який враховує основу логарифма; $p_j$ – ймовірність $S_j$ -го стану дискретного ДІ; $S$ – число незалежних станів ДІ
5.	Дж. Лонго	$I(u, p) = -k u \cdot \log p$ $H(u, p) = -k \sum_{i=1}^n [u_i p_i \cdot \log p_i]$	$u_i \geq 0$ - коефіцієнт корисності; $k$ – стала величина; $p = p_i$ – ймовірність $S_j$ -го стану.

Продовження таблиці 2.7

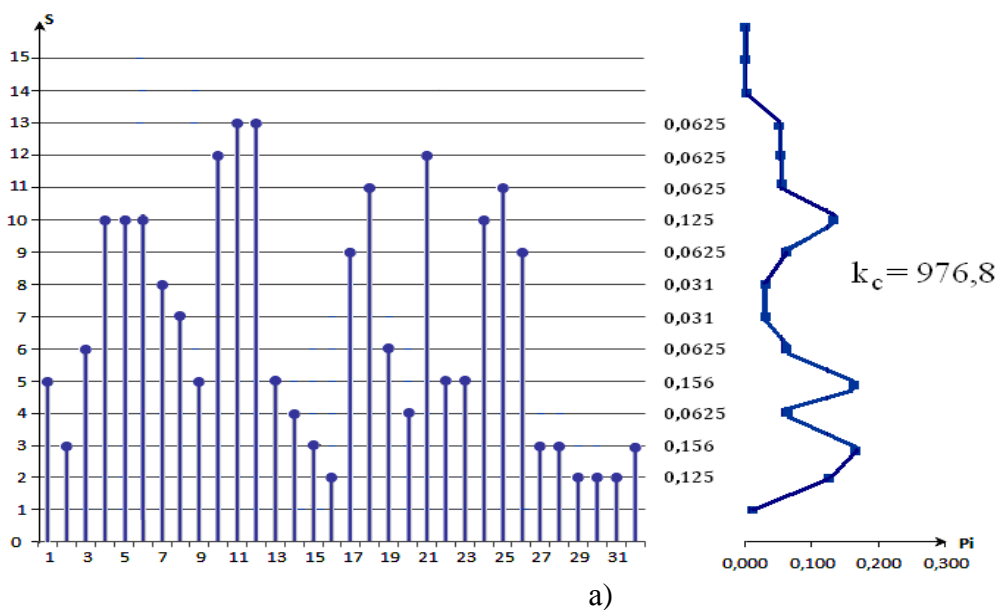
6.	Г.Шульца	$H(p, w) = - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{p_i w_i}{\sum_{j=1}^n p_j w_j} \cdot \log \frac{p_i w_i}{\sum_{j=1}^n p_j w_j} \right]$	$p_i$ - імовірність $s_j$ -го стану; $w_j$ - нормуюча функція
7.	Б.Олівера	$H = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log N}{n}$	$N = n! / \prod_j S_j$ або $\log N = \log n! - \sum_j S_j$
8.	Д.Мідлтона	$H(X) = - \sum_{l_1}^L \dots \sum_{l_n}^L p(X) \log p(X)$	$X$ - апіорна невизначеність; $X_i, y_i$ - статистично залежні стани ДІ.
9.	В.Таллера	$H \leq k 2BT \left( 1 + \frac{S}{N} \right),$ $H = k \cdot n \log S_{ave}$	$S_{ave}$ - середнє значення станів ДІ; $BT$ - інформаційна база; $N$ - значення рівня шуму $1/S$ - інтервал кореляції між відліками
10.	В. Боюна	$h_\delta = \frac{ f'_{\tilde{n}\tilde{a}\tilde{\delta}}(t) }{ f'_{\max}(t) }$	$f'_{\tilde{n}\tilde{a}\tilde{\delta}}(t), f'_{\max}(t)$ - відповідно середнє і максимальнє значення похідних зміни кількості станів джерела
11.	Я. Николайчука	$I_x = n \cdot \hat{E} \left[ \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \times \sum_{j=1}^m (D_x^2 - R_{xx}(j)) \right]$	$x_i = x_i - M_x$ - центровані значення масиву даних; $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2$ - дисперсія $x_i$ ; $M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ - матем. сподівання; $R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j}$ - автокореляційна функція (АКФ); $m$ - число точок функції $R_{xx}(j)$ на інтервалі кореляції; $j = 0, 1, \dots, m$

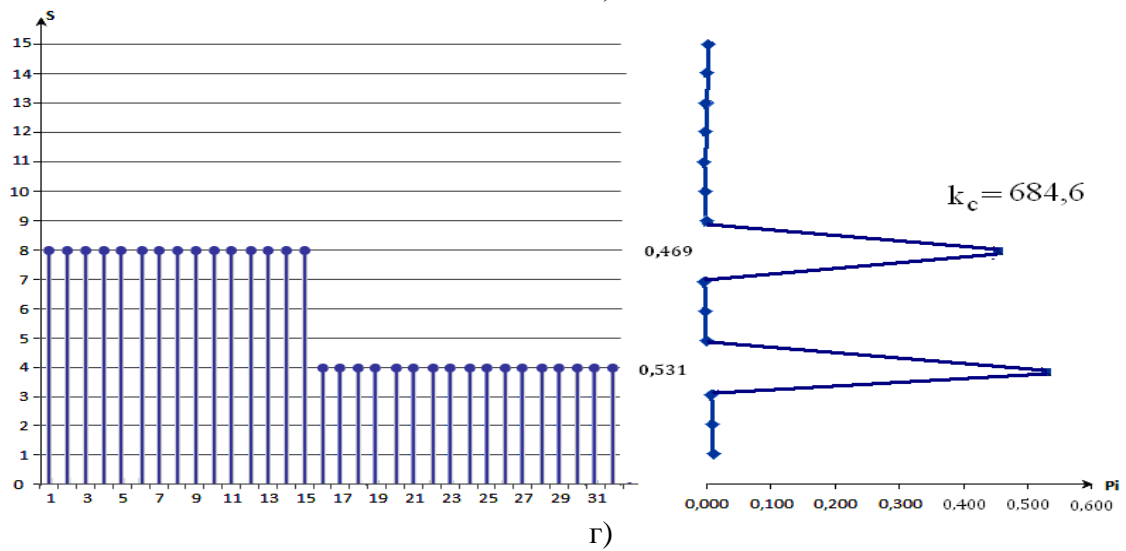
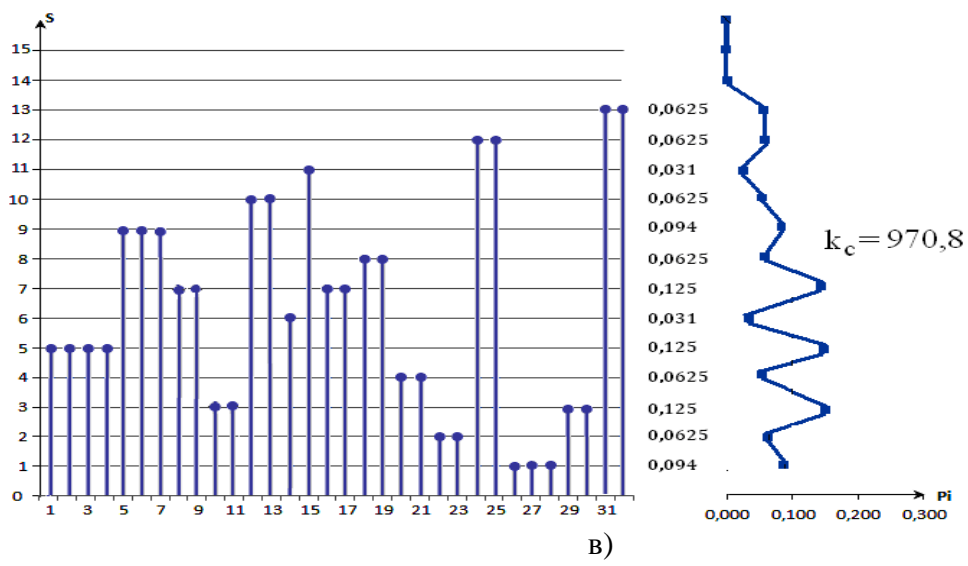
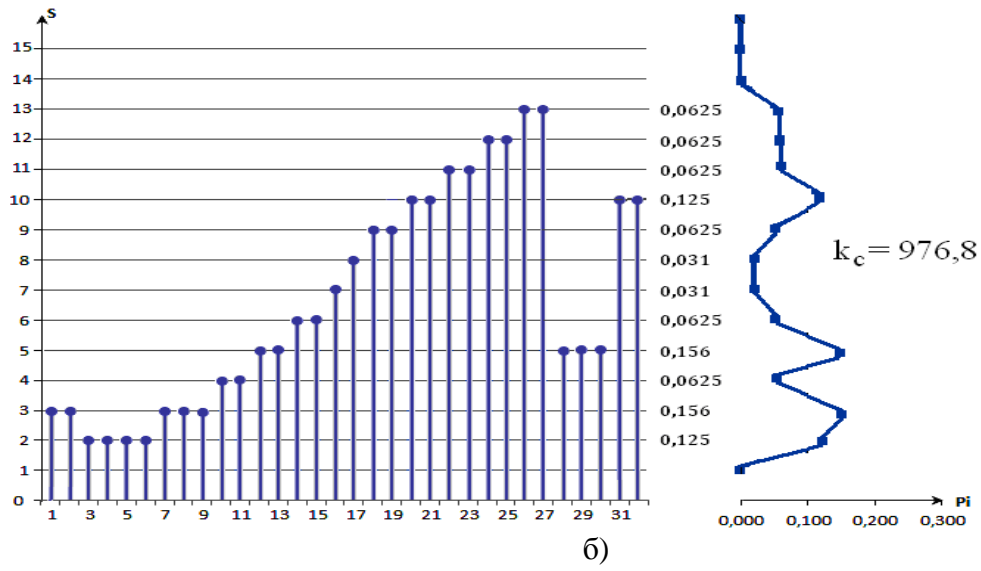
У роботах [284, 285] приведена формула ентропії за оцінкою Р. Хартлі (табл.2.7, №1), яка є верхньою оцінкою і не враховує статистичні та динамічні характеристики ПФД та ПОД. Тому розрахунок критерію структурної складності згідно оцінки ентропії Р. Хартлі є недостатньо інформативним і не може бути використаним в якості критерію розрахунку структурної складності бінарних зображень.

Розрахунок ентропії за найбільш широкоживаною оцінкою К. Шеннона (табл.2.7, №4) враховує тільки ймовірнісні характеристики даних і при зміні дисперсії вхідних даних може бути застосована до оцінки рівня структуризації даних. У випадку, коли всі стани рівноймовірні, інформаційна міра К. Шеннона співпадає з оцінкою Р. Хартлі. Відсутність врахування ймовірностей переходу джерел інформації з одного стану в інші [50] в розрахунку ентропії за оцінкою К. Шеннона суттєво обмежує можливості використання її аналітики в якості критерію розрахунку та ідентифікації структурної складності ПФД.

Визначення ентропії за оцінкою Я. Николайчука (табл.2.7, №11), яка враховує марківські, кореляційні та спектральні характеристики даних, є позитивним компонентом у синтезі та формалізації розширеного критерію структуризації даних на основі ентропії та структурних характеристик 1D, 2D та 3D інформаційних масивів.

На рис.2.6 показані приклади СД у вигляді решітчастих моделей послідовностей цифрових відліків з однаковими ймовірнісними характеристиками, але різними реалізаціями хешування, звідки видно, що визначення ентропії за оцінкою Р. Хартлі та К. Шеннона не реагує на зміну структурних характеристик даної моделі ПОД [284].





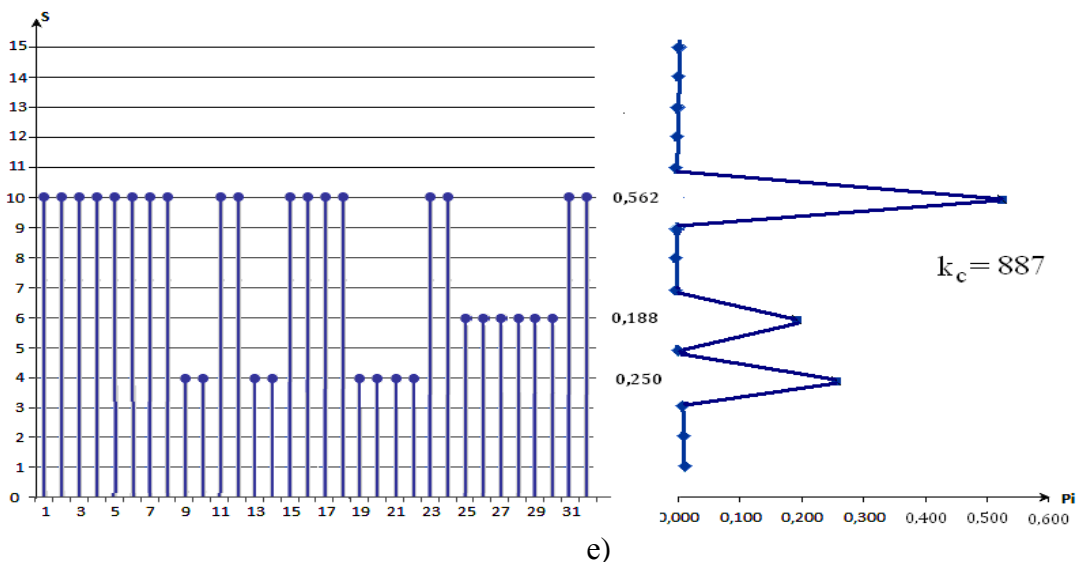
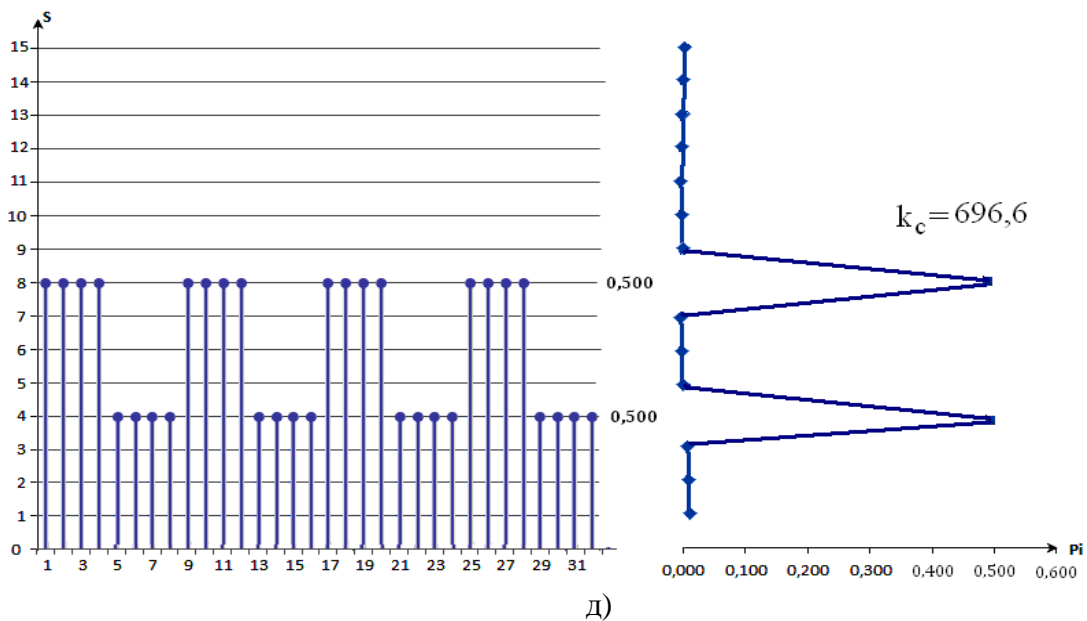


Рис.2.6 - Оцінка ентропії по К.Шеннону інформаційних джерел з однаковими ймовірностями.

Розрахунок ентропії інформаційних джерел, представлених на рис.2.25 виконується згідно виразів оцінки ентропії, представлених в табл.2.7: 1 – Р. Хартлі, 4 – К. Шеннона та 11 – Я. Николайчука, на основі яких побудовані діаграми, представлені на рис.2.7.

На основі аналітичного виразу розрахунку ентропії згідно оцінки Р. Хартлі  $H = n \cdot \log_2 S$ , (де, згідно рис.2.6 (а,б,в),  $n = 32$ ,  $S = 16$ ) тобто  $I_H = 32 \cdot \log_2 16 = 32 \cdot 4 = 128$ . Отже оцінка ентропії Р. Хартлі незалежно від статистичних характеристик джерела інформації, представлених на рис.2.25 (а,б,в), є однаковою [284].

Розрахунок ентропії цифрових відліків ДІ згідно формули К. Шеннона

$$H = -k \sum_{j=0}^{S-1} p_j \log p_j \quad \text{при } k=1 \text{ для даного прикладу виконується наступним}$$

чином  $I_{Sh} = n \cdot (-k \sum_{j=0}^{S-1} p_j \log_2 p_j)$ , де  $p_j = \frac{n_j}{n}$ , а  $n_j$  - число  $j$ -тих станів ДІ на інтервалі вибірки  $n$ .

$$I_{Sh} = n \cdot (-k \sum_{j=0}^{S-1} \frac{n_j}{S} \log_2 \frac{n_j}{S}) \text{ або}$$

$$\begin{aligned} I_{Sh} &= n \cdot (-k \sum_{j=0}^{S-1} \frac{n_j}{n} (\log_2 n_j - \log_2 n)) = n \cdot k \sum_{j=0}^{S-1} \frac{n_j}{n} \cdot (\log_2 S - \log_2 n_j) = \\ &= n \cdot n \sum_{j=0}^{S-1} \frac{n_j}{n} \cdot (\log_2 S - \log_2 n_j) = \sum_{j=0}^{S-1} n_j \cdot (\log_2 n - \log_2 n_j). \end{aligned}$$

Тобто, в даному прикладі (рис.2.6 (а,б,в)) при об'ємі вибірки  $n$  оцінка ентропії за формулою К.Шеннона наступна:

$$\begin{aligned} I_{Sh} &= n \cdot (-k \sum_{j=0}^{S-1} \frac{n_j}{S} (\log_2 n_j - \log_2 S)) = \sum_{j=0}^{S-1} n_j \cdot (\log_2 n - \log_2 n_j) = \\ &= (10 \cdot 2 \cdot (5-1) + 2 \cdot 3 \cdot (5-1,7) + 1 \cdot 4 \cdot (5-2)) = 111,8. \end{aligned}$$

На основі приведених аналітичних виразів розрахунок ентропії за формулами Р.Хартлі, К.Шеннона, Я.Николайчука виконується на основі масивів даних прикладів ДІ (табл.2.8), представлених на рис.2.6.

Таблиця 2.8 - Масиви даних прикладів джерел інформації, представлених на рис.2.6

Об'єм вибірки	Масив даних джерела інформації (рис.2.6.)					
	а	б	в	г	д	е
1	5	3	5	8	8	10
2	3	3	5	8	8	10
3	6	2	5	8	8	10
4	10	2	5	8	8	10
5	10	2	9	8	4	10
6	10	2	9	8	4	10
7	8	3	9	8	4	10
8	7	3	7	8	4	10
9	5	3	7	8	8	4
10	12	4	3	8	8	4

Продовження таблиці 2.8

	а	б	в	г	д	е
11	13	4	3	8	8	10
12	13	5	10	8	8	10
13	5	5	10	8	4	4
14	4	6	6	8	4	4
15	3	6	11	8	4	10
16	2	7	7	4	4	10
17	9	8	7	4	8	10
18	11	9	8	4	8	10
19	6	9	8	4	8	4
20	4	10	4	4	8	4
21	12	10	4	4	4	4
22	5	11	2	4	4	4
23	5	11	2	4	4	10
24	10	12	12	4	4	10
25	11	12	12	4	8	6
26	9	13	1	4	8	6
27	3	13	1	4	8	6
28	3	5	1	4	8	6
29	2	5	3	4	4	6
30	2	5	3	4	4	6
31	2	10	13	4	4	10
32	3	10	13	4	4	10

Отже оцінка ентропії згідно формули К.Шеннона для трьох різних ДІ з однаковими сумами ймовірностей станів (рис.2.6(а,б,в)) є однаковою, не враховує і не відображає динаміки, кореляційних та спектральних характеристик досліджуваних ДІ.

Розрахунок ентропії на основі оцінки К.Шеннона для ДІ, представлених на рис.2.6(г, д, е) має наступний вигляд [284]:

$$\text{для рис.2.6(г): } I_{Sh} = 15 \cdot (5 - 4) + 17 \cdot (5 - 4) = 32;$$

$$\text{для рис.2.6(д): } I_{Sh} = 16 \cdot (5 - 4) + 16 \cdot (5 - 4) = 32;$$

$$\text{для рис.2.6(е): } I_{Sh} = 18 \cdot (5 - 4) + 8 \cdot (5 - 3) + 6 \cdot (5 - 2,5) = 46,5;$$

Викладені теоретичні засади та приклад розрахунку оцінок ентропії за формулами Р. Хартлі та К. Шеннона показує значні функціональні обмеження цих оцінок, оскільки вони не реагують на зміну динаміки, статистичних та спектральних характеристик станів ДІ.



Розрахунок ентропії згідно аналітичного виразу Я.Николайчука (табл.2.7

№11) виконується згідно наступного алгоритму:

- визначається математичне сподівання масиву даних  $M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;

- визначається масив центрованих значень  $x_i^\circ = x_i - M_x$ ;

- обчислюється дисперсія  $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2$  та квадрат дисперсії  $D_x^2$ ;

- обчислюється центрована автокореляційна функція

$$R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^\circ \cdot x_{i+j}^\circ, \quad j = \overline{0,1,\dots,m}, \quad m - \text{число точок АКФ};$$

- обчислюється масив даних квадратів АКФ  $R_{xx}^2(j)$ ;

- обчислюється різниця  $I_j = D_x^2 - R_{xx}^2(j)$ ,  $j = \overline{0,1,\dots,m}$ ;

- визначається математичне сподівання  $I_x = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I_j$ ;

- обчислюється ентропія згідно виразу  $I_N = n \cdot \hat{E} \left[ \frac{1}{2} \log_2 I_x \right]$

На основі приведених аналітичних виразів виконано розрахунок ентропії  $I_N$  для ДІ, представлених масивами даних (табл.2.8), а його результати приведено на діаграмі (рис.2.7)

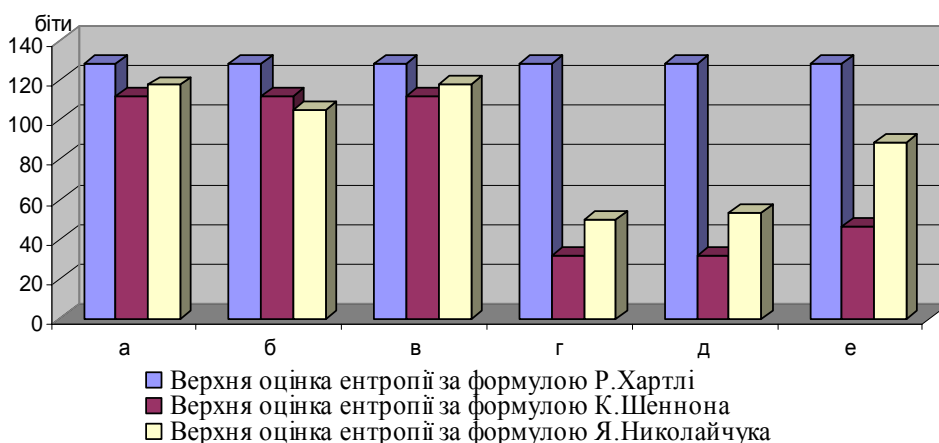
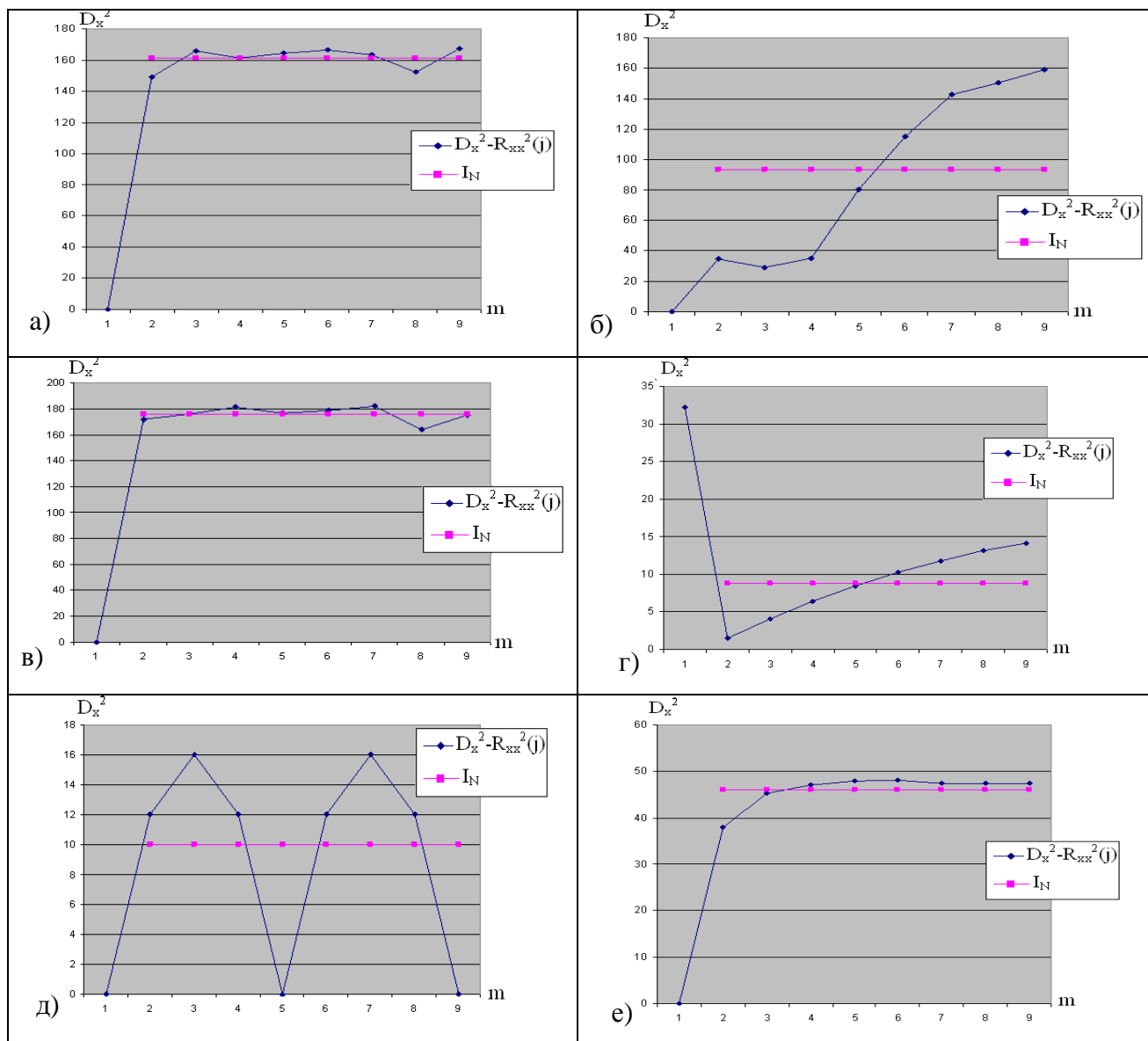


Рис.2.7 - Діаграма розрахунку ентропії.

Графіки розрахунку кореляційної міри ентропії для ДІ, поданих на рис.2.6, подані в табл.2.9 [284].

Таблиця 2.9 - Графіки розрахунку кореляційної міри ентропії



Оцінка кореляційної ентропії за оцінкою Я.Николайчука забезпечує чітку диференціацію структури даних.

Складна структура решітчастих моделей послідовностей цифрових відліків також може бути описана та кількісно розрахована з точки зору інформатики на основі єдиної інтегральної оцінки її інформаційної ємності згідно, розроблених нами і апробованих, теоретичних засад коефіцієнта структурної складності [285, 286].

Оцінювання структурної складності СД на основі вагових коефіцієнтів оцінок інформативності викладено у роботах [255, 285, 286], де дана проблема вирішена шляхом визначення параметрів моделей  $P_i$  та присвоєння вагових коефіцієнтів оцінок інформативності СД -  $\alpha_i$ .

Визначимо коефіцієнт структурної складності решітчастих моделей послідовностей цифрових відліків, що зображені на рис.2.6 згідно виразу:

$$k_c = k_{основи} + k_{моделі} = \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i \right)_{основи} + \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i \right)_{моделі} .$$

На основі проведених розрахунків побудована діаграма структурної складності решітчастих моделей послідовностей цифрових відліків, що зображені на рис.2.6 (рис.2.8) [284]:

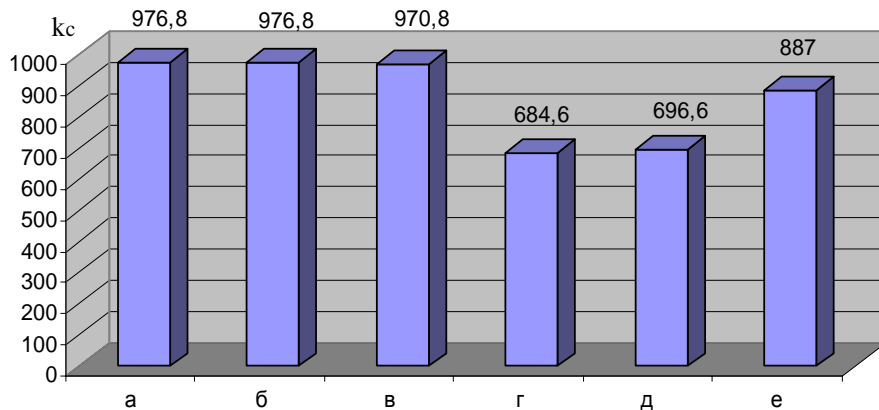
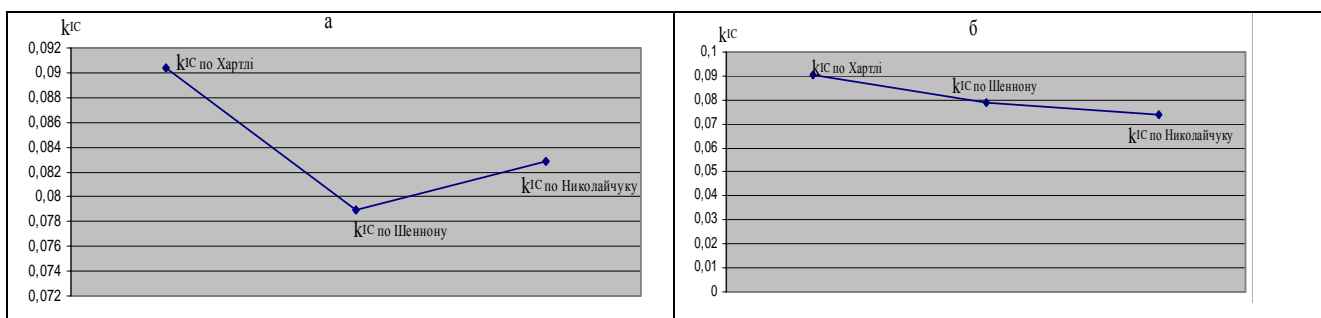


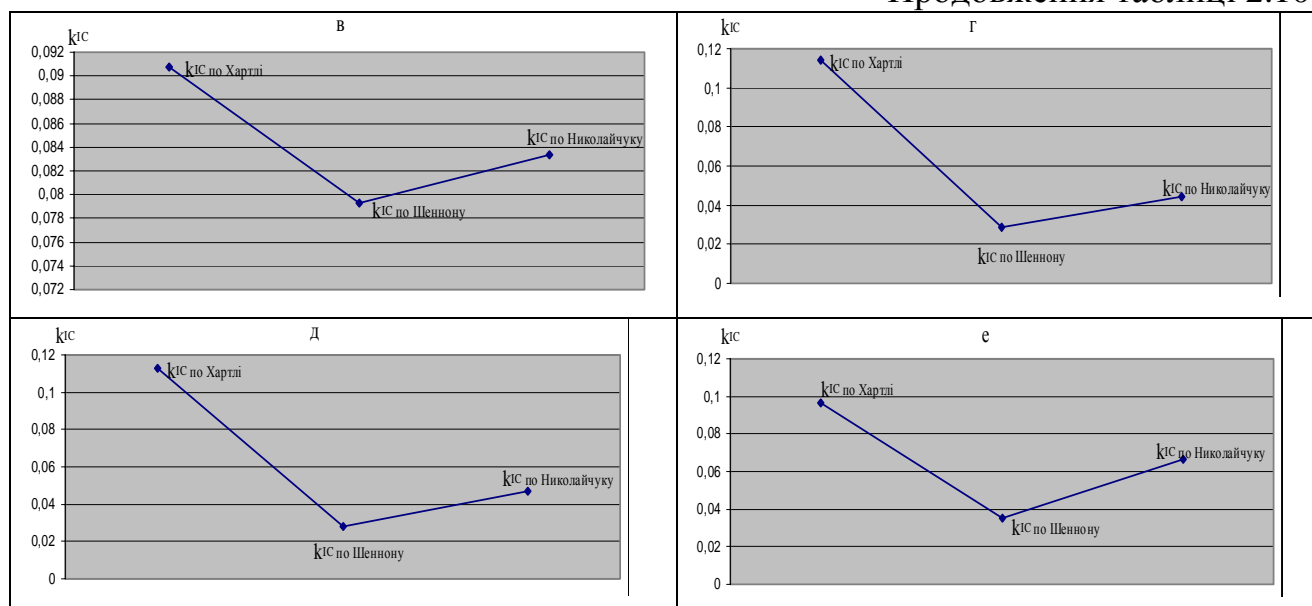
Рис.2.8 - Структурна складність решітчастих моделей, зображених на рис.2.6.

В загальному випадку оцінку ентропійно-структурної складності можна виразити на основі різних аналітичних функцій: адитивної ( $k_{IC} = I + k_c$ ), мультиплікативної ( $k_{IC} = I \cdot k_c$ ), відносної ( $k_{IC} = I/k_c$ ), експоненціальної ( $k_{IC} = I \cdot e^{k_c}$  або  $k_{IC} = k_c \cdot e^I$ ), логарифмічної ( $k_{IC} = I \cdot \log k_c$  або  $k_{IC} = k_c \cdot \log I$ ) та ін.

В даній роботі розраховано відносну оцінку ентропійно-структурної складності ПФД, що відображено в табл.2.10 [284].

Таблиця 2.10 - Графіки розрахунку ентропійно-структурної складності





З графіків (табл.2.10) видно, що розрахунок кореляційної ентропії у порівнянні з мірою Р.Хартлі та ймовірнісною мірою К.Шеннона, які не враховують статистичні та спектральні характеристики джерела інформації у найбільшій степені наближається до власної ентропії джерела інформації.

Обґрунтування ефективності застосування даних критеріїв потребує глибокого теоретичного та експериментального дослідження для різних класів ПФД.

### Висновки до другого розділу

1. В результаті аналізу структур та компонентів РКС встановлено, що найпоширенішими є оцінки апаратної та часової складності. Крім названих, одним з важливих критеріїв оцінки досконалості архітектури є критерій структурної складності. Показано, що основи оцінки структурної складності вперше запропоновані в теорії графів та мереж Петрі, що дозволило систематизувати способи їх структурного представлення, а також формалізувати їх функціональні перетворення. Прикладом критерію розрахунку структурної складності, топології та мікроелектронних компонентів є метод Квайна, який визначається за трьома критеріями: мінімальної кількості логічних вентилів, входу-виходів та мінімальної часової затримки сигналів. Останні два критерії відповідають оцінкам апаратної та часової складності структур обчислювальних пристроїв згідно критеріїв, запропонованих

М.А.Карцевим, С.А.Майоровим, які враховують ієрархічні рівні структур. На основі теорії SH-моделей, розробленої М.В.Черкаським, запропонована система критеріїв, які визначають апаратну, програмну та структурну складність компонентів обчислювальних систем. Здійснена оцінка характеристик критерію складності руху даних в активному вузлі КС, запропонованих Дж.Мартіном. Результати проведеного аналізу дали можливість визначити недоліки та функціональні обмеження відомих критеріїв.

Запропоновані автором критерії оцінки структурної складності у вигляді зваженої суми структурних характеристик та врахування інформативних характеристик структур.

2. Систематизовані способи організації руху даних у структурах РКС та визначені класи інформаційних потоків даних у середовищі структури багаторівневих РКС. Проведені дослідження дозволяють встановити наступні типи поліфункціональних даних, які використовуються при обміні інформаційними потоками між компонентами РКС: інформаційно-вимірювальні аналого-сигнальні та цифрові біт та байт орієнтовані дані, цифрові байт орієнтовані потоки даних, мережно-інтерфейсні сигнально-маніпульовані біт орієнтовані дані, які передаються по лініях зв'язку.

Приведені класифіковані типи ПФД, які застосовуються при обміні інформаційними потоками між різними компонентами у структурі РКС, склали основу предмету теоретичних та прикладних досліджень даної дисертаційної роботи.

3. Формалізовані системні характеристики джерел інформації у структурах РКС стосовно квазістаціонарних об'єктів. Розроблений функціонал контролю стану ОУ, який враховує масиви оцифрованих моніторингових даних, технологічні стани, математичні сподівання, статистичні, кореляційні, спектральні, кластерні та ентропійні характеристики, а також логіко-статистичні інформаційні моделі контролю станів відхилень об'єкту від норми. Запропонований функціонал характеризується найбільш повною інформаційною ємністю у порівнянні з відомими, які застосовуються для моніторингу станів складних квазістаціонарних об'єктів.

4. Розроблені теоретичні основи та досліджені системні характеристики базисних ортогональних функцій різних ТЧБ, зокрема Фур'є, унітарного, Хаара, Радемахера, Крестенсона та Галуа, які застосовуються для кодування ПФД у середовищі інтерфейсних взаємодій компонентів РКС. Досліджені характеристики кодових матриць названих ТЧБ та побудовані відповідні графіки їх ефективності. Показано, що найперспективнішими для реалізації арифметико-логічних операцій над ПФД є кодові системи базисів Хаара, Радемахера та Крестенсона, які породжують відповідні системи числення з двійковою та модульною арифметикою залишкових класів.

5. Проведений аналіз методів ентропійного опрацювання структуризованих даних на основі оцінок мір ентропії, запропонованих Р.Хартлі, К. Шенноном, Я.Николайчуком. Результати проведених досліджень склали основи синтезу високопродуктивних процесорів визначення ентропії з глибоким розпаралеленням обчислювальних процесів.

## РОЗДІЛ 3

### ОСНОВИ ТЕОРІЇ СТРУКТУРИЗАЦІЇ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ СКЛАДНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

3.1. Теорія структуризації поліфункціональних елементів складних систем.

Важливою проблемою теорії складних систем є декомпозиція їх компонентів, систематизація інформаційних, матеріальних та керуючих інтерактивних зв'язків [97, 287].

Фундаментальні положення теорії складних систем тісно пов'язані з методологією та технологією побудови моделей руху поліфункціональних даних. Одним з перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є теорія та формалізація матричних моделей руху даних [91, 94-97]. Позитивною характеристикою сучасного стану теорії є розроблена інформаційна технологія формалізації побудови сімейства похідних моделей руху даних в однорівневих та багаторівневих розподілених комп'ютерних системах [96, 98]. В той же час, така технологія базується на компонентах "кольорових" мереж Петрі типу [95, 96, 98]:  $\odot$  - джерело інформації,  $\circ$  - пункт обробки інформації,  $\otimes$  - пункт затвердження інформації, а також двовимірної матриці інциденцій (рис.3.1). У вузлах матричної моделі розміщені компоненти з бінарними інформаційними зв'язками, які описуються четвіркою параметрів [95, 96, 98]:  $a$  – початок виконання операції;  $b$  – тривалість виконання операції;  $c$  – тип операції;  $P - V$  – собівартість виконання операції ( $P$  - прибутки,  $V$  - витрати).

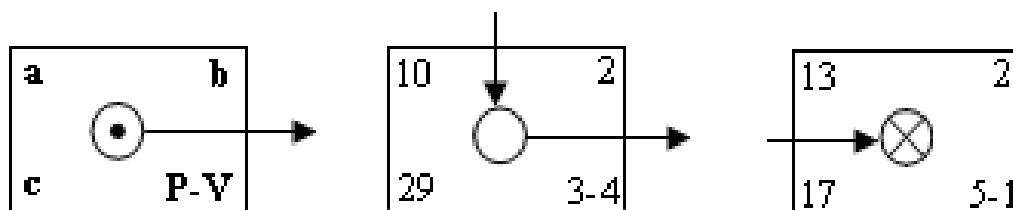


Рис.3.1 - Компоненти "кольорових" мереж Петрі.

Функціональним недоліком матричного моделювання інформаційних потоків в складних системах є відсутність декомпозиції кожного атрибута до рівня вільного та діючого елемента системи. Така ситуація ускладнює можливість глибшого формалізованого опису компонентів складних систем та досконалішого оптимізаційного проектування такого класу систем. Тобто елемент складних систем при такій технології розглядається, як кібернетичний атрибут типу "чорна скринька" [50, 97, 98].

Особливістю моделі кібернетичної системи "чорна скринька" (рис.3.2) є відсутність необхідності вивчення внутрішньої структури та компонентів системи, яка може бути достатньо складна для оперативного аналізу.

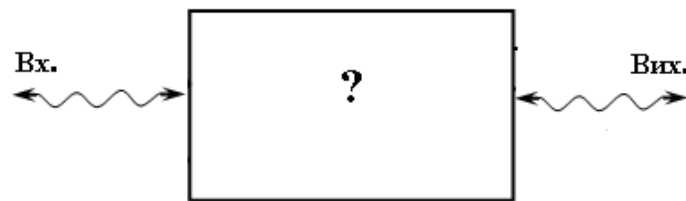


Рис.3.2 - Модель елемента "чорна скринька".

Перевагою такої моделі ЕС, є можливість доцільного визначення його характеристик шляхом подання на входи функціональних або тестуючих сигналів та аналізу вихідної його реакції на зовнішні збурення. В той же час суттєвими недоліками застосування такої моделі є неможливість вдосконалення архітектури ЕС, доцільного розділення на окремі компоненти, а також оптимізація його функцій.

Теорія структуризації даних (ТСД) повинна базуватися на фундаментальних положеннях теорії складних систем, однією з властивостей поняття "системи" є ділимість [50, 98, 265]. Тобто система структурно поділяється на : елемент системи, підсистему і систему.

Елемент системи (ЕС) – це елементарний компонент підсистеми і системи будь-якої складності, який можна позначити символом  $\boxed{e}$  [150, 265].

Елемент складається з двох компонентів: ядра –  $e$  та оболонки  $\square$ , у біології "мембрани", через яку ядро елемента взаємодіє із собі подібними або функціонально іншими.



Такий елемент теорії складних систем називається вільним, якщо у нього відсутні інформаційні, енергетичні, матеріальні чи управлінські зв'язки з іншими елементами складних систем та "зовнішнім середовищем" взагалі.

Під зовнішнім середовищем розуміють два "простори" або "конгломерати" чи "ансамблі", які відповідають ресурсам (R) та споживачам чи користувачам (C) інформаційних поліфункціональних даних (рис.3.3).

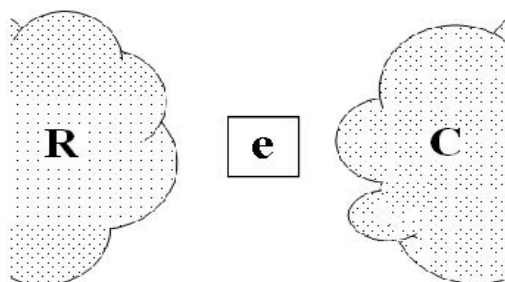


Рис.3.3 - Взаємодія елемента системи із середовищами R– ресурсів та C – користувачів.

Отже, не претендуючи на абсолютну повноту класифікації зовнішніх взаємодій ЕС, виходячи із сформульованого поняття ЕС, маємо шість наступних форм взаємодії ЕС з R та C зовнішніми середовищами, згідно атрибутів символіки (табл.3.1) [265].

Таблиця 3.1 - Атрибути зв'язків ЕС

Символ атрибуту взаємодії ЕС	Зміст, форма, суть, принцип реалізації взаємодії
	інформаційний
	матеріальний
	енергетичний, електромагнітний
	оптико-енергетичний
	управлінський
	будь-який із зв'язків – узагальнений атрибут ЕС

Користуючись атрибутом зв'язку ЕС сформулюємо більш строге поняття діючого ЕС: це ЕС, який має не більше одного інваріантного зв'язку із зовнішніми середовищами (рис.3.4).

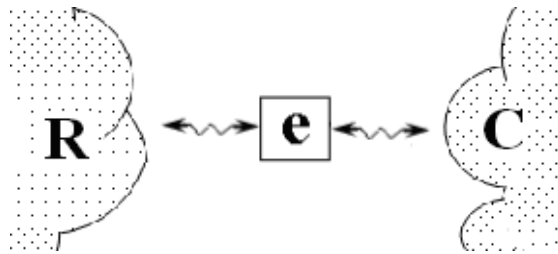


Рис.3.4 - Діючий ЕС.

Таким чином, можна систематизувати сукупність діючих ЕС, тобто елементів, ядро яких взаємодіє не більш, ніж з одним атрибутом зовнішніх РС – середовищ (табл.3.2).

Таблиця 3.2 - Бінарні взаємодії активних ЕС

№	Пари взаємодії	Атрибути бінарних взаємодій ЕС $R \leftrightarrow e \leftrightarrow C$
1	2	3
1	$e \rightarrow C$	$e \rightarrow, e \rightarrow \triangleright, e \dashrightarrow, e \dashrightarrow \dots, e \rightsquigarrow$
2	$R \leftarrow e$	$\leftarrow e, \triangleleft e, \dashleftarrow e, \dashleftarrow \dots e, \leftarrow \rightsquigarrow e$
3	$e \leftarrow C$	$e \leftarrow, e \triangleleft, e \dashleftarrow, e \dashleftarrow \dots, e \rightsquigarrow \leftarrow$
4	$R \rightarrow e$	$\rightarrow e, \rightarrow \triangleright e, \dashrightarrow e, \dashrightarrow \dots e, \rightsquigarrow e$
5	$R \rightarrow e \rightsquigarrow C$	$\rightarrow e \rightarrow, \rightarrow e \triangleright, \rightarrow e \dashrightarrow, \rightarrow e \dashrightarrow \dots, \rightarrow e \rightsquigarrow$
6	$R \rightsquigarrow e \rightarrow C$	$\rightsquigarrow e \rightarrow, \triangleright e \rightarrow, \dashrightarrow e \rightarrow, \dashrightarrow \dots e \rightarrow, \rightsquigarrow e \rightarrow$
7	$R \rightsquigarrow e \triangleright C$	$\rightsquigarrow e \triangleright, \triangleright e \triangleright, \dashrightarrow e \triangleright, \dashrightarrow \dots e \triangleright, \rightsquigarrow e \triangleright$
8	$R \rightsquigarrow e \rightsquigarrow C$	$\rightsquigarrow e \rightsquigarrow, \triangleright e \rightsquigarrow, \dashrightarrow e \rightsquigarrow, \dashrightarrow \dots e \rightsquigarrow, \rightsquigarrow e \rightsquigarrow$
9	$R \rightsquigarrow e \dashrightarrow C$	$\rightsquigarrow e \dashrightarrow, \triangleright e \dashrightarrow, \dashrightarrow e \dashrightarrow, \dashrightarrow \dots e \dashrightarrow, \rightsquigarrow e \dashrightarrow$
10	$R \rightsquigarrow e \dashrightarrow \dots C$	$\rightsquigarrow e \dashrightarrow \dots, \triangleright e \dashrightarrow \dots, \dashrightarrow e \dashrightarrow \dots, \dashrightarrow \dots e \dashrightarrow \dots, \rightsquigarrow e \dashrightarrow \dots$
11	$R \leftarrow e \rightsquigarrow C$	$\leftarrow e, \triangleleft e, \dashleftarrow e, \dashleftarrow \dots e, \leftarrow \rightsquigarrow$
12	$R \triangleleft e \rightsquigarrow C$	$\triangleleft e, \triangleleft e, \dashleftarrow e, \dashleftarrow \dots e, \triangleleft \rightsquigarrow$
13	$R \rightsquigarrow \leftarrow e \rightsquigarrow C$	$\rightsquigarrow \leftarrow e, \triangleright \leftarrow e, \dashrightarrow \leftarrow e, \dashrightarrow \dots \leftarrow e, \rightsquigarrow \leftarrow e$

1	2	3
14	$R \leftarrow \dots e \rightsquigarrow C$	$\leftarrow \boxed{e} \leftarrow, \leftarrow \boxed{e} \leftarrow, \leftarrow \boxed{e} \leftarrow, \leftarrow \boxed{e} \leftarrow, \leftarrow \boxed{e} \leftarrow$
15	$R \leftarrow \dots e \rightsquigarrow C$	$\leftarrow \boxed{e} \leftarrow, \leftarrow \boxed{e} \leftarrow, \leftarrow \boxed{e} \leftarrow, \leftarrow \boxed{e} \leftarrow, \leftarrow \boxed{e} \leftarrow$
16	$R \rightsquigarrow e \rightarrow C$	$\leftarrow \boxed{e} \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightarrow$
17	$R \rightsquigarrow e \rightarrow C$	$\leftarrow \boxed{e} \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightarrow$
18	$R \rightsquigarrow e \rightsquigarrow C$	$\leftarrow \boxed{e} \rightsquigarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightsquigarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightsquigarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightsquigarrow, \leftarrow \boxed{e} \rightsquigarrow$
19	$R \rightsquigarrow e \dots \rightarrow C$	$\leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow$
20	$R \rightsquigarrow e \dots \rightarrow C$	$\leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow, \leftarrow \boxed{e} \dots \rightarrow$

З табл.3.2 видно, що у наведеній класифікації ЕС вирізняються класи за функціональними ознаками [97, 265]:

- неповнофункціональні ЕС: генеруючі (п.1, 2) та поглинаючі (п.3, 4);
- транзитні С (п.5-10), R (п.11-15) у середовищах R та C;
- повнофункціональні інваріантні (п.16-20).

Наведена систематизація ЕС визначає особливу складність процесів структуризації та їх формалізованого опису у різних галузях знань.

Такими галузями знань ТСД безсумнівно є наступні теорії [16]: сигналів, інформації, випадкових процесів, кодування, моделей джерел інформації та руху даних, графів, чисел, математики, а також аудіо- і відео зображень, сенсорів та схемотехніки.

Виходячи з функціонально-визначеного поняття ЕС можна назвати їх реалізацію у певних сферах знань [97]:

- квант світла;
- – крапка – символ чорно-білих графічних зображень, які утворюють символи: цифри, букви, знаки, лінії, функції, матриці, схеми, структури, тощо;

○ – піксель – символ кольорового зображення, який складається з трьох компонентів кольорів (синього, зеленого, червоного);

—▶|— – вентиль, елементарний компонент мікроелектроніки, ПЛМ та комп'ютерів;

○—◇— – нейрон (рецепторний) біологічних систем;

⊙, ○ – компоненти хімічних сполук (атом, молекула);

*A, T, G, C* – нуклеотиди – компоненти ДНК;

- ген компонент ДНК;

*ДНК* – макромолекула живих організмів;

– компоненти електричних схем (*I* – струм, *U* – напруга, *C* – ємність, *L* – індуктивність, *G* – джерело струму та напруги);

– одиниця часу (мкс, мс, с);

*p, t, M* – тиск, температура, маса;

– математичні символи – цифра, функція, матриця, диференціал...;

– геометричні символи – лінія, коло, трикутник, квадрат, еліпс, куб та ін.

Список претендентів на формальне поняття ЕС у різних галузях знань можна енциклопедично продовжувати, але треба постулювати наступне: кожен із названих і неназваних претендентів на формальне поняття ЕС може бути однозначно описаний з точки зору інформатики та системотехніки на основі єдиної інтегральної оцінки його інформаційної ємності, тобто ентропії і його багатofункціонального опису у вигляді структуризованих даних.

Наприклад, оцінка структурної ємності графічних атрибутів, якими майже 98% всіх інформаційних знань подається у вигляді потоків алфавітно-цифрових та графічних даних, у тому числі кольорових та голографічних зображень, може бути кількісно розрахована згідно, розробленої нами і апробованої, теорії коефіцієнта структурної складності [150, 288, 289].

Розроблені основи теорії ТСД можуть бути базовими для розвитку сучасних методів та засобів ідентифікації та оптимізації подання, перетворення та використання поліфункціональних інформаційних повідомлень, доведених до стану структуризованих даних.

3.2. Теоретичні основи кодування структуризованих даних в унітарному теоретико-числовому базисі.

Як показано у роботах [163, 289, 290] математичні основи методів структуризації поліфункціональних даних охоплюють широкий клас проблем фундаментальної теорії організації руху даних, основа яких для багатьох прикладних задач перетворення інформації визначається відповідним ТЧБ ортогональних функцій. У працях [50, 51] досліджені кодові системи найбільш широко застосовуваних ТЧБ в інформаційних технологіях, у тому числі: U – унітарний, F – Фур’є, H – Хаара, W – Уолша, C – Крестенсона, R – Радемахера, G – Галуа. Слід зауважити, що унітарний ТЧБ є одним з перших, який винайшло людство і широко застосовується як математична основа унітарної системи числення та унітарних кодових систем у якості проміжних допоміжних представлень даних при міжбазисних перетвореннях. Тому задачу узагальнення теорії структуризації ПФД доцільно розглянути на основі унітарного ТЧБ.

В якості вихідних у засобах перетворення форми інформації широкого застосування набули унітарні коди, розрядність бінарного подання слова яких відповідає повній шкалі квантування діапазону перетворення  $N$ . Здійснити перехід до ефективніших кодів із меншою розрядністю дозволяє аналітичне подання унітарних кодів і встановлення функціональних залежностей з іншими кодами чи системами кодування.

Для подання унітарних кодів використовуються унітарні функції, які описані рівнянням (рис.Г.3) [51] у додатку Г.

Основними властивостями унітарних функцій є: умова лінійної незалежності ранг матриці  $N$  функцій, який дорівнює кількості функцій  $N$  та

умова ортогональності згідно виразу 
$$\int_0^1 Uni(m, \theta, i) Uni(k, \theta, j) d\theta \neq 0.$$

Неортогональність системи унітарних функцій зумовлює некомпактне пакування кодових елементів системи, що приводить до значної надлишковості інформаційних потоків. Внаслідок неортогональності та відсутності досліджень

властивостей система не використовується як основа теоретико-числових перетворень (ТЧП).

В роботах [98, 51] приведена система базисних функцій та кодових матриць унітарного базису. При цьому існує 4 модифікації систем базисних функцій унітарного ТЧБ. Такі 4 класи функцій утворюються за рахунок існування 4-х класів унітарних кодів: прямого, інверсного, інвертованого та інверсно-інвертованого.

Базисні функції унітарного ТЧБ породжують унітарні коди (рис.3.5а). Над унітарними кодами виконуються логіко-арифметичні операції визначення меншого з двох  $Z_i$ , модульної різниці  $|x_i - y_i|$ , які виконуються на основі логічної операції "І" та "Виключаюче АБО" (рис.3.5б).

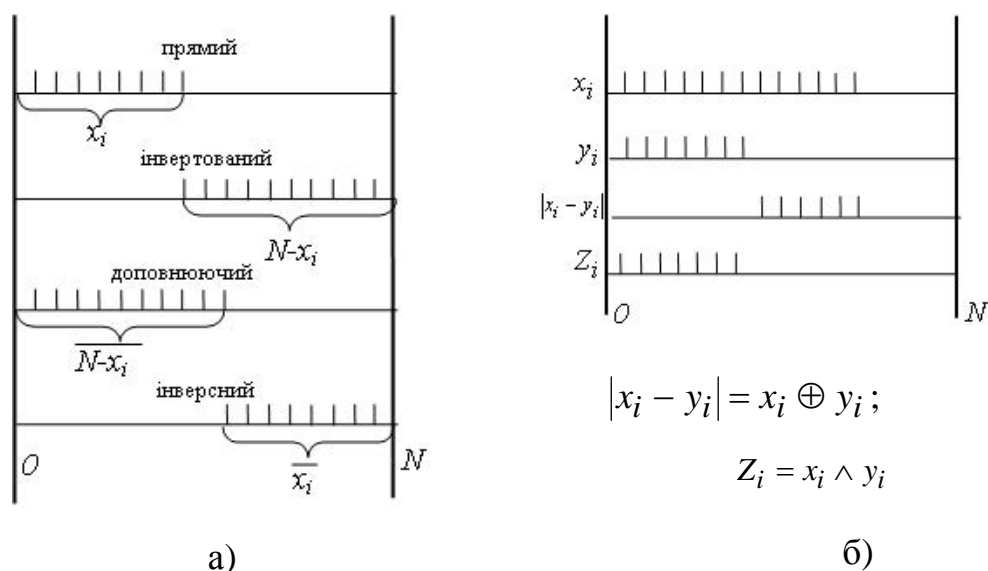


Рис.3.5 - Типи унітарних кодів та арифметико-логічні операції над ними.

В якості найменшого неділимого кванта структури графічно поданої відео інформації прийемо крапку чорного кольору або її зворотного білого зображення на чорному фоні (рис.3.6) [286].

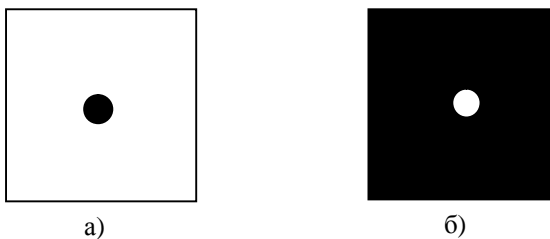


Рис.3.6 - Елементарна одиниця (квант) структури ПФД.

Присвоїмо даній одиниці елементарного кванту структури ПФД класу відео даних числове значення  $S0 = 2^{\pm k}$  - у двійковій системі числення або  $S0 = 10^{\pm m}$  - у широковживаній десятковій системі числення.

Таким чином, у залежності від вибраного заданого числового діапазону оцінки структурної складності поліфункціонального зображення (ПФЗ), маємо:  $S0 = 1$  при  $k = 0, m = 0$ .

У залежності від зображення крапки на відповідному фоні отримуємо структурну складність (СС) відповідно для:

а) білий фон -  $S0 = 0.0$ , де  $Sx = 0$ ; (3.1)

б) чорний фон -  $S1 = 1.1$ , де  $Sx = 1$ .

Таким чином згідно рис.3.6 біла крапка на чорному фоні -  $S0_{.1} = (б)$ ; чорна крапка на білому фоні -  $S1_{.0} = (а)$ . При цьому вважаємо, що діаметр графічного прямого та інвертованого символу відповідає  $d = 1$ , тобто одному пікселю двомірної матриці дворівневого Хеммінгового простору.

Отже, оцінки СС таких зображень, без прив'язки до координат, не перевищує двох біт.

При  $K \neq 0$  квант СД може бути табульований в областях  $Sx < 1$  або  $Sx > 1$ .

Наприклад: при  $K = 0.5; 0.25; 0.125; \dots$  така одиниця СД набуде відповідних значень  $0.1; 0.01; 0.001; \dots$ , при  $K = 2; 4; 8; \dots - 10; 100; 1000; \dots$

Визначена одиниця кванту СС доцільна до застосування у сучасних комп'ютеризованих інформаційних системах. Відомий аналітичний зв'язок між двійковою і десятковою системами числення дає можливість відповідного представлення двійкових даних через десяткові числа.

Можливе практичне задання кванта СС при  $K \neq 0$  у вигляді десяткових чисел відповідно [97, 286]:

$Sx < 1$                      $0.1; 0.01; 0.001; \dots$

$Sx > 1$                      $10; 100; 1000; \dots$

У той же час при необхідності оцінки СС напівтонових чорнобілих зображень оцінка кванта СД повинно відповідати визначенню (3.1).

Наприклад зображення  $S1_{0,10101}$  і  $S0_{0,10101}$  показані на рис.3.7, де сірий фон має бітову оцінку ступеня чорного чи білого 0.10101 у порівнянні з нулем та одиницею.



Рис.3.7 - Оцінка СД кванту  $S_0$  на фоні півтонових фонів (а, б – сірий фон).

Оцінка СС чорної чи білої крапки на певному фоні дозволяє ввести числовий розрахунок СД для напівтонових структур відео даних.

Наприклад, подання квантів СС на фоні деяких "сірих" фонів та застосування унітарного ТЧБ (У-ТЧБ) маємо: (рис.3.8).



Рис.3.8 - Одиниця СС на сірому фоні.

Оцінка СС для розглянутого рисунку в У-ТЧБ наступна:  $S1_{0011}$ ;  $S0_{0011}$  при п'ятирівневому квантуванні сірого фону та  $S1_{\overbrace{0000\dots11111}^n}$ ;  $S0_{\overbrace{0000\dots111111}^n}$  при  $n$ -рівневому квантуванні сірого фону.

У сучасних відео системах таку одиницю називають пікселем. Упустивши розгляд кванту  $S0_x$ , який є інвертованим зображенням кванту СС  $S1_x$ , де  $x$  – код фону та прийнявши фон як  $x=0$  виконаємо систематизацію наступних елементарних структур СД [286].

Почнемо з поняття структури прямої лінійної послідовності рівномірно або довільно віддалених квантів СС (рис.3.9).



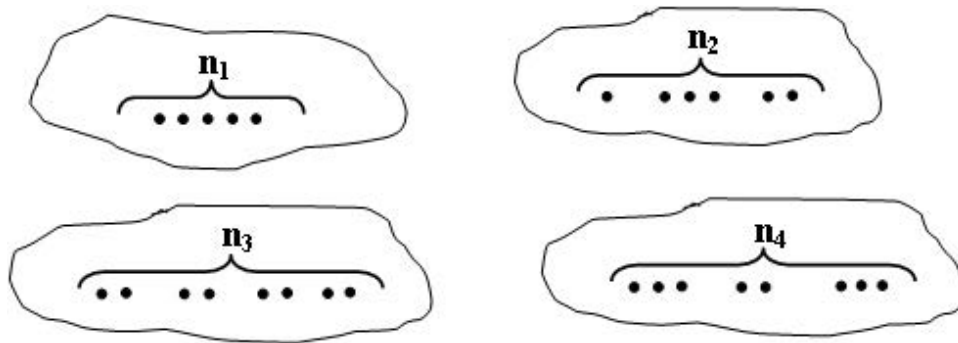


Рис.3.9 - Елементи СД побудовані з  $n$ -квантів  $S1_0$  в U-ТЧБ.

З рис.3.9 видно, що незалежно від структури послідовності  $S1_0$  в U-ТЧБ головним параметром числової оцінки СС є кількість ( $n$ )  $S1_0$ .

Наступним атрибутом СД введемо напрям вектору лінійної послідовності  $S1_0$  у декартових координатах (рис.3.10).

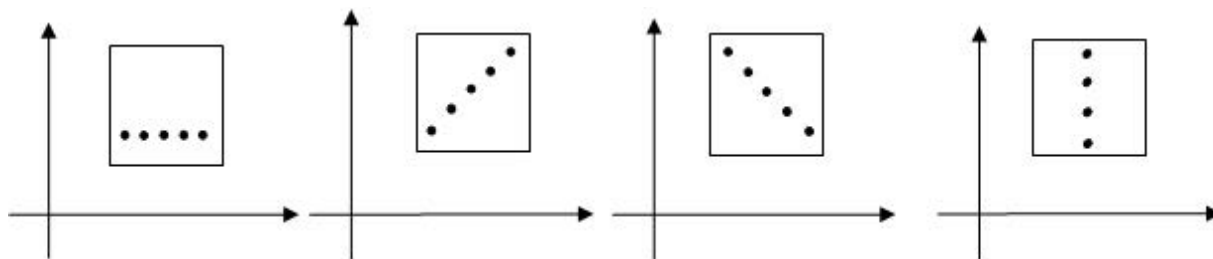


Рис.3.10 - Елемент СД згідно вектора напрямку  $n, S1_0, \alpha$ .  $\alpha \in 0 \div 360^\circ$ .

Наступний елемент СД просторовий (рис.3.11).

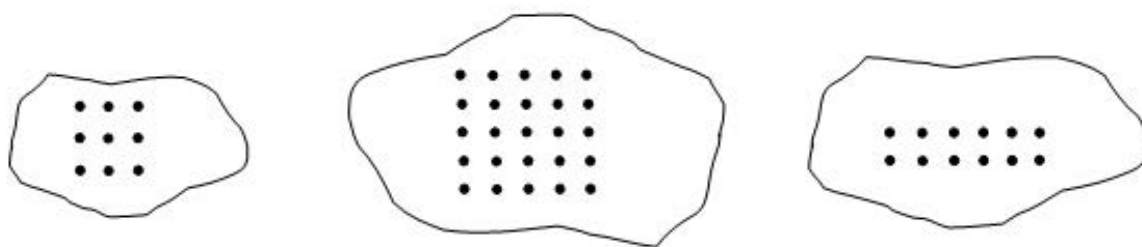


Рис.3.11 - Просторовий елемент СД  $n \cdot S1_0 \times m \cdot S1_0$

Розвиток такого елемента СД є комбінація просторових структур (рис.3.12).

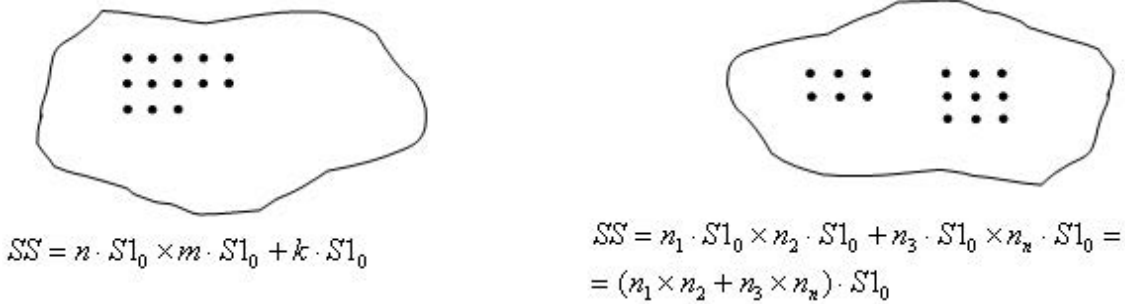


Рис.3.12 - Комбінації просторових елементів СД.

Сукупність квантів СД лінійно поданих без розривів є елемент – лінія (рис.3.13) довжиною  $L$  [265, 286].

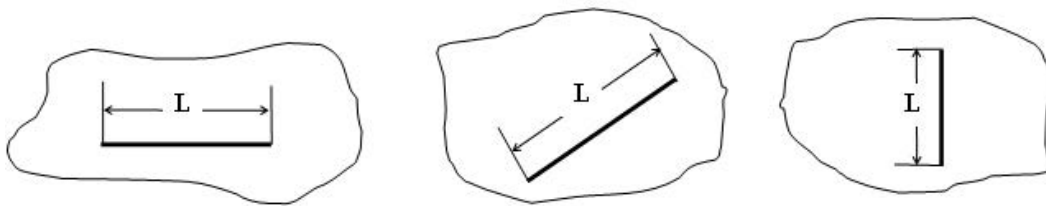


Рис.3.13 - Елемент СД – лінія  $S1_0 - L, \alpha$ .

Пересічення ліній розраховуємо як структурне адитивно-мультіплікативне об'єднання СС (рис.3.14).

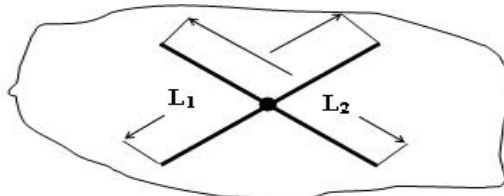


Рис.3.14 - Структурне об'єднання елементів СД.

Дане структурне об'єднання СД описується логічним рівнянням типу:

$$SS = L_1 \wedge L_2 \wedge S1_0.$$

Викладені систематизовані елементи структуризованих графічних даних в унітарному ТЧБ дозволяють формалізувати багато явищ описів ПФД як СД. У той же час унітарність числових величин приводить до певних функціональних обмежень застосування унітарного базису в інформаційних системах та низьку ентропію такого класу, що потребує формалізованого застосування СД у інших

ТЧБ, у тому числі Радемахера, Крестенсона та Галуа. Оскільки в унітарному ТЧБ не фіксується структурна організація СД, а тільки їх кількість. Існує багато задач теорії ймовірностей, ентропійного аналізу, де унітарний ТЧБ може ефективно застосовуватись у прикладних інформаційних задачах.

### 3.3. Метод формування структуризованих даних квазістаціонарних об'єктів на основі системи числення залишкових класів базису Крестенсона

В основу процесів формалізації та формування структуризованих даних у ТЧБ Крестенсона покладена теоретична база Китайської теореми про залишки та модульної системи числення залишкових класів (СЗК).

Відомі чотири форми перетворення залишкових класів, які базуються на аналітиці прямих та зворотніх перетворень (табл.3.3) [43, 291].

В табл.3.3:  $N_k$  – число у позиційній системі числення (у базисі Радемахера);  $(b_1b_2...b_i...b_k)$  – представлення числа у СЗК;  $(p_1p_2...p_i...p_k)$  – набір взаємно простих модулів СЗК;  $b_i$  – найменший невід'ємний залишок;  $P$  – діапазон кодування чисел в СЗК;  $a_i$  – ранг;  $K$  – кількість модулів СЗК;  $B_i$  – базисні числа СЗК;  $res$  – символ операції знаходження найменшого невід'ємного залишку;  $int$  – символ операції виділення цілої частини;  $mod$  – символ операції по модулю;  $m_i$  – ранговий коефіцієнт СЗК;  $\delta_p$  – дробова частина в нормалізованій формі СЗК;  $[N_k]_0, [b_i]_0$  – відповідно число та залишок в нормалізованій формі базису Радемахера.

Таблиця 3.3 - Теоретичні положення перетворень СЗК базису Крестенсона

№ п/п	Пряме перетворення форми СЗК	Зворотнє перетворення форми СЗК
1.	Цілочисельна форма СЗК	
	$N_k = (b_1b_2...b_i...b_k)_{(p_1p_2...p_i...p_k)}$ $N_k = b_i \pmod{p_i},$ $N_k = a_i p_i + b_i,$ $P = \prod_{i=1}^k p_i; 0 \leq N_k \leq P.$	$b_i = res N_k \pmod{p_i}$ $N_k = res \sum_{i=1}^k b_i \cdot B_i \pmod{P},$ $B_i = \frac{P}{p_i} \cdot m_i \equiv 1 \pmod{p_i}.$

2.	Нормалізована форма СЗК	
	$\frac{N_k}{P} = \text{res} \sum_{i=1}^k \frac{b_i \cdot B_i}{P} \pmod{P},$ $[N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k b_i \cdot \frac{B_i}{P} \pmod{1},$ $0 \leq [N_k]_0 \leq P-1; \quad \frac{B_i}{P} = \frac{1}{p_i},$ $\delta_p \leq \frac{1}{P}, \quad \frac{1}{p_i} = 0.\overbrace{gggg}^{n_i} \overbrace{gggg}^{\delta_p}.$	$[N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k b_i \cdot \frac{m_i}{p_i} \pmod{1},$ $[N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k [b_i]_0 \cdot m_i \pmod{1},$ $[b_i]_0 = \frac{b_i}{p_i}, \quad 0 \leq [b_i]_0 \leq 1,$ $N_k = \text{int}[N_k]_0 \cdot P.$
3.	Досконала форма СЗК	
	$[N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k [b_i]_0 \pmod{1}$	$b_i = \text{int} \text{res}[N_k]_0 \pmod{1} \cdot P_i$
4.	Розмежована форма СЗК	
	$N_k = N_{1k} + N_{2k} + \dots + N_{ik} + \dots + N_{nk}$	

На основі аналізу характеристик та функціональних можливостей використання ТЧБ для формування СД на низових рівнях РКС запропонований метод компактного заводо захищеного формування СД на основі ТЧБ Крестенсона, який описується наступним алгоритмом [97, 98]:

$$\left. \begin{array}{l} x_1(t) \rightarrow x_{i1} \rightarrow p_1 \rightarrow b_1 \\ x_2(t) \rightarrow x_{i2} \rightarrow p_2 \rightarrow b_2 \\ \dots \\ x_j(t) \rightarrow x_{ij} \rightarrow p_j \rightarrow b_j \\ \dots \\ x_m(t) \rightarrow x_{im} \rightarrow p_{k-1} \rightarrow b_{k-1} \\ D_i \rightarrow p_k \rightarrow b_k \end{array} \right\} N_k = \text{res} \sum_{j=1}^k b_j B_j \pmod{P},$$

$$B_j = \frac{P}{p_j} m_j \equiv 1 \pmod{p_j},$$

де  $x_j(t)$  - аналогові дані телеметрії;

$x_{ij}$  - цифрові дані телеметрії;

$D_i$  - ТЕД;

$p_1, p_2, \dots, p_k$  - система взаємно простих модулів;

$b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_k$  - набір найменших невід'ємних залишків;

$B_j$  - система ортогональних базисів СЗК.

Однозначне представлення цифрових даних телеметрії здійснюється при

виконанні умови:  $x_i - x_{i-1} = \Delta x_i \leq \frac{P_i}{2}$ .

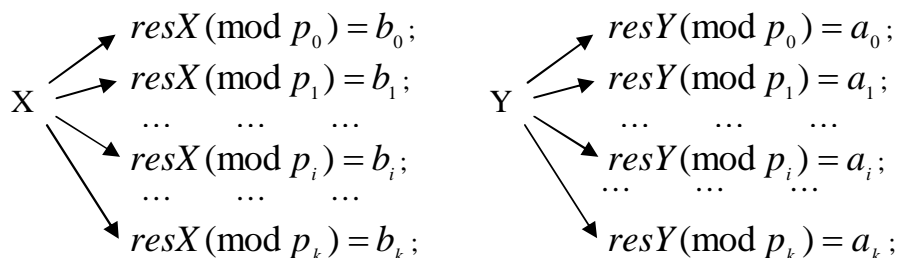
При використанні нормалізованої досконалої форми СЗК даний метод формування СД реалізується у вигляді більш простого алгоритму [98]:

$$\left. \begin{array}{l} x_1(t) \rightarrow x_{i1} \rightarrow p_1 \rightarrow [b_1]_0 \\ x_2(t) \rightarrow x_{i2} \rightarrow p_2 \rightarrow [b_2]_0 \\ \dots \\ x_j(t) \rightarrow x_{ij} \rightarrow p_j \rightarrow [b_j]_0 \\ \dots \\ x_m(t) \rightarrow x_{im} \rightarrow p_{k-1} \rightarrow [b_{k-1}]_0 \\ D_i \rightarrow p_k \rightarrow [b_k]_0 \end{array} \right\} [N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k [b_i]_0 (\text{mod } 1);$$

$$b_i = \text{int} \text{res}[N_k]_0 (\text{mod } 1) \cdot P,$$

де  $[N_k]_0$  - аналітичний вираз з табл.3.3.

Теоретичною основою СЗК є Китайська теорема про залишки [51], на основі якої реалізується пряме та зворотнє перетворення СЗК:



$$X = \text{res} \sum_{i=0}^{k-1} b_i \cdot B_i (\text{mod } P); \quad Y = \text{res} \sum_{i=0}^{k-1} a_i \cdot B_i (\text{mod } P),$$

де  $P = \prod_{i=0}^{k-1} p_i$ ;  $p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_k$  - система взаємно простих модулів;

$B_i = \frac{P}{p_i} \cdot m_i \equiv 1 \pmod{p_i}$ ;  $0 \leq m_i \leq p_i - 1$  нормуючі коефіцієнти базисних

чисел  $B_i$ .

Виконання умови взаємної простоти модулів СЗК базису Крестенсона суттєво спрощує алгоритми виконання операцій додавання та множення над числами, представленими кодами Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона СЗК  $X = (b_0, b_1, \dots, b_j, \dots, b_{k-1})$  та  $Y = (a_0, a_1, \dots, a_j, \dots, a_{k-1})$  згідно граф-алгоритмів (рис.3.15), де (+)res відповідає операції  $C_j = \text{res}(b_j + a_j) \pmod{P_j}$ , а (×)res – операції  $\gamma_j = \text{res}(b_j \cdot a_j) \pmod{P_j}$  [199, 292]:

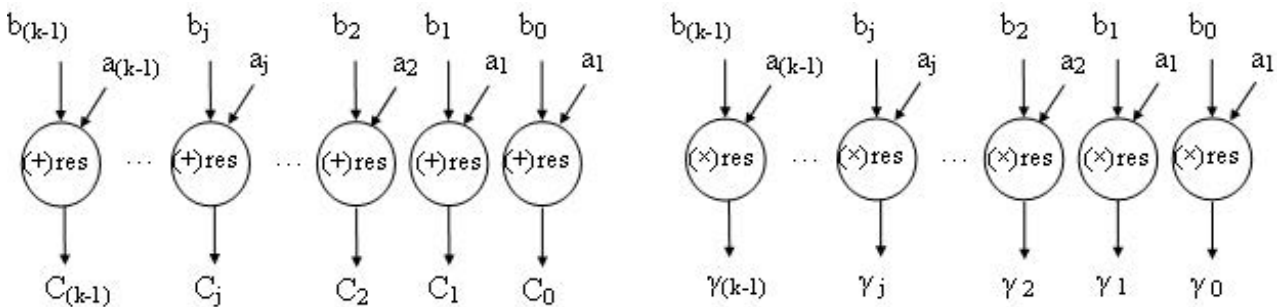


Рис.3.15 - Графи виконання операцій додавання та множення в базисі Крестенсона.

3.4. Методи поліфункціональної структуризації пікселів кольорових зображень у кодових системах теоретико-числового базису Радемахера та залишкових класах.

Успішний розвиток сучасної комп'ютерної техніки, мікроелектроніки та телекомунікаційних систем стимулює створення та масовий випуск дисплеїв кольорових зображень для телевізорів, моніторів персональних комп'ютерів, мобільних засобів, відеокамер, планшетів, промислових та великогабаритних табло [293, 294].

Широкомасштабне застосування різних типів відеотехніки у всіх галузях промисловості та у побуті зумовлює високий ступінь актуальності розв'язання

теоретичних і прикладних задач удосконалення, оптимізації та підвищення ефективності структуризації відео зображень у процесах формування, кодування, перетворення, криптозахисту, передавання, архівації, використання кольорових зображень та організації доступу до них.

Системне викладення прикладів постановки та успішного розв'язання цих задач шляхом розроблення математичних основ, реалізації алгоритмів та використання програмно-апаратних засобів опрацювання та розпізнавання зображень представлено у роботах зарубіжних авторів [293-296], українських вчених [220, 261, 262, 297] та ін.

Значну увагу в цьому напрямі досліджень приділено розв'язанню задач криптозахисту шляхом удосконалення алгоритмів структурних перетворень цифрових зображень.

#### 3.4.1. Аналіз алгоритмів опрацювання зображень.

У процесах кодування, перетворення, структуризації, кластеризації, класифікації та розпізнавання зображень використовують складні математичні методи та алгоритми опрацювання, при цьому найбільш успішними та широкоживаними, як показано у роботі [261], є наступні.

##### 3.4.1.1. Алгоритми оцінки ступеня статистичної близькості структур цифрових зображень

Для оцінки ступеня структуризації зображення введено алгоритми, які характеризують зображення з точки зору його структурних властивостей, зокрема (верхній індекс позначає рівень зображення) [261, 262, 296]:

- між сусідніми рівнями зображення:

$$K_S^1 = C/MC, K_S^2 = CR/C, K_S^{23} = IA/CR;$$

- через один сусідній рівень:

$$K_S^{12} = CR/MC, K_S^{23} = IA/C;$$

- всієї сукупності пікселів:

$$K_S^{123}(PX) = IA/PX,$$

де  $C$  - кластери;  $MC$  - мікрокластери;  $CR$  - замкнені регіони;  $IA$  - кількість ступенів декомпозиції зображення;  $PX$  - ймовірності інтенсивності пікселів.

### 3.4.1.2. Структурні оцінки мір близькості зображень.

Найбільш поширеними мірами близькості зображень є такі [261, 293, 298]:

1. Евклідова відстань:

$$d(i, j) = \sqrt{\sum (x_i - x_j)^2}; \quad x_i, x_j - \text{ознаки зображень};$$

2. Манхеттенська відстань:

$$d_m(i, j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |x_i - y_j|;$$

3. Статична відстань:

$$d_s(i, j) = \left( \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |x_i - y_j|^P \right)^{\frac{1}{P}}, \quad P \rightarrow \infty;$$

4. Відстань Чебишова:

$$d_c(i, j) = \max \sum |x_i - x_j|;$$

5. Відстань найменш ( $D_1$ ) та найбільш ( $D_2$ ) віддалених сусідів кластерів [261, 262, 297]:

$$D_1(A, B) = \min \{d_{ij}\}; \quad i \rightarrow A; \quad j \rightarrow B; \quad D_2(A, B) = \max \{d_{ij}\};$$

6. Попарне середнє:

$$D_s(A, B) = \frac{1}{|A| \times |B|} \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B d_s(i, j);$$

7. Центроїдна відстань:

$$D_s(A, B) = (d_s(ic, jc)),$$

де  $ic, jc$  — центроїди кластерів зображень  $A$  і  $B$ ;

8. Відстань Варда:

$$D_s(A, B) = d_e / (|A| \times |B|), \quad d_e = \sqrt{\sum (x_k - \bar{x})^2}, \quad x_k - \text{координати пікселя, } \bar{x} -$$

математичне сподівання координат.



### 3.4.2. Методи опрацювання зображень на основі гістограм.

3.4.2.1. Метод сегментування зображень на основі гістограм з одним порогом згідно із статистичним алгоритмом Оцу [261, 294, 295].

Ідея алгоритму полягає у мінімізації зваженої суми дисперсій інтенсивності двох сегментів зображень [30]:

$$\sigma_{\text{міжклас}}^2(T) = \sigma_0^2 - \sigma_{\text{внутр.}}^2(T) = W_1(t)W_2(t)[M_1(t) - M_2(t)]^2,$$

де  $\sigma_{\text{внутр.}}^2(T) = \omega_B(T)\sigma_B^2(T) + \omega_0(T)\sigma_0^2(T)$ ;

$$\omega_B(T) = \sum_{i=0}^{T-1} P(i); \omega_0(T) = \sum_{i=T}^{L-1} P(i); \mu_1(T) = \sum_{i=0}^{T-1} P(i) \cdot x(i); \mu_2(T) = \sum_{i=T}^{L-1} P(i) \cdot x(i),$$

де  $x(i)$  - значення інтенсивності,  $\mu$  - середнє арифметичне;  $\sigma$  - середньоквадратичне відхилення;  $\sigma_B^2$ ,  $\sigma_0^2$  - дисперсія пікселів сегмента зображення, відповідно нижче і вище від порогу,  $P(i)$  - відносна ймовірність пікселів або абсолютна кількість пікселів на  $i$ -му рівні.

Перевага цього методу полягає у простому алгоритмі обчислень на основі адитивних та мультиплікативних операцій над кодами інтенсивностей RGB-пікселів  $x(i)$ .

#### 3.4.2.2. Модифікація методу Оцу.

Модифікація методу Оцу базується на визначенні кумулятивної гістограми як суми ймовірностей [261, 294]. Це алгоритм, за яким дисперсію величин обчислюють з обох сторін осі інтенсивності і розраховують згідно з виразом:

$$V_1(S) = \sum_{i \in n,s}^{n,s} P_2(i).$$

Для кожного сегмента зображення за ітераційною процедурою обчислюють дисперсію відхилень значень  $P_1(i)$  та  $P_2(i)$  від середнього арифметичного значення [261]:

$$E_1^2(S) = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S [P_1(i) - \bar{P}_1(S)]^2; E_2^2(S) = \frac{1}{n-S} \sum_{i=n}^S [P_2(i) - \bar{P}_2(S)]^2;$$

$$F_S(V) = \min\{E_1(V_1(S)) + E_2(V_2(S))\}.$$

### 3.4.2.3. Сегментування зображень за кумулятивною гистограмою.

Нормовану кумулятивну гистограму, при кількості пікселів зображення  $N \times M/n$ , де  $N, M$  - розміри зображення,  $n$  - кількість інтервалів кумулятивної гистограми, розраховують за формулою [261]:

$$V_{FG}(S) = (1/n) \cdot S; S \in \overline{1,4},$$

де  $V_{FG}(S)$  — кількість пікселів зображення в інтервалі інтенсивності  $(1 \div S)$ .

Різниця між гіпотетичною та реальною гистограмами визначається згідно з виразом:

$$D(S) = V_F(S) - V_{FG}(S); S \in \overline{1,4},$$

де  $V_F(S)$  — максимальна кількість пікселів на вертикалі зображення.

Реальна кумулятивна гистограма отримується шляхом центрування гіпотетичної гистограми, що спрощує цифрове розпізнавання зображення.

### 3.4.2.4. Розподілені статистичні ознаки зображень.

Аналіз та класифікацію зображень виконують на основі розрахунку таких статистичних оцінок [220, 261]:

- середнє значення інтенсивності:  $m = \sum_{i=0}^{L-1} z(i) \cdot p(i);$

- центральні моменти порядку  $n$ :  $\mu_n[z(i)] = \sum_{i=0}^{L-1} (z(i) - m)^n \cdot P(i),$

де  $\tilde{P} = \{P(i), i \in \overline{0, L-1}\}$  - гистограма інтенсивності,  $L$  - кількість інтервалів гистограми;

- дисперсія контрасту ( $\sigma^2$ ) зображення:  $\sigma^2 = \mu_2;$

$$\mu_3(i) = \sum_{i=0}^{L-1} (z(i) - m)^3 \cdot P(i);$$

- міра контрастності ( $U$ ) однорідності інтенсивності пікселів:

$$U = \sum_{i=0}^{L-1} P^2(i).$$

#### 3.4.2.5. Перетворення інтенсивності.

Кольорове зображення перетворюють на зображення, передане відтінками сірого кольору. Для перетворення використовують алгоритм BT709 [261, 262] з такими коефіцієнтами  $R$ ,  $G$ ,  $B$ :

$$R = 0,2125; G = 0,7154; B = 0,0721.$$

Значення яскравості пікселів обчислюють згідно з виразом  $b = (256 - C_i) \times 100/256$  або у відсотках від білого кольору  $b = C_i \times 100/256$ , де  $C_i (i = 1,2,3)$  - значення компонент сірого кольору RGB-пікселя.

3.4.2.6. Розбиття інтенсивності компонентів RGB-пікселів з урахуванням дисперсії координат пікселів.

Кількість пікселів з однаковою інтенсивністю у гістограмі не враховує різниці між їхніми координатами, тому для підвищення роздільної здатності під час класифікації зображень застосовують статистичні оцінки координат пікселів у сегментах згідно з визначенням [261]:

- математичних сподівань координат пікселів:

$$\bar{x}(S) = \frac{1}{K_S} \sum x(S); \bar{y}(S) = \frac{1}{K_S} \sum y(S),$$

де  $x_i \in x(S)$ ,  $y_i \in Y(S)$ ,  $K_S$  - кількість пікселів у фрагменті;

- дисперсії координат пікселів:

$$E^2(x, y, s) = (1/K_S) \times \sum_{x_i, y_i} ((x_i - \bar{x}(S))^2 + (y_i - \bar{y}(S))^2);$$

- оцінки дисперсії координат пікселів шляхом обчислення площі фігур прямокутника або круга, що покриває пікселі фрагмента:

$$S_K(S) = 9 \cdot \pi \cdot E^2(S); G(S) = K_S / S_K(S),$$

де  $G(S)$  - ознака густини пікселів у такому фрагменті.

### 3.4.2.7. Опрацювання зображень на основі кластеризації.

Метою кластеризації є пошук певних структур у сукупності об'єктів. Кластеризація, як показано в [261], є описовою процедурою, що уможлиблює розвідувальний аналіз і вивчення «структури даних». Кластер можна охарактеризувати як групу об'єктів з подібними властивостями, які мають внутрішню однорідність та зовнішню ізольованість.

Кластерний аналіз виконують на основі зваженої суми модулів різниць між характеристиками образів (кластерів), що є кандидатами на об'єднання в один кластер згідно з виразами зважених сум:

- модульних різниць між характеристиками і ознаками образів [199, 261]:

$$F_{ij} = W_1|a_i - a_j| + W_2|b_i - b_j| + W_3|c_i - c_j| + \dots;$$

- квадратів різниць між характеристиками:

$$F_{ij} = W_2[a_i - a_j]^2 + W_2[b_i - b_j]^2 + W_3[c_i - c_j]^2 + \dots$$

для мінімуму ключів початкових образів  $F[\bullet] = \min\{F_{kj}\}$ ,  $k, j \in I$ ,

де  $I$  — множина всіх можливих пар ключів початкових зображень,  $W_i$  — коефіцієнти зваженості сум модульних та квадратичних різниць.

### 3.4.2.8. Метод оцінки "близькості" зображень.

У методі оцінки "близькості" зображень за Евклідовою відстанню використовується матриця [30]

$$m(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{S=1}^n (f_i(S) - f_j(S))^2; i \in \overline{1, d}; j \in \overline{1, l},$$

де  $f_i(S), f_j(S)$  — ознаки  $i$ -го та  $j$ -го зображення,  $d, l$  — довільні значення розміру матриці.

Наведені в пунктах 3.5.1 - 3.5.2 приклади методів та алгоритмів цифрового структурного опрацювання та розпізнавання зображень, згідно проаналізованих опублікованих даних [261, 262, 297], свідчать про виняткове застосування простих статистичних оцінок математичного сподівання (середнє арифметичне), дисперсії, Евклідової віддалі та зважених сум таких оцінок.

Як показано нами у роботах [51, 299], застосування двійкової позиційної арифметики ТЧБ Радемахера за наявності наскрізних переносів для обчислення сум, модульних різниць, квадратів добутоків, квадратів різниць та зважених ознак

$$\sum_{i=1}^n x_i; |x_i - x_j|; x_i^2; x_i \times x_j; [x_i - x_j]^2;$$

$$W_i \times |x_i - x_j|; W_i \times [x_i - x_j]^2; \sum_{i,j} x_i \times x_j, \quad (3.2)$$

а також більш складних алгоритмів на їх основі, зумовлює відповідно низьку швидкодію опрацювання цифрових масивів даних, які представляють зображення.

3.4.3. Методи кольороутворення та кодування пікселів кольорових зображень.

Представлення кольору згідно з міжнародним стандартом RGB здійснюється як композиція трьох основних кольорів: червоного (R - red - червоний), зеленого (G - green - зелений) та синього (B - blue - синій). Результатом є стандартна RGB-система кольороутворення, де використано монохроматичні випромінювання з довжиною хвилі:

$$\lambda_R = 0,700 \text{ мкм (червоне);}$$

$$\lambda_G = 0,5461 \text{ мкм (зелене);}$$

$$\lambda_B = 0,4358 \text{ мкм (синє).}$$

Оскільки різним довжинам хвиль (частотам) відповідають різні значення енергії, то випромінювання рівноенергетичного білого кольору, формуються шляхом змішування у пропорції [199, 262]

$$\bar{O} = \bar{O}_R + \bar{O}_G + \bar{O}_B,$$

$$\text{де } \bar{O}_R = m \cdot \hat{O}_R, \bar{O}_G = n \cdot \hat{O}_G, \bar{O}_B = p \cdot \hat{O}_B,$$

$$m = 1.0, n = 4.5907, p = 0.0601 \quad (3.3)$$

У комп'ютерній RGB-системі основний колір має 256 градацій, тобто у двійковій системі числення змінюється у діапазоні  $0 \div 255$ , що відповідає об'єму даних 8 біт або 1 байт.

Таким чином, код кольору RGB-системи задається трьома байтами і становить 24 біти у базисі Радемахера. Найменший елемент кольорового зображення у Хеммінговому просторі на дискретному дисплеї представляється одним триколірним пікселем.

З ініціативи фірм Microsoft та Hewlett Packard стандартизованим колірним простором для мережі Інтернет є sRGB (standart RGB), який відповідає простору типового монітора VGA. Основні кольори цього простору збігаються з кольорами, що використовуються у телебаченні (HDTV).

У колірному просторі Wide Gamut RGB використовують спектрально чисті основні кольори, білу точку  $D50$  у трикутнику локусу колірностей та гаму 2,2, що дає змогу задати 77,6% усіх видимих кольорів. Проте він містить 8,1% нереальних кольорів, а тому на видимі кольори залишається менше градацій [261].

Колірний простір Adobe RGB є стандартною колірною моделлю і містить інтенсивні зелені та блакитні кольори.

Модель Lab, створена Міжнародною комісією з освітлення (CIE), визначає кольори без урахування індивідуальних особливостей пристроїв відображення [262, 294, 295]. Згідно моделі Lab колір визначається яскравістю (Luminance) (у діапазоні  $0 \div 100\%$ ) і двома хроматичними компонентами:

- параметром  $a$ , який змінюється від зеленого до червоного і задається числом до 128 (7 біт у базисі Радемахера);

- параметром  $b$ , що змінюється в діапазоні від синього до жовтого і задається числом до 127 (7 біт у базисі Радемахера). Цю модель використовують у друкарстві.

Координати колірностей LCH одержують у стандарті Lab таким чином: L

- координата яскравості;  $C$  (Chroma)  $= (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}$  - насиченість кольору;  $H$  (Hue)  $= \arctg(b/a)$  - колірний тон.

Калібрування та профілювання пристроїв у колірних просторах XYZ або Lab перетворюють на основі спеціальних тестових колірних таблиць (мішеней), які містять певний набір контрольних кольорів. До цього набору включають основні адитивні (червоний, зелений, синій) і базові субтрактивні кольори (жовтий, пурпурний, блакитний та різні їх градації), до яких додають білий, чорний та градації сірих кольорів. Мішені, що використовуються для профілювання моніторів, відео- та проекційного обладнання, представляють у вигляді координат RGB тестових кольорів згідно із стандартом IT8 [261, 262, 296]. Усі тестові таблиці IT8 складено з 144 тестових колірних зв'язків, контрольної шкали сірого і тестового зображення. Кожен колірний зв'язок має номер (від 1 до 22) та індекс (від A до L) (рис.3.16) [261].

Профілювання фотокамер і контроль кольору фотографій виконують згідно з колірною шкалою ColorChecker SG. Кожен колірний зв'язок має номер (від 1 до 10) та індекс (від A до N) (рис.3.17) [261, 296].

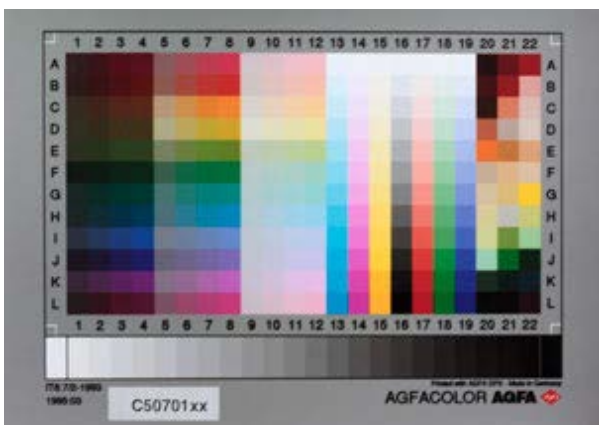


Рис.3.16 - Колірна шкала IT8.

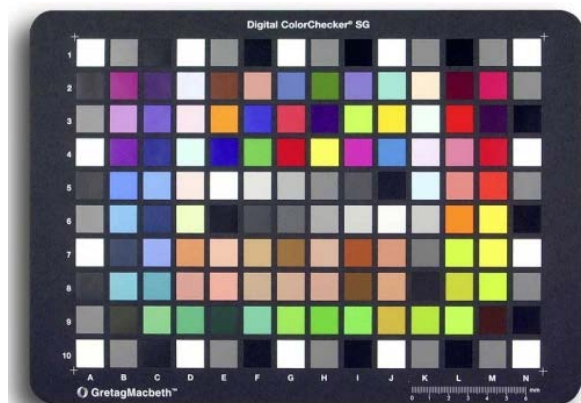


Рис.3.17 - Колірна шкала.

3.4.3.1. Обґрунтування ефективності кодування RGB-пікселів кольорових зображень у базисах Радемахера та Крестенсона.

Особливістю кодування даних у базисі Радемахера та виконання логіко-арифметичних операцій над двійковими кодами є наявність операції наскрізного переносу.

Під час виконання операції додавання та множення в базисі Радемахера суттєво знижується швидкодія алгоритмів обчислень пропорційно зростанню розрядності двійкових чисел.

Реалізація арифметико-логічних операцій додавання, піднесення до квадрату, множення та визначення модульних різниць, згідно модульної арифметики ТЧБ Крестенсона та системи числення залишкових класів, виконується паралельно за два мікротакти незалежно від розрядності чисел (рис.3.15)

Обґрунтований спосіб кодування RGB-пікселів у базисі Крестенсона дає змогу замінити вектори  $P_1, P_2, P_3$  одним вектором  $P_0$ , розрядність якого становить 24 біти і дорівнює розрядності кодів RGB-системи, тобто можна реалізувати представлення RGB-пікселів у Хеммінговому просторі (рис.3.18) [97, 148].

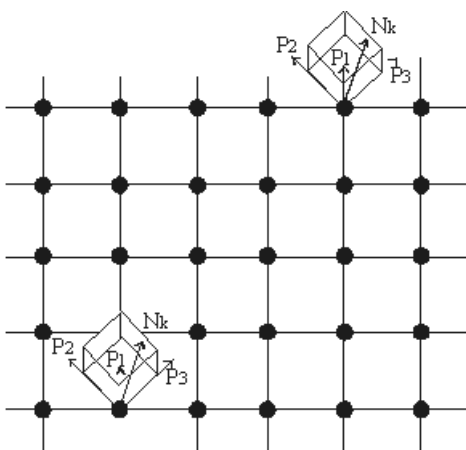


Рис.3.18 - Представлення RGB-пікселів у Хеммінговому просторі.

Представлення цифрових даних у ТЧБ Радемахера-Крестенсона та особливо Хаара-Крестенсона, які базуються на математичних основах модульної арифметики та системи числення залишкових класів, дають змогу на 2-3 порядки підвищити швидкодію виконання алгоритмів згідно з виразами (3.2) незалежно від розрядності чисел, а саме:

- кожної операції додавання  $x_i + x_j$  та множення  $x_i \times x_j$  - за 2 мікротакти;
- операції піднесення до квадрату - за 1 мікротакт;
- операції визначення квадрату різниці  $[x_i - x_j]^2$  - за 3 мікротакти;
- операції модульної різниці  $|x_i - x_j|$ , яка може бути реалізована шляхом сканування масиву квадратів  $(x_i - x_j)^2$  СЗК з представленням модульних



різниць у базисі Хаара-Крестенсона на основі вентильних матриць, що є можливим для  $0 \leq x_i \leq 255$  - за 21 мікротакт.

3.4.4. Методи поліфункціональної структуризації пікселів кольорових зображень у ТЧБ розширених полів Галуа.

3.4.4.1. Метод кодування пікселів RGB-стандарту у базисах Радемахера та Крестенсона.

Кодування кольорів пікселів у Хеммінговому просторі монітора, заданому у декартових координатах, можна однозначно представити у системі залишкових класів ТЧБ Крестенсона. Таке представлення реалізується за допомогою задання трьох взаємно простих модулів  $(P_1, P_2, P_3)$ , які дають змогу однозначно закодувати у двійковій системі числення ТЧБ Радемахера кожен піксель RGB-системи шляхом виконання прямого цілочисельного перетворення СЗК (рис.3.18) згідно з виразом [97, 140, 162]:

$$N_k = \text{res} \sum_{i=1}^3 b_i \cdot B_i \pmod{P_0}, \quad (3.4)$$

де  $B_i$  — ортогональні базиси СЗК, які розраховують згідно з діофантовими рівняннями:

$$\begin{aligned} B_1 &= P_2 \cdot P_3 \cdot m_1 \equiv 1 \pmod{P_1}; \\ B_2 &= P_1 \cdot P_3 \cdot m_2 \equiv 1 \pmod{P_2}; \\ B_3 &= P_1 \cdot P_2 \cdot m_3 \equiv 1 \pmod{P_3}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

де  $m_1, m_2, m_3$  — обернені елементи кодової системи СЗК [300],

$P_0 = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$  — діапазон кодування пікселя кольорового зображення з розрядністю  $K_0 = \hat{E}[\log_2 P_0]$ ,  $\hat{E}[\bullet]$  — цілочисельна функція з округленням до більшого цілого.

Однозначне кодування RGB-пікселів у базисі Радемахера-Крестенсона забезпечують шляхом вибору наступних значень діапазону кодування залишків  $b_i$  у базисі Радемахера [199]:

$$b_1 = b_R; \quad 0 \leq b_R \leq 255; \quad (00000000 \div 11111111);$$

$$b_2 = b_G; \quad 0 \leq b_G \leq 255; (00000000 \div 11111111);$$

$$b_3 = b_B; \quad 0 \leq b_B \leq 255; (00000000 \div 11111111).$$

Крім того, з урахуванням коефіцієнтів  $m = 1.0$ ,  $n = 4.5907$ ,  $p = 0.0601$  (3.3), для найбільш насиченого зеленого кольору діапазон його зміни можна задати у діапазоні  $0 \leq b_G \leq 254$ , що дає змогу забезпечити взаємну простоту модулів  $P_1 = 256$ ,  $P_2 = 255$ ,  $P_3 = 257$ .

Для перевірки взаємної простоти обраної системи модулів розкладемо їх на множники:  $256 = 2^8$ ,  $255 = 5 * 51$ ,  $257$  — просте число, тобто  $P_0 = 16776960$ , де  $P_0 < 2^{24} = 16777216$ . Отже, задоволено умову формування 24 розрядного коду пікселя у базисі Радемахера-Крестенсона.

У двійковій системі числення базису Радемахера коди модулів мають таке представлення [199]:

$$P_1 = 100000000_{(2)}; P_2 = 11111111_{(2)}; P_3 = 100000001_{(2)}.$$

$$\text{Тоді } P_0 = 1111111111111111100000001_{(2)}.$$

Оскільки серед модулів  $P_1, P_2, P_3$  є модуль  $P_1 = 2^8$ , то залишок числа  $N_k$  ( $G$  — ознаки кольору), згідно із зворотним перетворенням СЗК, буде представлений без декодування 8-ма молодшими розрядами числа  $N_k$ , представленою у базисі Радемахера.

Згідно з рішенням діофантових рівнянь (3.5) отримуємо такі значення обернених елементів  $m_i$  та базисних чисел  $B_i$ :

$$m_1 = 255, \quad B_1 = 16711425; \quad m_2 = 128, \quad B_2 = 8421376; \quad m_3 = 129, \\ B_3 = 8421120.$$

Перевірку правильності розрахунків даних перетворення СЗК виконуємо згідно з рівнянням:

$$N_k = (b_R \cdot B_1 + b_G \cdot B_2 + b_B \cdot B_3) \cdot (\text{mod } P_0) = 1 \text{ при } b_R = 1, b_G = 1, b_B = 1,$$

$$\text{тобто, } N_k = (1 \cdot 16711425 + 1 \cdot 8421376 + 1 \cdot 8421120) \cdot (\text{mod } P_0) = 1.$$

Нехай, наприклад:  $R = 10$ ,  $G = 200$ ,  $B = 100$ .

Тоді

$$N_k = (10 \cdot 16711425 + 200 \cdot 8421376 + 100 \cdot 8421120) \cdot (\text{mod } 16776960) = 9187850,$$

що відповідає двійковому представленню RGB-пікселя у базисі Крестенсона (100011000011001000001010<sub>2</sub>).

Декодування такого представлення RGB-пікселя має наступний вигляд:

$$r_i = \text{res}N_k (\text{mod } P_1); \quad g_i = \text{res}N_k (\text{mod } P_2); \quad b_i = \text{res}N_k (\text{mod } P_3) \quad [199].$$

3.4.4.2. Метод кодування пікселів кольорових зображень у ТЧБ Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона.

Кодування пікселів кольорових зображень у стандарті RGB здійснюється 24-розрядним двійковим кодом, де інтенсивності кожного з кольорів представляють 8-бітними двійковими кодами базису Радемахера [97, 199]:

$$R \left\{ \begin{array}{l} r_{8-1} \\ \dots \\ r_i \\ \dots \\ r_0 \end{array} \right. ; \quad G \left\{ \begin{array}{l} g_{8-1} \\ \dots \\ g_i \\ \dots \\ g_0 \end{array} \right. ; \quad B \left\{ \begin{array}{l} b_{8-1} \\ \dots \\ b_i \\ \dots \\ b_0 \end{array} \right. ;$$

$$0 \leq r_i \leq 255; \quad 0 \leq g_i \leq 255; \quad 0 \leq b_i \leq 255.$$

Кодування RGB-пікселів кольорових зображень у ТЧБ Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона виконуємо шляхом вибору системи взаємно простих модулів  $(P_1, P_2, P_3)$ , добуток яких перевищує діапазон квантування значень яскравості  $(r_i, g_i, b_i)$ . Цю умову може задовольняти різний набір модулів дискретного перетворення СЗК, наприклад:  $P_1 = 5, P_2 = 7, P_3 = 8$ , який забезпечує однозначне кодування яскравостей  $r_i, g_i$  та  $b_i$  у діапазоні  $P_0 = 5 * 7 * 8 = 280 > 255$  [97, 199]. При цьому формується наведена нижче кодова структура у базисі Радемахера-Крестенсона, яка однозначно представляє відповідний код RGB-пікселя:

$$R \vee G \vee B \left\{ \begin{array}{l} a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} d_2 \\ d_1 \\ d_0 \end{array} \right.$$

$$P_1 = 5; \quad P_2 = 7; \quad P_3 = 8,$$

де  $a_i \in \overline{0,1}$ ;  $c_i \in \overline{0,1}$ ;  $d_i \in \overline{0,1}$ ;  $i \in \overline{0,2}$ .

Схема представлення RGB-пікселя у векторному просторі системи залишкових класів показана на рис.3.19.

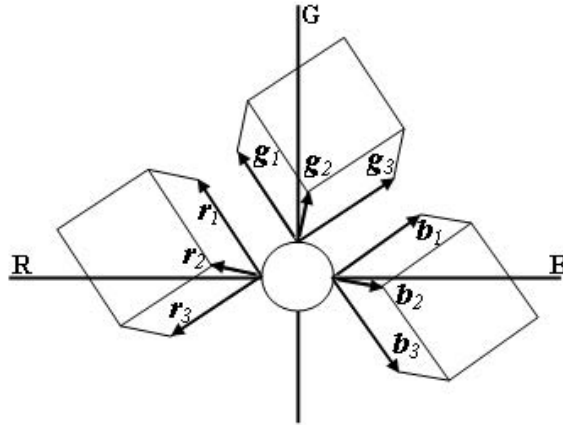


Рис.3.19 - Представлення RGB-пікселя у векторному просторі системи залишкових класів.

При цьому кожне значення  $a_i, c_i, d_i$  розраховують як залишок згідно з виразами:  $a_i = \text{res}(r_i \text{ mod } P_1)$ ,  $c_i = \text{res}(g_i \text{ mod } P_2)$ ,  $d_i = \text{res}(b_i \text{ mod } P_3)$ .

Для заданого набору модулів розраховуємо обернені елементи  $m_i$  та базисні числа  $B_i$  згідно з рішеннями діофантових рівнянь (3.5), отримаємо:

$$m_1 = 1; B_1 = 56; m_2 = 3; B_2 = 120; m_3 = 3; B_3 = 105. \quad (3.6)$$

Виконаємо перевірку правильності отриманих значень  $m_i$  та  $B_i$  згідно з виразом (3.4):  $N_1 = (1 \cdot 56 + 1 \cdot 120 + 1 \cdot 105) \text{ mod } 280 = 1$ .

Розглянемо приклад. Нехай задано значення інтенсивностей кольорів RGB-пікселя  $r_i = 10$ ;  $g_i = 100$ ;  $b_i = 37$ .

Тоді отримаємо коди RGB-пікселя у базисах:

$$1. \text{ Радемахера: } r_i = 00001010_{(2)}; g_i = 01100100_{(2)}; b_i = 00100101_{(2)}.$$

$$2. \text{ Радемахера-Крестенсона: } r_i = \overbrace{(000011010)}^{P_1 P_2 P_3}_{(5,7,8)}; g_i = \overbrace{(000010100)}^{P_1 P_2 P_3}_{(5,7,8)};$$

$$b_i = \overbrace{(010010101)}^{P_1 P_2 P_3}_{(5,7,8)}.$$

Представлення коду RGB-пікселя у базисі Хаара-Крестенсона [97, 199] для кожного значення інтенсивності  $r_i$ ,  $g_i$  та  $b_i$  виконується згідно з такою структурою:

$$R \vee G \vee B \left\{ \begin{array}{l} a_{P_1-1} \\ \dots \\ a_i \\ \dots \\ a_0 \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} c_{P_2-1} \\ \dots \\ c_i \\ \dots \\ c_0 \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} d_{P_3-1} \\ \dots \\ d_i \\ \dots \\ d_0 \end{array} \right. ;$$

$$P_1 = 5; \quad P_2 = 7; \quad P_3 = 8,$$

де  $i \in \overline{0, P_i - 1}$ .

Для заданих значень інтенсивності кольорів RGB-пікселя  $r_i = 10$ ;  $g_i = 100$ ;  $b_i = 37$  отримаємо відповідну структуру коду у базисі Хаара-Крестенсона:

$$r_i = (10000..0001000..00100000);$$

$$g_i = (10000..0010000..00100000);$$

$$b_i = (00100..0010000..00000100).$$

Представлення цифрових значень яскравостей кольорів  $r_i$ ,  $g_i$  та  $b_i$  у різних ТЧБ зумовлює відповідно різну розрядність структур кодів згідно з виразами:

1. У базисі Радемахера (R):

$$K_R = \log_2 2^8 = 8 \text{ біт.}$$

2. У базисі Радемахера-Крестенсона (R-C):

$$K_{R-C} = \sum_{i=1}^3 [\hat{E}(\log_2 P_i - 1)] = 3 + 3 + 3 = 9 \text{ біт.}$$

3. У базисі Хаара-Крестенсона (H-C):

$$K_{H-C} = \sum_{i=1}^n P_i = 5 + 7 + 8 = 20 \text{ біт.}$$

3.4.4.3. Метод кодування зразків кольороутворення у стандартних мішенях.

Стандартна мішень IT8.7/2.

Розглянемо процеси структуризації даних у базисах Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона під час кодування стандартних мішеней кольороутворення [262]. Колірна шкала мішені IT8.7/2 для номерів від 1 до 22, числа індексів від A до L (12) та 22 відтінків сірого, що утворює 286 колірних зразків. Колірні зразки від A20 до L22 не регламентуються стандартом IT8.7/2 і можуть бути заповнені на розсуд виробника. Так, фірма Kodak розміщує тут 12 контрольних кольорів. Таким чином, загальне число колірних зразків цієї стандартної мішені (з урахуванням 12 контрольних) становить 262 колірних зразки. Таким чином, кодування цієї мішені не виходить за межі діапазону кодування чисел у базисах Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона з аналогічним набором модулів кодування RGB-пікселів ( $P_1 = 5, P_2 = 7, P_3 = 8$ ), добуток яких перевищує число колірних зразків мішені ( $280 > 262$ ). Отже, кодування цієї колірної мішені у базисах Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона буде виконуватися згідно з розрахованими оберненими елементами  $(m_1, m_2, m_3)$  і базисними числами  $(B_1, B_2, B_3)$  (3.5), а відповідна розрядність кодів Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона становитиме 9; 9 та 20 біт.

Стандартна мішень Color Checker SG.

Кодування колірної мішені стандарту Color Checker SG виконується аналогічно з використанням номерів від 1 до 10 та індексів від A до N (14) і в результаті забезпечує 140 колірних зразків. Кодування зразків цієї колірної мішені у базисі Радемахера не перевищує 8 біт розрядності двійкових чисел. При системі взаємнопростих модулів базису Радемахера-Крестенсона  $P_1 = 4, P_2 = 5, P_3 = 7$ , що задовольняє умову однозначного кодування колірних зразків мішені стандарту Color Checker SG ( $P_0 = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = 140$ ) необхідна розрядність коду 8 біт, а у базисі Хаара-Крестенсона ( $P_1 + P_2 + P_3 = 16$ ) становить 16 біт.

Збільшення розрядності структур кодів, якими представлено RGB-пікселі кольорових зображень, є доцільним і ефективним для прискорення подальших логічних або обчислювальних операцій над RGB-кодами. Такі операції виконуються у процесі перетворень для різних стандартів кольороутворення, цифрового телебачення, друку типу дисплеїв, модемів, принтерів тощо [261, 262]. При цьому основна перевага кодів Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона, як показано у роботах [300, 301], полягає у суттєвому (на 2-3 порядки) збільшенні швидкодії обчислень у зазначених кодах на основі модульної арифметики порівняно з двійковими кодами базису Радемахера, де застосовуються операції з наскрізними переносами.

Наприклад, виконання операції додавання двох 32-розрядних двійкових чисел потребує понад 100 мікротактів, операції множення - більше 500 мікротактів, а виконання аналогічних операцій у базисі Хаара-Крестенсона незалежно від розрядності виконується за 2 мікротакти.

Вказана перевага базису Хаара-Крестенсона реалізується шляхом застосування швидкодіючого АЦП паралельного типу з розширеними функціональними можливостями, запропонованого авторами в патенті України №116176 [190].

Поліфункціональне кодування RGB-пікселів у базисах Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона є доцільним на рівні аналого-цифрового перетворення інтенсивностей аналогових сигналів RGB-сенсорів. Такий принцип поліфункціональної структуризації даних у галузі кольороутворення здійснюється з використанням АЦП паралельного типу [149].

#### 3.4.5. Спосіб криптозахисту ПФД у ТЧБ Галуа.

Формування кодів поля Галуа згідно системи квазіортогональних функцій (рис.Д.9) та кодового вектора (рис.Д.10) здійснюється згідно рекурентної послідовності на основі відповідного кодового ключа:

$$X_{i+1} = \sum_{i=1}^n (X_i \oplus X_{i-j}), \quad (3.7)$$

де  $\oplus$  - символ додавання по mod 2;

$n$  – кількість пар елементів кодового ключа.

Система кодових ключів визначається згідно незвідних примітивних поліномів  $\pi(x) = x^r + f(x)$  степенів  $r$  і характеристик  $p$  (табл..3.4). [51].

Таблиця 3.4 – Незвідні примітивні поліноми  $\pi(x) = x^r + f(x)$  степенів  $r$  і характеристик  $p$ .

$p$	$r$	$\pi(x); [x^r = f(x)]$	$p$	$r$	$\pi(x); [x^r = f(x)]$
2	2	$x^2 + x + 1$	2	17	$x^{17} + x^3 + 1$
	3	$x^3 + x + 1; x^3 + x^2 + 1$		18	$x^{18} + x^7 + 1$
	4	$x^4 + x + 1$		19	$x^{19} + x^5 + x^2 + x + 1$
	5	$x^5 + x^2 + 1$		20	$x^{20} + x^3 + 1$
	6	$x^6 + x + 1$		21	$x^{21} + x^2 + 1$
	7	$x^7 + x + 1; x^7 + x^3 + 1$		22	$x^{22} + x + 1$
	8	$x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$		23	$x^{23} + x^5 + 1$
	9	$x^9 + x^4 + 1$		24	$x^{24} + x^7 + x^2 + x + 1$
	10	$x^{10} + x^3 + 1$		25	$x^{25} + x^3 + 1$
	11	$x^{11} + x^2 + 1$		26	$x^{26} + x^6 + x^2 + x + 1$
	12	$x^{12} + x^6 + x^4 + x + 1$	3	2	$x^2 + x + 2; [x^2 = 2 \cdot x + 1]$
	13	$x^{13} + x^4 + x^3 + x + 1$		3	$x^3 + 2 \cdot x + 1; [x^3 = x + 2]$
	14	$x^{14} + x^{10} + x^6 + x + 1$		4	$x^4 + x + 2; [x^4 = 2 \cdot x + 1]$
	15	$x^{15} + x + 1$	5	2	$x^2 + x + 3; [x^2 = 4 \cdot x + 2]$
	16	$x^{16} + x^{12} + x^3 + x + 1$	7	2	$x^2 + x + 3; [x^2 = 6 \cdot x + 4]$

Незвідні примітивні поліноми високих степенів приведені в додатку Е.



Приклад генерування коду Галуа  $GF\left(\begin{smallmatrix} 5 \\ 2 \end{smallmatrix}\right)$  представлений наступною біт-орієнтованою послідовністю (рис.3.20) [302]:

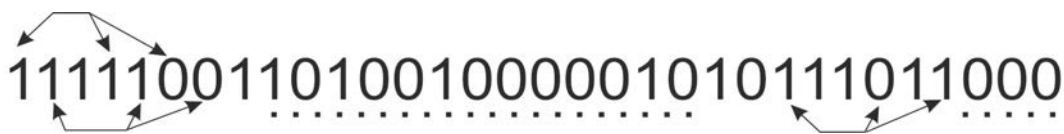


Рис.3.20 - Формування коду Галуа при  $n = 5$ .

Крім лінійних кодів Галуа, існують також спіральні коди Галуа (рис.3.21), характеристики яких описані в роботі [303].

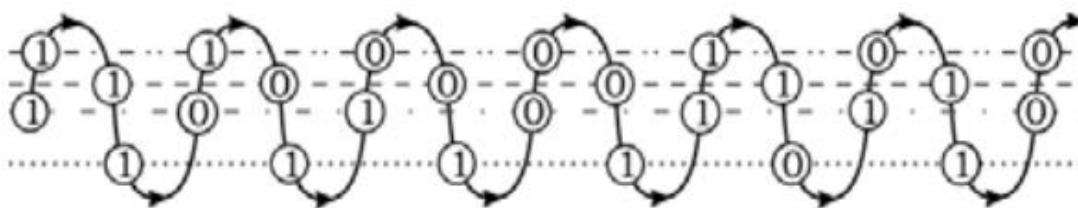


Рис.3.21 – Сигнальний код Галуа, заповнений у вигляді спіралі.

Спіральні коди поля Галуа дозволяють здійснювати виявлення та виправлення помилок в кодах з набагато більшою розрядністю у порівнянні з лінійними.

### 3.4.5.1. Розробка методу криптозахисту RGB-пікселів кольорових зображень.

Криптозахист RGB-пікселів зображень здійснюють з метою обмеження несанкціонованого доступу до кольорових зображень, які формуються в реальному часі, кодуються в різних системах числення, передаються каналами зв'язку, реєструються у накопичувачах баз даних та відображаються на моніторах користувачів. Існують різні методи криптозахисту файлів даних окремих кольорових зображень та масивів даних, що представляють певні об'єми кольорових зображень. При цьому в інформаційних системах використовуються стандартні алгоритми захисту масивів даних від

несанкціонованого доступу, побудовані на основі хешування, симетричних та асиметричних алгоритмів RSA, еліптичних кривих тощо [304, 305].

Запропоновано метод шифрозахисту окремих RGB-пікселів кольорових зображень, представлених кодами Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона з використанням зазначених методів. При цьому структуризовані коди Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона є проблемно-орієнтованими на підвищення швидкодії подальших операцій перетворення, опрацювання та розпізнавання зображень згідно з модульною арифметикою системи числення залишкових класів базису Крестенсона.

Як базовий метод криптозахисту кодів RGB-пікселів доцільно застосувати ефективний метод на основі процедур хешування окремих розрядів їхніх кодів та логічного складання з бітами генерованих послідовностей Галуа згідно з графами [306]:

$$\begin{array}{cccc}
 a_n & a_{n-1} & \dots & a_i & \dots & a_0 \\
 \swarrow & & & \searrow & & \\
 b_n & b_{n-1} & \dots & b_i & \dots & b_0 \\
 \oplus & \oplus & & \oplus & & \oplus \\
 G_{n+j} & G_{n-1+j} & \dots & G_{i+j} & \dots & G_{0+j} \\
 \hline
 (P_n & P_{n-1} & \dots & P_i & \dots & P_0) = \{PX\}
 \end{array} \quad (1)$$

$$\quad (2)$$

де  $a_i$  - біти Радемахера-Крестенсона або Хаара-Крестенсона кодів пікселів; 1 - операція хешування ( $b_i := b_j, i \neq j, i \in \overline{0, n}$ ),  $P_i, i \in \overline{0, n}$  - утворений код криптозахисеного пікселя  $PX$ .

Рекурентні властивості кодів поля Галуа дозволяють генерувати псевдовипадкові послідовності високої степені  $2^{32}$  і більше. Модульне додавання таких псевдовипадкових послідовностей до інформаційних двійкових кодів дозволяє ефективно захищати дані від несанкціонованого доступу. Наприклад, при кодуванні RGB-пікселів кольорових зображень До отриманого 24-х бітного коду рекурентно додаємо по mod2 24-х бітний код модульної суми двох кодів поля Галуа згідно виразу:

$$\begin{array}{cccccccccccccccc}
 (r_7 & r_6 & r_5 & \dots & r_0) & (g_7 & g_6 & \dots & g_0) & (b_7 & b_6 & \dots & b_0) \\
 \oplus & \oplus & \oplus & & \oplus & \oplus & \oplus & & \oplus & \oplus & \oplus & & \oplus \\
 G_i & G_{i-1} & G_{i-2} & \dots & G_{i-7} & G_{i-8} & G_{i-9} & \dots & G_{i-15} & G_{i-16} & G_{i-17} & \dots & G_{i-24}
 \end{array} \Rightarrow (a_0, a_1, \dots, a_{23})$$

При відтворенні коду пікселя кольорового зображення рекурентно до коду  $(a_0, a_1, \dots, a_{23})$  по mod 2 додаються біти коду поля Галуа та отримуємо код  $r_7r_6r_5r_4r_3r_2r_1r_0g_7g_6g_5g_4g_3g_2g_1g_0b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0$ . Звідси за допомогою ПЗП, де міститься секретний ключ коду Галуа, з кодів Радемахера-Крестенсона  $(r_7r_6r_5r_4r_3r_2r_1r_0)$ ,  $(g_7g_6g_5g_4g_3g_2g_1g_0)$  та  $(b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0)$  відтворюють дешифрований RGB-код пікселя.

Генерація бітів кодів Галуа  $\{G_i\}$  виконується згідно з таємними ключами. Позитивним результатом запропонованого методу [199] є ефективний шифрозахист пікселів кольорових зображень на основі сумісного застосування алгоритмів високої швидкодії у залишкових класах та рекурентних кодів поля Галуа [51].

Обґрунтовано актуальність розроблення теорії, методів та алгоритмів кодування пікселів кольорових зображень та їх представлення у різних теоретико-числових базисах, що дає змогу підвищити швидкодію алгоритмів перетворення, опрацювання та розпізнавання цифрових зображень на основі математики арифметичних операцій непозиційної системи числення залишкових класів.

Запропоновано здійснювати структуризоване кодування пікселів кольорових зображень у кодах непозиційних систем числення Радемахера-Крестенсона, Хаара-Крестенсона та Галуа, що забезпечує підвищення швидкодії виконання обчислювальних алгоритмів перетворення та опрацювання зображень на 2-3 порядки.

### 3.4.5.2. Метод криптозахисту кодів дорожніх знаків.

Рекурентну послідовність бітів Галуа можливо використати для дистанційного передавання коду дорожнього знаку. При цьому існує можливість контролю та виправлення помилок. Дистанційно прийняті коди у

приймачі порівнюються з еталонними, перевіряються на безпомилковість і відображаються на моніторі водія у вигляді еталонних зображень державної системи дорожніх знаків [201].

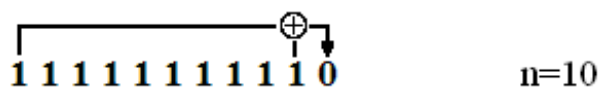
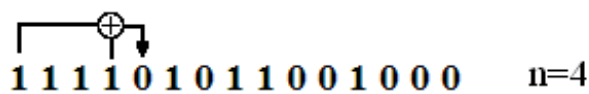
Код Галуа який відповідає типу знаку дозволяє виявити та визначити можливі помилки, які виникають у процесі, в генеруючому чи прийнятому коді знаку, можуть встановити старіння генератора, помилки або умисного надсилання генератора та впливу атмосферних завад.

Генератор коду Галуа здійснює рекурентну систему послідовності бітів згідно виразу:

$$G_{i+1} = G_i \oplus G_{i-n}$$

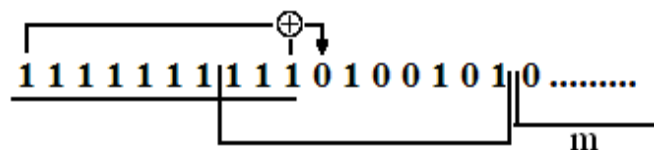
де  $G_{i+1}$  – вихідні біти коду Галуа;  $G_i$  та  $G_{i-n}$  – відповідно поточний та віддалений на  $n$ -позицій біт Галуа [201].

Наприклад генерування  $n$ -розрядного коду Галуа  $i \in \overline{1, 2^n}$  виконується згідно графу ( $n = 10$ ).



де  $\oplus$  – операція по mod 2, яка реалізує XOR.

При  $n = 10$  відповідно



$n$  – код який відповідає типу дорожнього знаку;

$m$  – кількість контрольних бітів, які дозволяють виявити та виправити помилки у прийнятому коді Галуа.

Таким чином, автоматизоване розпізнавання дорожнього знаку та його відображення у завадозахищеному рекурентному коді поля Галуа з можливістю надійної ідентифікації відповідного типу знаку в умовах дії атмосферних завад, при наявності поганої видимості, дощу, снігу, туману, пилу, просторового

розміщення та якості зображення дорожнього знаку, надає можливість підвищити безпеку руху транспорту на автошляхах та автомагістралях.

3.5. Теоретичні основи структуризації та розпізнавання образів у Хеммінговому просторі.

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

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.

Теорія розпізнавання образів базується на оцінках Евклідової відстані між  $i$ -тим і  $j$ -тим об'єктами (тобто мірою схожості, близькості об'єктів між собою за всією сукупністю використовуваних ознак), метрики Мінковського, що фактично є великим сімейством метрик і включає в себе звичайну Евклідову відстань, манхеттенську відстань, яка є сумою модулів різниць відповідних ознак об'єктів, метрики "домінування", або Sup-метрики. Достатньо важливою є також так звана відстань Махаланобіса, яка має достатньо специфічні властивості [307]. У разі використання дихотомічних (що мають всього два значення) якісних ознак образів широко використовується зважена відстань Хеммінга.

Відомі методи вузькоспеціалізовані і не характеризуються універсальністю до різних образів. 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. 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 взаємокореляційних функцій та можливостей кодування даних у різних ТЧБ.

Досвід досліджень наукової школи Я.М. Николайчука, які охоплюють успішне вирішення задач суттєвого спрощення алгоритмів, зменшення апаратної складності та підвищення швидкодії цифрових процесорів кореляційного опрацювання сигналів, створює позитивні умови застосування методів кореляційного розпізнавання образів для багатьох класів джерел інформації [50, 51, 150].

Класично, виділяють наступні методи розпізнавання образів [307]: перебору, в цьому випадку проводиться порівняння з базою даних, де для кожного виду об'єктів представлені всі можливі модифікації відображення; аналізу та диференціації компонентів образу; використання штучних нейронних мереж; використання генетичних алгоритмів.

Метод перебору характеризується найбільшою обчислювальною та часовою складністю і може застосовуватись в тому випадку, коли число класів образу є скінчене, тобто не перевищує заданого числа.

Метод аналізу та диференціації компонентів образу характеризується поліноміальною складністю, базується на теорії моделювання в байєсівському підході та в застосуванні кодових відліків Хеммінгового простору.

Метод використання штучних нейронних мереж базується на принципах навчання та рекурсивної асимптотичної складності.

Методи на основі використання генетичних алгоритмів базуються на принципах еволюційного пошуку й поєднують комп'ютерне моделювання генетичних процесів у природних і штучних системах [307].

Важливим компонентом методів та інформаційних технологій розпізнавання образів є попереднє їх опрацювання та перетворення вхідних

даних, до якого належать методи: алгебраїчний, структурний, геометричний, статистичний, кореляційний, спектральний, на базі нечітких множин, просторово-зв'язаних процесів.

Серед зазначених методів перспективу складає структурний метод, який успішно застосовується в теорії мереж Петрі та при оцінці структури матричних моделей руху даних [96]. Окрім цих застосувань доцільно розширити сферу застосування даного методу в галузі розпізнавання образів. Але для цього необхідно розвивати критерії та теорію оцінок структурної складності. Формалізація відомих методів розпізнавання одномірних образів описується наступними функціоналами (табл.3.5)[307]:

Таблиця 3.5 - Формалізація методів розпізнавання одномірних образів

№	Тип оцінки	Аналітичний вираз
1	Евклідова відстань	$d_{ij} = \left( \sum_{k=1}^z (x_{ik} - x_{jk})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$
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.	Відстань Чебишова	$d_{ij} = \max \sum_{k=1}^z  x_{ik} - x_{jk} $

В таблиці 3.5:  $d_{ij}$  – значення Евклідової відстані між  $i$ -тим і  $j$ -тим об'єктами;  $x_{ik}$  – чисельне значення  $k$ -ої ознаки для  $i$ -того об'єкту;  $x_{jk}$  – чисельне значення  $k$ -тої ознаки для  $j$ -того об'єкту;  $z$  – кількість ознак, якими описуються об'єкти.

Розширена Хеммінгова віддаль може застосовуватися в різноманітних галузях знань, до яких відносять наступні теорії: сигналів, інформації,

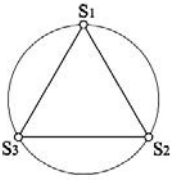
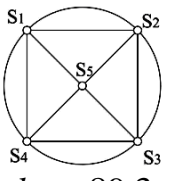
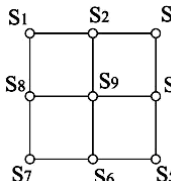
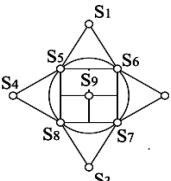
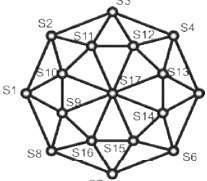
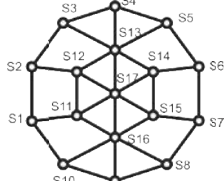
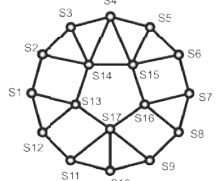
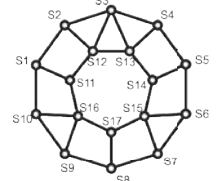
випадкових процесів, кодування моделей джерел інформації та руху даних, графічних образів, а також аудіо і відео зображень та схемотехніки.

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.

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 [201].

Прикладом оптимальних сигнальних просторів для сукупностей сигналів  $M = 2^k$  та  $M = 2^k + 1$  наведені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Структурна складність ансамблів двомірних просторів з числом сигналів  $M = 3,5,9,17$ .

Двомірні простори з числом сигналів $M=3,5,9,17$			
 <p><math>k_c = 51,4</math></p>	 <p><math>k_c = 89,3</math></p>	 <p><math>k_c = 141,9</math></p>	 <p><math>k_c = 164,6</math></p>
 <p><math>k_c = 355,7</math></p>	 <p><math>k_c = 330,7</math></p>	 <p><math>k_c = 329,8</math></p>	 <p><math>k_c = 327,8</math></p>

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 (рис.3.22) [161].



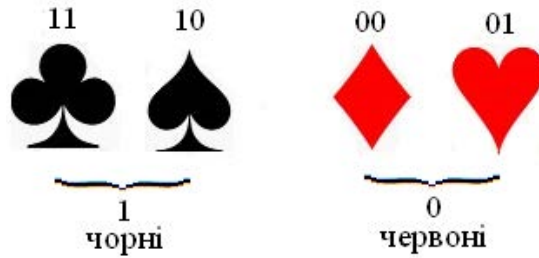


Рис.3.22 - Символічні базові зображення атрибутів гральних карт та їх двійкові коди.

На рис.3.23 запропонований спосіб кодування символіки гральних карт, на основі яких можна показати Хеммінгову відстань між ними.

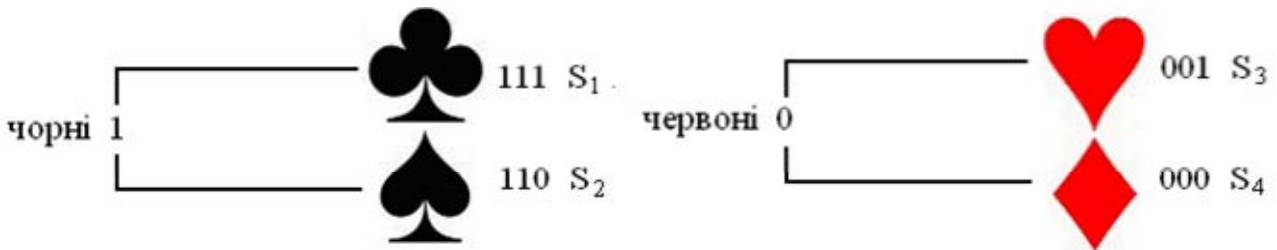


Рис.3.23 - Система кодування символіки гральних карт.

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

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

Такі структурні елементи застосовуються для розрахунку Хеммінгової віддалі між 4-ма класами зображень маючи компоненти та два кольори  - червоний і  - чорний [161].

Структурна складність компонентів приведена на рис.3.24.

$k_c = 9,4$	$k_c = 9,4$	$k_c = 9,4$	$k_c = 9,4$	$k_c = 7,2$	$k_c = 7,2$	$k_c = 9,6$
$k_c = 9,6$	$k_c = 10,8$	$k_c = 8,2$	$k_c = 8,2$	$k_c = 10,8$	$k_c = 8,2$	$k_c = 8,2$

Рис.3.24 - Оцінка структурної складності компонентів елементів символіки гральних карт.

Оцінка Хеммінгової віддалі є результатом розрахунку модульної різниці між наборами структурних компонентів пар символів.









Застосування структурної складності компонентів символів та визначення модульних різниць між окремими структурами має ефективне застосування при вирішенні задачі автоматизованого розпізнавання символів дорожніх знаків у процесі руху автотранспортних засобів.

Розрахунок структурної складності дорожніх знаків наведений на прикладі знаків пріоритету (табл..3.7) та наказових знаків (табл..3.8).









Таблиця 3.7 - Оцінка структурної складності знаків пріоритету

					
<b>2.1</b> Дати дорогу	<b>2.2</b> Пройзд без зупинки заборонено	<b>2.3</b> Головна дорога	<b>2.4</b> Кінець головної дороги	<b>2.5</b> Перевага зустрічного руху	<b>2.6</b> Перевага перед зустрічним рухом
$k_c = 7$	$k_c = 59$	$k_c = 19$	$k_c = 24$	$k_c = 9,2$	$k_c = 17$

Таблиця 3.8 - Оцінка структурної складності наказових знаків

							
<b>4.1</b>	<b>4.2</b>	<b>4.3</b>	<b>4.4</b>	<b>4.6</b>	<b>4.7</b>	<b>4.8</b>	<b>4.9</b>
$k_c = 14,2$	$k_c = 14,2$	$k_c = 14,2$	$k_c = 19,2$	$k_c = 19,2$	$k_c = 14,2$	$k_c = 14,2$	$k_c = 17,2$

Продовження таблиці 3.8

							
<b>4.10</b>	<b>4.11</b>	<b>4.12</b>	<b>4.13</b>	<b>4.14</b>	<b>4.15</b>	<b>4.16</b>	<b>4.17</b>
$k_c = 20,8$	$k_c = 21,2$	$k_c = 21,2$	$k_c = 21,2$	$k_c = 41,2$	$k_c = 31,2$	$k_c = 19,2$	$k_c = 23,2$

Проведені дослідження теоретичних основ структуризації та розпізнавання образів у Хеммінговому просторі дозволили встановити, що у якості базових методів визначення Хеммінгової віддалі використовуються оцінки різницевих модульних одиниць та структурної складності образів. Встановлено, що важливим компонентом методів та інформаційних технологій розпізнавання образів є попереднє їх опрацювання та перетворення вхідних даних, до яких належать алгебраїчний, кореляційний, структурний, спектральний, геометричний, на базі нечітких множин, статистичний, просторово-зв'язаних процесів методи.

На основі проведених теоретичних досліджень виконані розрахунки оцінок Хеммінгової віддалі та структурної складності характеристик образів на прикладах сигнальних просторів  $2^k + 1$  ансамблів та амплітудно-фазових сигналів, стилізованих зображень символів гральних карт та системи державних дорожніх знаків. Виконані розрахунки структурної складності окремих груп знаків дозволили розрахувати оцінки Хеммінгової віддалі між ними та розробити рекомендації по вдосконаленню їх структурних зображень.

### Висновки до третього розділу

1. Вперше розроблені основи теорії структуризації поліфункціональних компонентів складних комп'ютерних систем, здійснений диференційний аналіз елементів структур складних систем, визначені класи елементів у якості елементарних структурних одиниць складних обчислювальних та мережевих середовищ. Класифіковані та структурно ідентифіковані інформаційні, матеріальні, енергетичні, електромагнітні, оптико-енергетичні та інші зв'язки, за допомогою яких елементи складних систем взаємодіють з середовищами ресурсів та користувачів. Систематизовані неповнофункціональні, транзитні та повнофункціональні елементи з різними типами інформаційно-взаємодіючих зв'язків.

Розроблені основи теорії структуризації даних обумовили базу для розвитку сучасних методів та засобів ідентифікації, перетворення та використання поліфункціональних інформаційних повідомлень, представлених структуризованими даними.

2. Вперше розроблені теоретичні основи кодування структуризованих даних у теоретико-числових базисах: унітарному, Радемахера, Крестенсона, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона. Викладені теоретичні засади формування та кодування пікселів у двовимірних структурах напівтонових зображень. Визначені кількісні оцінки квантів структурної складності такого класу даних. Класифіковані первинні структури об'єднань пікселів у вигляді ліній різної направленості, двовимірних матриць та їх пересічень.

3. Викладені теоретичні основи арифметико-логічних операцій у базисах Радемахера та Крестенсона. Обґрунтовано актуальність розроблення теорії, методів та алгоритмів кодування пікселів кольорових зображень та їх представлення у різних теоретико-числових базисах. Це дало змогу підвищити швидкодію алгоритмів перетворення, опрацювання та розпізнавання цифрових зображень на основі математики арифметичних операцій непозиційної системи числення залишкових класів.

Запропоновано здійснювати структуризоване кодування пікселів кольорових зображень у кодах непозиційних систем числення Радемахера-Крестенсона, Хаара-Крестенсона та Галуа, що забезпечує підвищення швидкодії виконання обчислювальних алгоритмів перетворення та опрацювання зображень на 2-3 порядки.

4. Вперше розроблені методи кодування пікселів кольорових зображень у базисах Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона. Розраховані набори взаємно-простих модулів для RGB-стандарту колірному простору Adobe RGB, колірної шкали ColorChecker SG. Обґрунтований спосіб кодування RGB-пікселів у базисі Крестенсона дає змогу замінити вектори  $P_1, P_2, P_3$  одним вектором  $P_0$ , розрядність якого становить 24 біта і дорівнює розрядності кодів RGB-системи, що дозволяє реалізувати представлення RGB-пікселів у

Хеммінговому просторі. Представлення цифрових даних у ТЧБ Радемахера-Крестенсона та особливо Хаара-Крестенсона, які базуються на математичних основах модульної арифметики та системи числення залишкових класів, дають змогу на 2-3 порядки підвищити швидкодію виконання алгоритмів незалежно від розрядності чисел. Такі операції виконуються у процесі перетворень для різних стандартів кольороутворення, цифрового телебачення, друку типу дисплеїв, модемів, принтерів тощо.

5. Удосконалений спосіб криптозахисту ПФД в ТЧБ Галуа на основі запропонованого методу шифрозахисту окремих RGB-пікселів кольорових зображень, представлених кодами Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона з використанням зазначених методів. При цьому структуризовані коди Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона є проблемно-орієнтованими на підвищення швидкодії подальших операцій перетворення, опрацювання та розпізнавання зображень згідно з модульною арифметикою системи числення залишкових класів базису Крестенсона.

Як базовий метод криптозахисту кодів RGB-пікселів застосований ефективний метод на основі процедур хешування окремих розрядів їхніх кодів та логічного складання з бітами генерованих послідовностей Галуа згідно з графами незвідних послідовностей.

6. На основі проведених теоретичних досліджень отримані оцінки структурної складності характеристик образів на прикладах системи державних дорожніх знаків. Виконані дослідження структурної складності окремих груп знаків дозволили розрахувати оцінки Хеммінгової віддалі між ними та розробити рекомендації по вдосконаленню їх структурних зображень.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ СТРУКТУРИЗАЦІЇ ГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ ПРИ РОЗПІЗНАВАННІ ЗБУРЕНЬ У ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАНЬ

Розроблена в дисертаційній роботі концепція структуризації ПФД та теоретичні засади структуризованих перетворень сигналів, алфавітно-цифрових даних, зображень, мережевих, мікроелектронних структур та інш. на основі статистичного, кореляційного, кластерного, ентропійного аналізів може бути ефективно застосована при вирішенні актуальних проблем оптимізації кодування, розпізнавання, організації руху та зберігання даних у РКС, що застосовуються для моніторингу технологічних процесів у різних галузях промисловості. Особливо це стосується галузей, які характеризуються підвищеним рівнем вибухо- та екологічної безпеки, наприклад об'єктів атомної, нафтогазової та енергетичної промисловостей. Розроблені алгоритми та приклади застосування методів кодування ПФД у різних ТЧБ створює широкі можливості удосконалення та суттєвого покращення відповідних алгоритмів та спецпроцесорів цифрового опрацювання інформаційних потоків в РКС. Однією з актуальних проблем такого класу є вирішення задачі цифрового опрацювання гармонічних сигналів та розпізнавання різних класів збурень у високовольтних лініях електропередач (ЛЕП).

4.1. Аналіз структурних характеристик гармонічних сигналів при виникненні перехідних процесів у високовольтних лініях електропередач.

Існуючі електроенергетичні системи є складними комплексами електротехнічного обладнання, яке розподілено розміщене на великих територіях, в яких з великою ймовірністю виникають збурення та вихід з ладу промислових засобів генерування, транспортування та споживання електроенергії.

Найбільш небезпечним в ЛЕП є замикання на землю, які можуть приводити до:

- виведення з ладу електротехнічного обладнання шляхом його дугового руйнування;
- виведення з ладу обладнання електроспоживання;
- пониження рівня напруги чи робочого струму, що спричиняє порушення технологічних процесів на підприємствах.

Успішний розвиток мікроелектроніки створив умови розвитку та широкого впровадження мікроконтролерних мікропроцесорних та спецпроцесорних засобів захисту обладнання ЛЕП від коротких замикань та накидів.

В останні два десятиріччя в Україні впроваджені засоби релейного захисту, виконані на основі цифрових принципів опрацювання сигналів та розпізнавання образів.

Відомі зарубіжні та вітчизняні фірми: ABB, Siemens, General Electric, Schneider, Teollisuuden Voima, Électricité de France, Westinghouse Electric, Релсіс, Овен, Електросвіт та інші [236-238, 244, 245, 308-313] серійно випускають та масово впроваджують мікроконтролерні засоби релейного захисту ЛЕП.

Аналіз структурних характеристик перехідних процесів в електромережах при запуску потужних електроприводів, коротких замикань та накидів приведений в додатку Є.

В роботах [97, 155, 157, 191, 314, 315] досліджені характеристики гармонічних сигналів у високовольтних ЛЕП та побудовані моделі перехідних процесів типу накидів (рис.Є.14), зміни струму при відключенні потужного споживача (рис.Є.15), запуску потужних електроприводів (ПЕД) (рис.Є.6) та коротких замикань (КЗ) (рис.Є.12, Є.13), які можуть бути різних типів.

Аналіз структури сигналів при класифікованих збуреннях високовольтних ЛЕП дозволив встановити загальні зміни характеристик гармонічних сигналів:

- при виникненні накиду та зменшенні струму навантаження змінюється тільки амплітуда гармонічного сигналу без зміни його фази та характеристик згасання його енергії;

- при запуску потужного електроприводу відбувається зміна амплітуди сигналу зі зсувом його фази без зміни форми (частотного спектру), амплітуди та енергії згасання сигналу;

- при виникненні короткого замикання змінюється фаза, амплітуда та спектр сигналу.

Проведені дослідження загальних характеристик структур сигналів під час виникнення класифікованих збурень у високовольтних ЛЕП дозволяють встановити їх належність до відповідних класів сигналів. Структурні характеристики сигналів при виникненні накидів, зменшення навантаження та запусків потужних електроприводів належать до класу детермінованих періодичних квазістаціонарних ненормованих центрованих сигналів, а при виникненні коротких замикань структури сигналів відповідають випадковим нестационарним сигналам із змінними характеристиками фази, амплітуди, частоти та енергії згасання. При запуску потужних електроприводів можуть виникати сигнали з характеристиками експоненціального згасання енергії.

Результати виконаних досліджень структурних характеристик цифrogram перехідних процесів, які виникають при накидах, коротких замиканнях та запусках потужних електроприводів склали базову основу для розробки методів та алгоритмів розпізнавання та ідентифікації класифікованих типів збурень у високовольтних електромережах.

#### 4.2. Методи структурних перетворень гармонічних сигналів та їх застосування для розпізнавання збурень у високовольтних ЛЕП.

Виконаний аналіз зареєстрованих цифrogram збурень та перехідних процесів у високовольтних ЛЕП, а також встановлена належність таких сигналів до класу стаціонарних, квазістаціонарних та нестационарних процесів дозволяє обґрунтувати методи їх структурних перетворень та цифрового



опрацювання для реалізації алгоритмів їх розпізнавання у високовольтних ЛЕП. Очевидно, що застосування повнофункціонального, кореляційного та спектрального аналізу не може бути реалізовано на практиці у зв'язку з отриманими характеристиками сигналів, що виникають під час збурень та вимогами необхідної швидкодії реалізації алгоритмів та процесорів цифрового опрацювання даних.

Важливою умовою забезпечення необхідної надійності захисту електротехнічного обладнання високовольтних електричних мереж при виникненні досліджуваних збурень є ідентифікація збурення на інтервалі часу, що не перевищує 1-2 періоди промислової частоти [316, 317].

Таким чином, застосування повнофункціонального статистичного, кореляційного та спектрального аналізів при такій умові є неефективним, що обумовлено наступними причинами:

- застосування статистичного аналізу для вирішення даної задачі не є ефективним, оскільки зміна характеристик амплітуди сигналів при виникненні збурень є інваріантна до характеристик дисперсії та середньоквадратичного відхилення. Тому такі статистичні оцінки не можуть бути ефективно застосовані для правильної ідентифікації досліджуваних типів збурень у високовольтних ЛЕП;

- застосування кореляційного аналізу для ідентифікації досліджуваного класу збурень та відповідних змін структурних характеристик гармонічних сигналів для забезпечення необхідної точності потребує досить великого об'єму вибірки цифрових даних (не менше як 512-1024). Це потребує відповідної затримки масиву даних у динамічних регістрах, обчислення математичного сподівання та центрованих значень, що приводить до надлишковості кількості точок автокореляційної функції, які виходять за межі необхідних зсувів даних на інтервалі 1-2 періодів промислової частоти;

- при спектральному аналізі також недостатній об'єм вибірки для розрахунку спектру. Слід зауважити, що запропонований метод косинусного перетворення Фур'є, з адаптацією базисної функції до функції автоковаріації, та здійснення алгоритму на основі модульної арифметики кодової системи ТЧБ

Хаара-Крестенсона, який забезпечує максимальну швидкодію, у порівнянні з відомими алгоритмами [148, 149, 270], та структурну реалізацію відповідного спецпроцесора, не може бути практично реалізований при заданій умові на інтервалі 1-2 періодів промислової частоти.

#### 4.2.1 Алгоритм рандомізації.

Метод рандомізації, запропонований в роботах [318, 319]. В основу даного методу покладені операції зміни структури решітчастої функції оцифрованого сигналу на основі хешування цифрових відліків шляхом їх перемішування та представлення в рандомізованому вигляді.

Оператором рандомізації  $\mathfrak{Ran}$  послідовності  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  виконується дія згідно наступного закону рандомізації [318]:

$$X = \{x_i\}, \quad \mathfrak{Ran}(X) = \mathfrak{Ran}(\{x_i\}) = X^{\mathfrak{Ran}},$$

$$X^{\mathfrak{Ran}} = \{x_j\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = k_i.$$

$K = \{k_i\}$  – масив-ключ (закон) процедури рандомізації  $\mathfrak{Ran}$ .

У результаті рандомізації послідовності  $X$  утворюється послідовність  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n\}$ , причому  $x_i = y_j$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ . У більшості випадків рандомізації  $n = m$ , тобто рандомізована послідовність має ту саму довжину, що і початкова. Проте, при зсуві фази сигналу на основі рандомізації, відбувається розширення розміру рандомізованої послідовності, тобто  $m = n + r$ , де  $r$  - величина зсуву.

Існує процедура  $\mathfrak{Ran}^{-1}$  обернена до  $\mathfrak{Ran}$ , що дозволяє отримати початкову послідовність з рандомізованої, тобто:

$$\mathfrak{Ran}^{-1}(Y) = X.$$

Якщо пряма процедура  $\mathfrak{Ran}$  виконується згідно виразу  $y_i = x_{s_i}$ , тоді процедура  $\mathfrak{Ran}^{-1}$  виконується так:

$$\mathfrak{Ran}^{-1}: \quad z_{s_i} = y_i.$$

де  $S = \{s_i\}$  - масив-ключ (закон) рандомізації. Очевидно, що  $z_i = x_i$ , отже робимо висновок, що процедура рандомізації є зворотною.

Кількість можливих варіантів рандомізації  $N$  (тобто кількість різних ключів) визначається довжиною масиву-ключа рандомізації  $S = \{s_i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , тобто:  $N = n!$

Застосування більшості із  $N$  ключів рандомізації не є практично ефективними. Проте серед них є ключі, застосування яких дозволяє виконувати наступні операції [191, 318]:

- сортування послідовності по зростанню;
- сортування послідовності по спаданню;
- утворення сигналу типу "білий шум";
- перетворення сигналу одної форми в іншу (в т.ч. утворення ШПС);
- зміну частоти гармонійного сигналу;

На рис.4.1 показаний приклад структури оцифрованого гармонічного сигналу [97, 191, 318, 319].

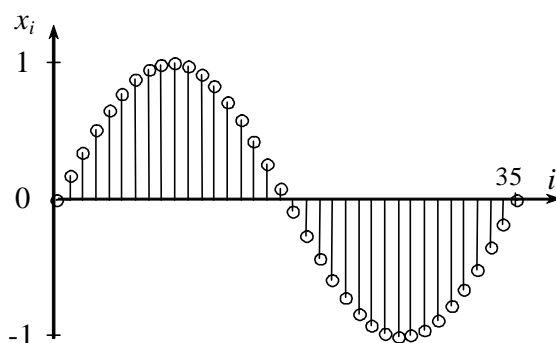
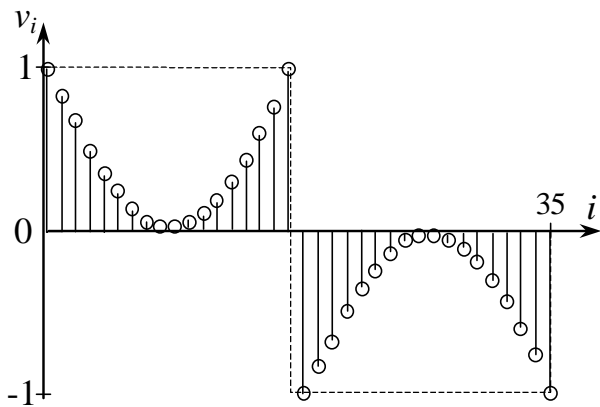
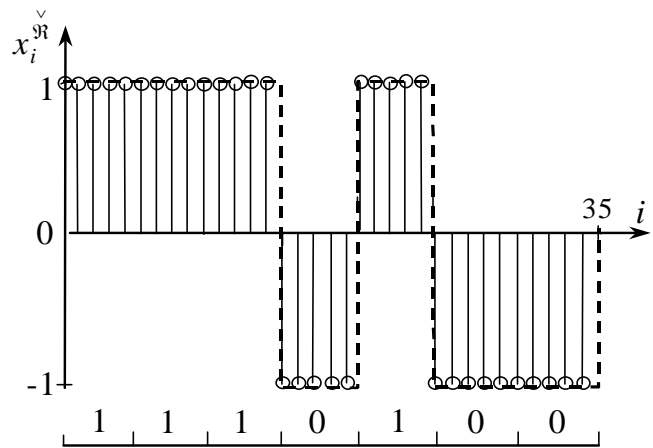


Рис. 4.1 - Сигнальна рандомізація синусоїди.

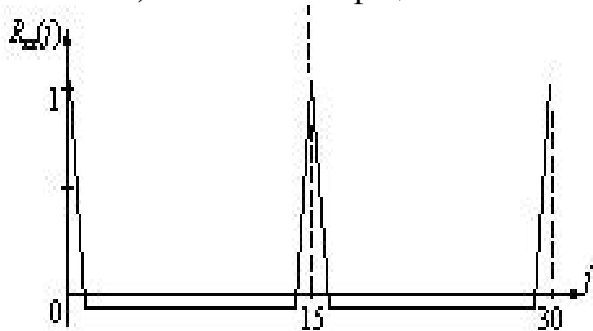
На рис.4.2 показаний приклад структурного перетворення синусоїдального гармонічного сигналу шляхом перемноження рандомізованих даних на відповідні вагові коефіцієнти і утворення еталонної послідовності цифрових відліків кодової послідовності максимальної довжини, яка має чітко сформований пік функції автокореляції (рис.4.2 в) [97, 191, 318, 319].



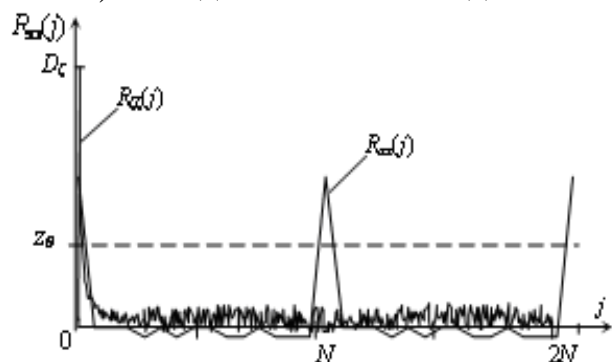
а) - Вагові коефіцієнти



б) - Рандомізована послідовність



в) - Автокореляційна функція рандомізованого процесу неспотвореної гармонічної функції



г) - Автокореляційна функція рандомізованого процесу спотвореної гармонічної функції у момент виникнення збурення

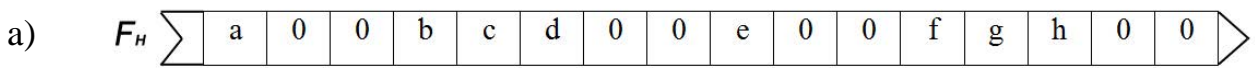
Рис.4.2 - Приклад структурного перетворення гармонічного сигналу.

Описаний метод рандомізації синусоїдального сигналу та його кореляційної згортки дозволяє застосувати його для ідентифікації та розпізнавання збурень в лініях електропередач при виникненні коротких замикань та накидів. При цьому у випадку виникнення накиду характеристики зміни гармонічного сигналу, незалежно від скачків амплітуди, спектрально не змінюються і в результаті кореляційної згортки його рандомізованого зображення виникає один пік кореляційного максимуму. У випадку виникнення короткого замикання спостерігається спотворення гармонічного сигналу, а також з'являється експоненціальна складова його затухання, що приводить до суттєвої зміни спектральних характеристик рандомізованого сигналу. Тому в результаті опрацювання таких збурень в електромережах відбувається різке зменшення амплітуди головного піку та поява інших піків кореляційної

функції, що використовується для ідентифікації даного виду збурень в електромережі.

4.2.2. Метод розпізнавання перехідних процесів в енергетичних системах на основі процесора з нейрокомпонентами квадратично-імпульсного перетворення гармонічних сигналів.

В основу методу, запропонованого в роботах [320-322] покладене квадратично-імпульсне перетворення гармонічного сигналу, яке забезпечує формування потоку імпульсів з адаптованим до особливих точок кроком дискретизації, алгоритм виконання якого описується у формалізованому виді наступним фреймом (а) та функціоналом (б):



б)  $F_i = F_1[x(t)] \Rightarrow F_2[x(t)^2] \Rightarrow F_3[a] \Rightarrow F_4[0] \Rightarrow F_5[b] \Rightarrow F_6[c] \Rightarrow F_5[d] \Rightarrow F_4[0] \Rightarrow F_3[e] \Rightarrow F_4[0] \Rightarrow F_5[f] \Rightarrow F_6[g] \Rightarrow F_5[h] \Rightarrow F_4[0] \Rightarrow Z(t)$  ,

де  $F_1, \dots, F_6$  – відповідно формалізований опис операцій перетворення та реєстрації особливих точок гармонічного сигналу;  $F_1$  – вхідний аналоговий гармонічний сигнал,  $x(t) = \sin x$ ;  $F_2$  – піднесення вхідного сигналу до квадрату,  $x(t)^2 = \sin^2 x$ ;  $F_3$  – порівняння нульового сигналу з поточним  $\sin^2 x - 0 = 0$  та формування порогового значення одиничного імпульсу  $Z(t) = 1$ ;  $F_4$  – формування нульових значень порогової функції  $Z(t) = [00]$ ;  $F_5$  – порівняння поточного сигналу з його похідною  $\sin^2 x = \frac{d(\sin^2 x)}{dt}$  та формування порогового значення  $Z(t) = 1$ ;  $F_6$  – порівняння поточного сигналу з максимумом амплітуди при  $t_i = \frac{\pi}{4}$ ,  $\sin^2 x = \max$  та формування порогового значення  $Z(t) = 1$ .

На рис.4.3 приведена реалізація методу квадратично-імпульсного порогового перетворення гармонічного сигналу [320-322].

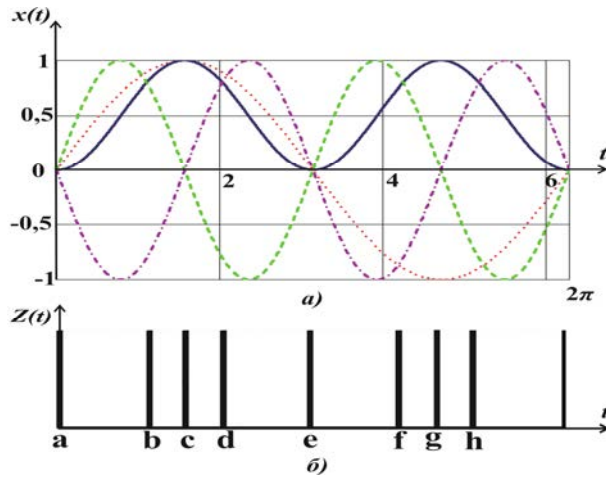


Рис.4.3 - Реалізація методу квадратично-імпульсного порогового перетворення гармонічного сигналу.

Формування імпульсної послідовності на виході рекурентного нейрона здійснюється згідно наступної системи рівнянь:

$$a, e - x(t) = 0; b, d, f, h - x(t) = \frac{dx(t)}{dt}; c, g - x(t) = \max.$$

В результаті опрацювання імпульсного потоку сигналів, який формується на виході формувача імпульсів процесором зі структурою рекурентного нейрона, отримується сигнальний імпульсний код, який після підбору оптимальних вагових коефіцієнтів  $\alpha_i$  дозволяє ідентифікувати накиди та короткі замикання у високовольтній електричній мережі, що показано на рис.4.4 (а, б) [191, 321, 322].

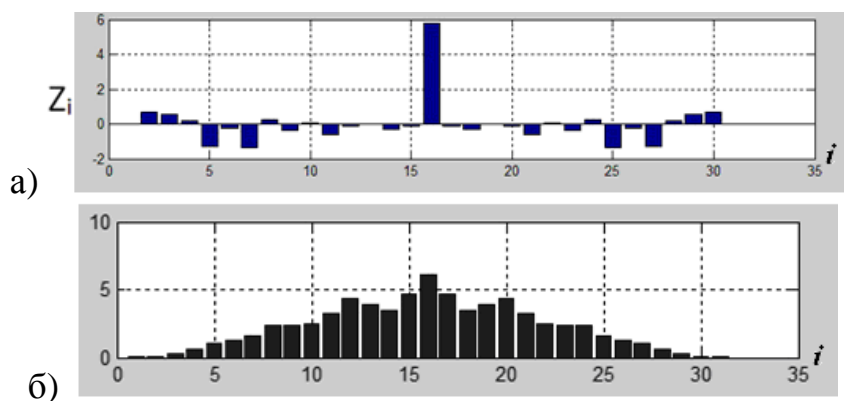


Рис.4.4 - Характеристики імпульсних сигналів при розпізнаванні накидів (а) та коротких замикань (б) у високовольтних електромережах методом розпізнавання перехідних процесів в енергетичних системах на основі процесора з нейрокомпонентами.

Результат цієї згортки відрізняється від згортки гармонічних сигналів на основі інтегральної оцінки на основі рівнянь:  $S_1 = \sum_{i=0}^{30} Z_{i0}$ ;  $S_2 = \sum_{i=0}^{30} Z_{i1}$ ;  $Z_{i1} \gg Z_{i0}$ .

У результаті дослідження згорток сигналів, поданих на рис.4.4, отримані результати, що свідчать про можливість ефективного розпізнавання нештатних ситуацій у високовольтних електричних мережах та можливість розрізнити виникнення перехідних процесів (наприклад, при зміні станів системи в моменти ввімкнення/вимкнення).

Аналіз теоретичних засад відомих методів цифрового опрацювання гармонічних сигналів, які дозволяють розпізнавати та ідентифікувати збурення типу накиди та короткі замикання дозволили встановити їх наступні переваги та функціональні обмеження:

1. Метод рандомізації, який базується на теорії та особливостях імпульсних кореляційних функцій рекурентних послідовностей максимальної довжини (М-сигналів), дозволяє ідентифікувати тільки накиди та короткі замикання у високовольтних електромережах і не придатний для розпізнавання запусків потужних електроприводів, оскільки даний метод не дозволяє ідентифікувати зсув фазних струмів при запуску потужних електроприводів. Іншим функціональним обмеженням даного методу є висока алгоритмічна та обчислювальна складність, яка обумовлена необхідністю виконання великої кількості перемножень цифрових значень фазних струмів на вагові коефіцієнти, а також реалізації процедури хешування даних.

2. Метод розпізнавання збурень гармонічних сигналів на основі процесорів з нейрокомпонентами передбачає піднесення вхідних оцифрованих сигналів до квадрату, їх запам'ятовування у багаторозрядному регістрі зсуву, їх перемноження на вагові коефіцієнти та порогового сумування, що також характеризується великою алгоритмічною та обчислювальною складністю, що значно обмежує застосування такого методу при реалізації мікроелектронних пристроїв релейного захисту.

#### 4.2.3. Метод на основі нормованого коефіцієнта взаємкореляції.

Одним з ефективних методів опрацювання сигналів для вирішення задачі розпізнавання образів є обчислення взаємкореляційних функцій. [156, 170, 191, 323].

Для розробки алгоритмів розпізнавання накидів при запуску потужних електроприводів після оцифрування цифрограм необхідно виконувати частотну фільтрацію сигналів з метою виділення низькочастотної огинаючої та огинаючої високочастотних складових, які виникають при запуску ПЕД.

На рис.4.5 показані характеристики огинаючої високих частот (ОВЧ) та низьких частот (ОНЧ), які опрацьовуються цифровим способом на інтервалі часу  $\tau$  перехідних процесів при запуску потужного електроприводу при успішному запуску (а) та неуспішному запуску (б) [323].

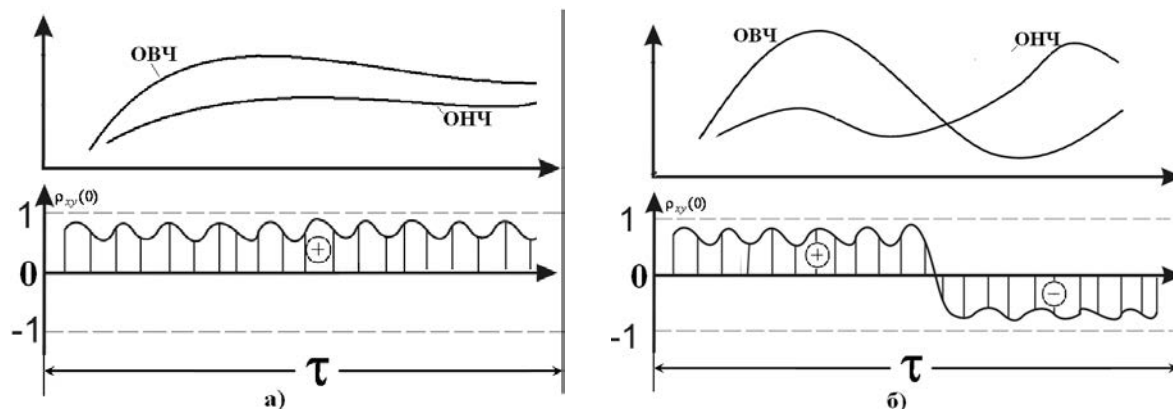


Рис.4.5 - Приклади розрахунку  $\rho_{xy}(0)$  при перехідних процесах запуску електроприводу.

З рис.4.5 видно, що при успішному запуску потужного електроприводу (а) характеристика коефіцієнта взаємкореляції  $\rho_{xy}(0)$  є позитивною на всьому інтервалі часу  $\tau$ , оскільки ОВЧ та ОНЧ є корельовано на всьому інтервалі  $\tau$ , при неуспішному запуску електроприводу (б) відбувається зміна полярності коефіцієнта взаємкореляції  $\rho_{xy}(0)$  на інтервалі часу  $\tau$ , що обумовлено появою антикореляції між ОВЧ та ОНЧ.

Перевагою даного методу є високий рівень інваріантності перехідних процесів при запусках електроприводів, оскільки розрахунок коефіцієнта



взаємкореляції виконується над нормованими та центрованими функціями огибаючих (ОНЧ та ОВЧ) перехідних процесів.

Слід зауважити, що даний метод характеризується певною обчислювальною складністю, оскільки потребує розрахунку математичних сподівань, центрованих значень та дисперсій сигналів ОНЧ та ОВЧ, а також реалізації швидкодіючих алгоритмів обчислення сум добутоків та ділення на добуток нормуючих значень  $\delta_x$  та  $\delta_y$ .

Таким чином алгоритм розпізнавання запусків потужних електроприводів в умовах можливих накидів та коротких замикань на основі нормованих коефіцієнтів взаємкореляції буде визначатися наступним алгоритмом згідно послідовності операцій:

1. Ідентифікується момент початку перехідних процесів шляхом визначення модульної різниці між текучим та затриманим на півперіода значенням фазного струму.

2. В реальному часі шляхом фільтрації випрямлених значень фазних струмів розраховуються огибаючі низьких та високих частот.

3. На інтервалі часу  $\tau$ , який відповідає 2-4 періодам промислової частоти обчислюються математичні сподівання ОНЧ та ОВЧ  $M_x, M_y$ , їх центровані значення  $x_i \cdot y_i$ , дисперсії  $D_x, D_y$  та середньоквадратичні відхилення  $\delta_x, \delta_y$ .

4. Розраховується в реальному часі ковзне значення нормованого коефіцієнта взаємкореляції  $\rho_{xy}(0)$ .

5. Отримані значення  $\rho_{xy}(0)$  з кроком дискретизації  $j \in \overline{0, \tau}$  на інтервалі часу  $\tau$  інтегруються, а ідентифікація типу перехідних процесів в ЛЕП виконується згідно інтегральних характеристик, що показано на рис.4.6.

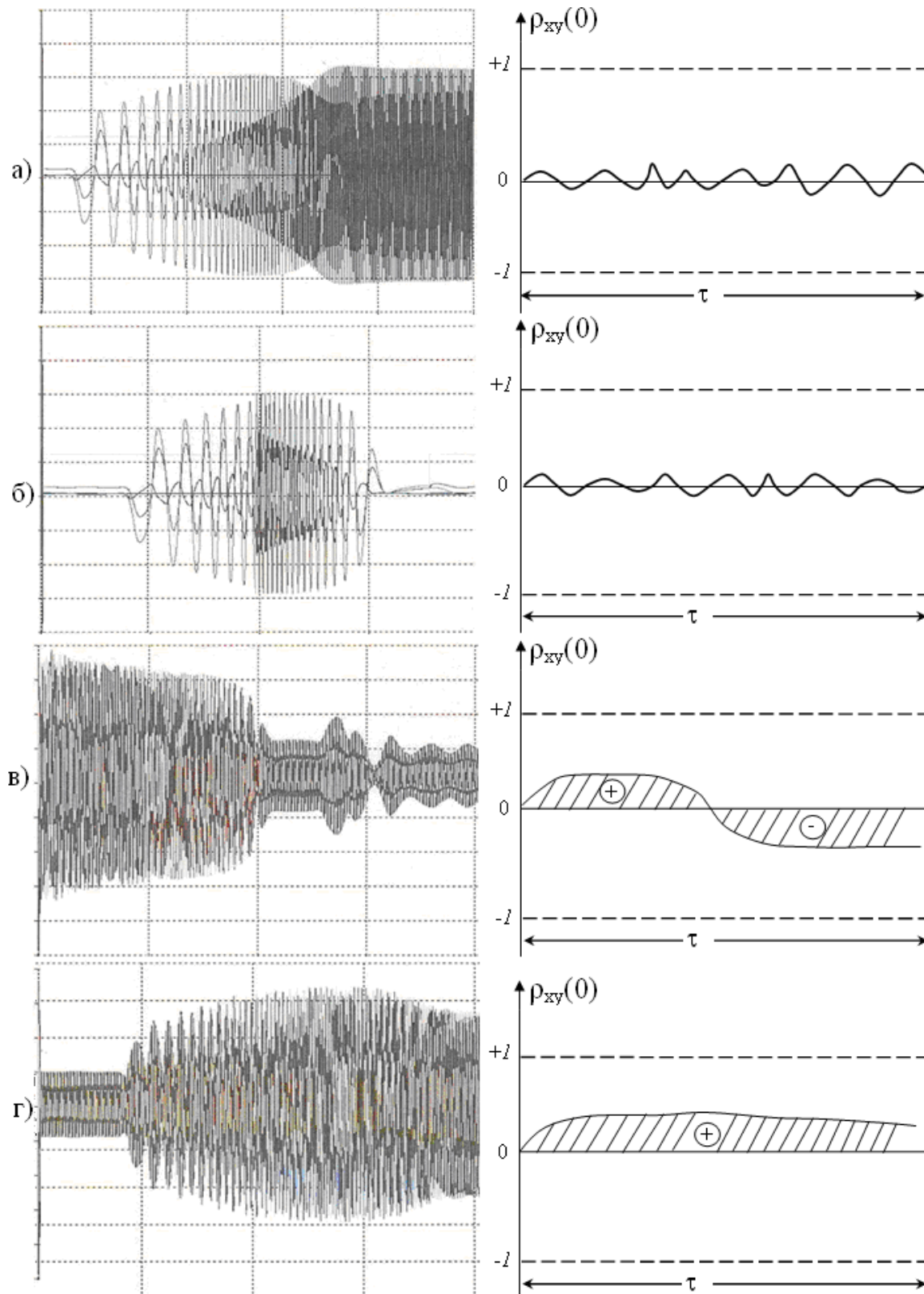


Рис.4.6 - Інтегральні характеристики нормованого коефіцієнта взаємкореляції на інтервалі перехідних процесів збурень в ЛЕП.

З рис.4.6 видно, що даний метод не дозволяє розрізняти перехідні процеси при накидах та коротких замиканнях (рис.4.6, а, б).

Розпізнавання успішних та неуспішних запусків потужних електроприводів на інтервалі часу  $\tau/2$  не ідентифікуються, а на інтервалі  $\tau$  - успішно розпізнаються шляхом порівняння інтегралу коефіцієнтів взаємкореляції з пороговим значенням  $P$ , що показано на рис.4.7 [323].

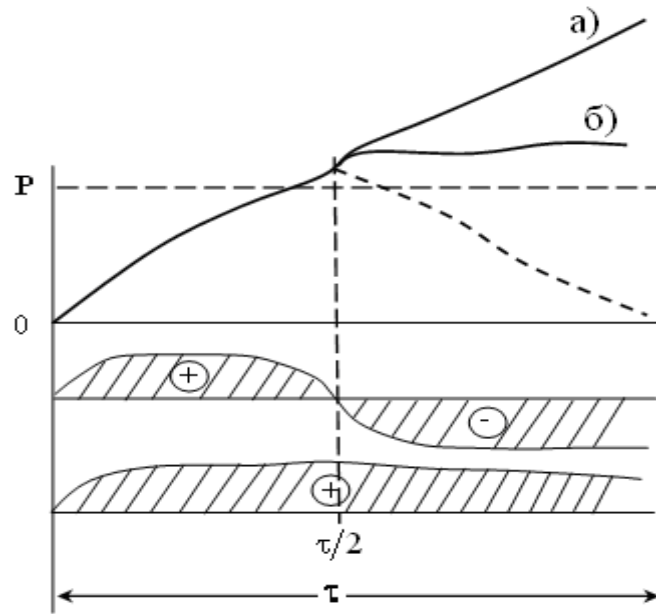


Рис.4.7 - Порогове розпізнавання успішних (а) та неуспішних (б) запусків електроприводу на основі коефіцієнта взаємкореляції між ОНЧ та ОВЧ.

#### 4.2.4. Метод на основі автокореляційних функцій ОНЧ та ОВЧ.

В основу методу покладена фільтрація огинаючих низьких та високих частот, які виникають при збуреннях та перехідних процесах в ЛЕП.

Серед автокореляційних функцій (АКФ), аналітика та графічні залежності асимптотики яких представлені в додатку Д1, найчастіше вживаними та популярними є кореляційні центровані та нормовані АКФ, однак характеризуються досить складними алгоритмами обчислень, оскільки потребують на інтервалі вибірки  $n = 256$  визначати математичні сподівання, центровані значення та дисперсії. Більш простими алгоритмами характеризується структурна  $C_{xx}(j)$  та модульна  $G_{xx}(j)$  АКФ, які потребують аналогічного об'єму вибірки, але не містять операцій множення та центрування вхідних сигналів. Найпростішим алгоритмом обчислення АКФ характеризується функція еквівалентності  $F_{xx}(j)$ , яка містить тільки одну

операцію порівняння (менше з двох), представлена в лінійному просторі і потребує вибірки  $n = 128$ .

На рис.4.8 показані характеристики дисперсії, тобто ковзні значення АКФ в нульових точках ОНЧ та ОВЧ при успішному та неуспішному запусках електроприводу.

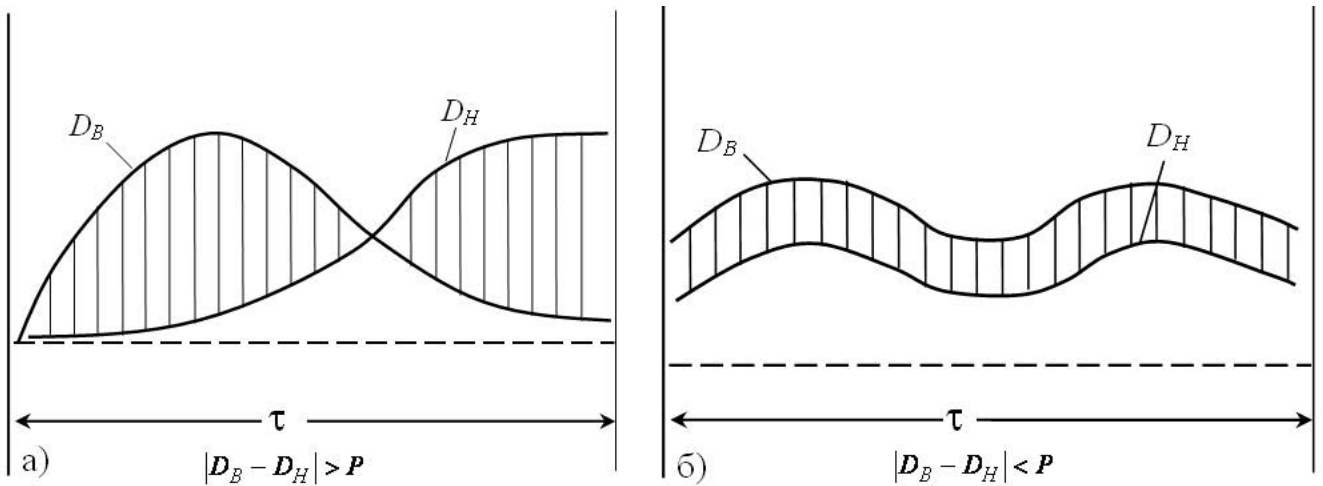


Рис.4.8 - Характеристики дисперсії в нульових точках ОНЧ та ОВЧ при успішному та неуспішному запусках електроприводу.

На рис.4.9 показано інтегральні характеристики модульних різниць дисперсій  $Z_i = \sum_{j=0}^{\tau} |(R_{xx}(0))_{ОНЧ(j)} - (R_{xx}(0))_{ОВЧ(j)}|$  на інтервалі часу  $\tau$ .

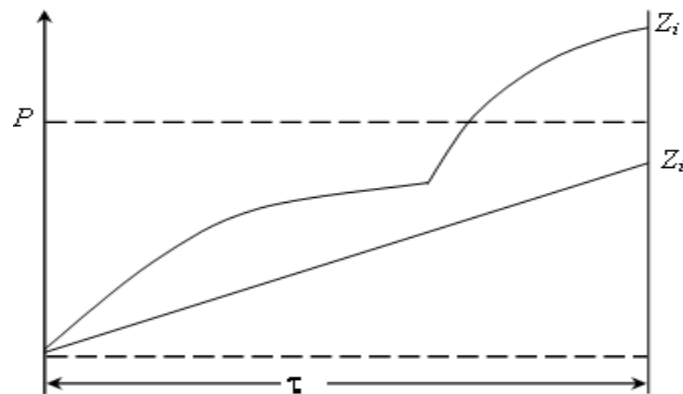


Рис.4.9 - Інтегральні характеристики модульних різниць дисперсій.

Даний метод характеризується достатньо простим алгоритмом обчислень, оскільки потребує обчислення АКФ в нульових точках та накопичення суми

модульних різниць між ковзними дисперсіями ОНЧ та ОВЧ

$$Z_i = \sum_{j=0}^{\tau} |D_{ОНЧ(j)} - D_{ОВЧ(j)}|.$$

4.3. Розробка інтегрально-диференціального методу структуризованого розпізнавання та ідентифікації накидів та коротких замикань у високовольтних ЛЕП.

Алгоритм інваріантного розпізнавання накидів, коротких замикань та запусків ПЕД реалізується на основі методу сумісного використання трансформаторів струму та напруги [97, 191, 314, 324-326]. Даний метод характеризується складною апаратною та обчислювальною складністю, оскільки потребує застосування на кожному під'єднанні високовольтної електричної підстанції двох трансформаторів струму та напруги, а також виконання відповідних обчислень.

Під час запуску ПЕД виникає значне споживання реактивної потужності, що супроводжується зсувом фаз між напругою та струмом. Дану ознаку запропоновано використати сумісно з розробленою системою ідентифікації коротких замикань та накидів для ефективного інваріантного розпізнавання окремо виникаючих перехідних процесів ЛЕП, які ідентифікуються як накиди, КЗ та запуски ПЕД.

В результаті опрацювання цифrogram, які отримані системою "Альтра" в діючих енергосистемах, побудовані функціональні моделі накиду та короткого замикання в лінійному та квадратичному просторах, які представлені в додатку Ж1 [97, 155, 157, 191, 314, 327].

На рис.4.10 [97, 158, 191, 327-329] показані вперше розроблені моделі фазних напруг, струмів та різниці фаз при накидах, коротких замиканнях та запуску ПЕД у високовольтних ЛЕП, отримані шляхом двохпівперіодного випрямлення сигналів промислової частоти та представлені у однополярному просторі.

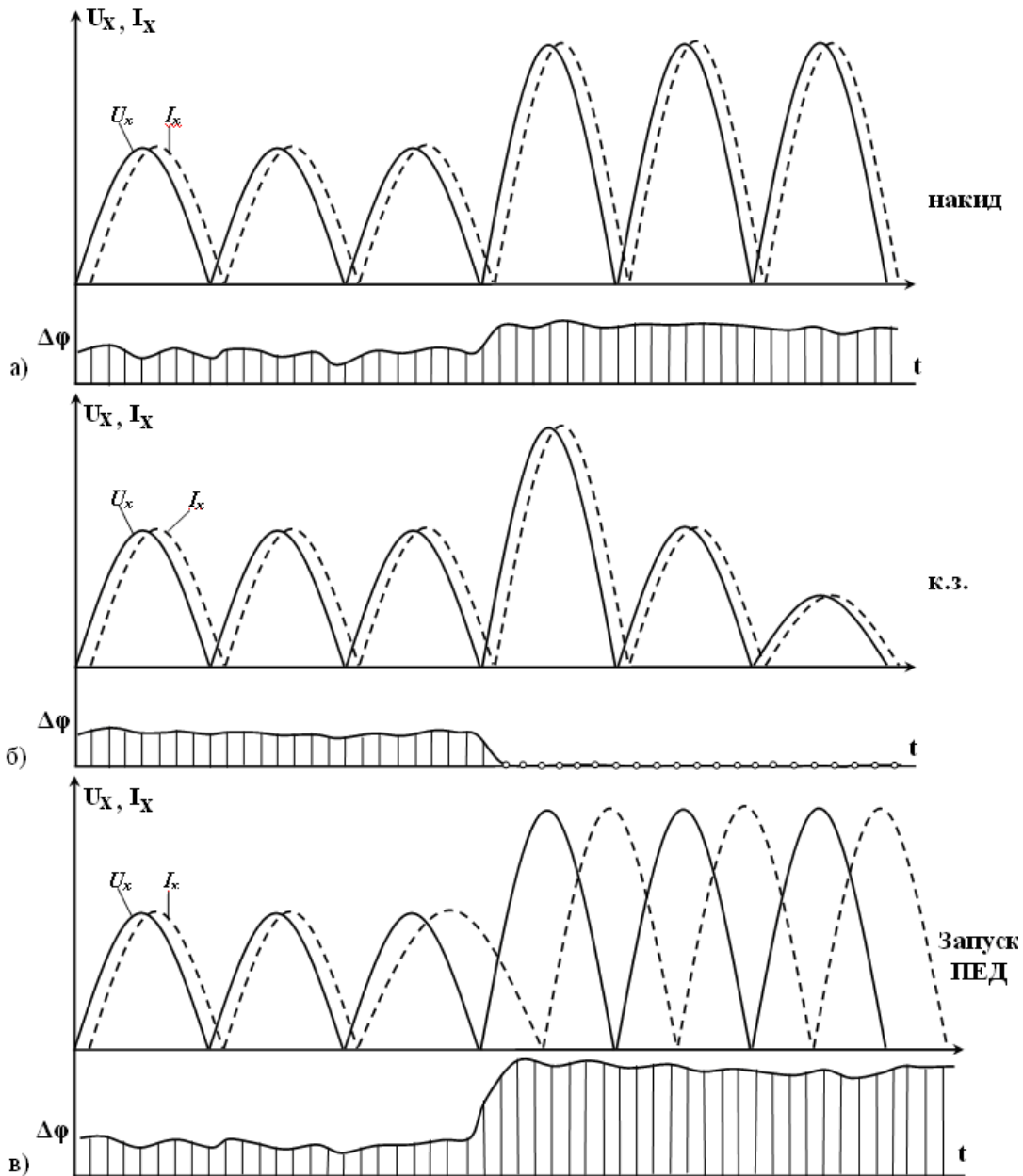


Рис.4.10 - Часові діаграми випрямлених значень фазної напруги  $U_x$ , струму  $I_x$  та різниці фаз  $\Delta\phi$  при накидах, коротких замиканнях та запуску ПЕД у високовольтних ЛЕП.

Аналіз отриманих функціональних моделей збурень у високовольтних електромережах типу накиду, КЗ та запуску ПЕД дозволяє встановити їх наступні особливості та характеристики [97, 156, 170, 191, 321] :

1. При виникненні накиду зсув фаз у електромережах практично не змінюється ( $\Delta\phi = I_x = U_x \approx const$ ), що показано на графіку моделі (рис.4.10 а).

При цьому також не змінюється форма огинаючої сигналів, тобто не

$$\text{змінюється спектр, що відповідає формалізації: } S_x = \begin{cases} \Delta\varphi = \text{const} \approx 0; \\ A_x(t) + \Delta A(t) = \text{const}; \\ S_{(\omega_i)} = \text{const} = 1. \end{cases}$$

2. При виникненні короткого замикання змінюється фаза, амплітуда та

$$\text{спектр сигналу, тобто } S_x = \begin{cases} \Delta\varphi = \text{var}; \\ A_x(t) + \Delta A(t) = \text{var}; \\ S_{(\omega_i)} = \text{var}; i = \text{var}, \end{cases}$$

3. При запуску потужного електроприводу відбувається зміна амплітуди сигналу зі зсувом його фази без зміни форми (частотного спектру), амплітуди

$$\text{та енергії затухання сигналу, тобто } S_x = \begin{cases} \Delta\varphi = \text{var}; \\ A_x(t) + \Delta A(t) = \text{const}; \\ S_{(\omega_i)} = \text{const} = 1, \end{cases}$$

- де  $\Delta\varphi$  - зміна фази;

$A(t), \Delta A$  - початковий стрибок та зміна амплітуди під час збурення;

$S_{(\omega)}$  - спектр.

Таким чином змінюються структурні характеристики огинаючих сигналів, які представлені моделями на рис.4.10.

Сумісне використання часових діаграм ідентифікації накидів, КЗ та запусків ПЕД, що представлені на рис.4.10 дозволяє шляхом логічного опрацювання сигналу різниці фаз та ідентифікаційних сигналів розпізнавання накидів та КЗ інваріантно до зміни величини фазних струмів ідентифікувати шляхом логічного опрацювання окремо виникаючі перехідні процеси в ЛЕП типу накидів, КЗ та запуску електроприводів.

Аналіз досліджених методів ідентифікації розпізнавання окремо виникаючих накидів, коротких замикань та запусків ПЕД показує, що найбільш інформаційним та перспективним для розробки алгоритму опрацювання та спецпроцесорів, що забезпечують інваріантну ідентифікацію перехідних процесів, незалежно від амплітуди фазних струмів, є метод на основі сумісного

використання трансформаторів струму і напруги та логічного опрацювання характеристик перехідних процесів при виникненні накидів, КЗ та запусків ПЕД.

Розроблені моделі та принцип логічного опрацювання змін фазних струмів для надійної ідентифікації класифікованих типів збурень характеризуються наступними функціональними обмеженнями [97, 155, 157, 191, 314, 315]:

1) аналіз розпізнавання збурень здійснюється на основі реєстрації миттєвих значень фазних струмів, що при спотворенні огинаючих сигналів може приводити до "гонок" у структурі логічної схеми і обмежує можливості застосування пристроїв релейного захисту на їх основі у реальних електромережах;

2) даний метод не враховує характеристики процесів дискретизації та квантування сигналів фазних струмів при створенні цифрових мікроелектронних засобів релейного захисту, які є інваріантними до амплітуд зміни миттєвих значень фазних струмів;

3) практична реалізація такого методу потребує додаткового оснащення пристроїв релейного захисту пороговими та фільтруючими компонентами на входах схеми логічного опрацювання сигналів.

При цьому перспективним рішенням прикладної задачі створення цифрових засобів релейного захисту є представлення сигналів промислової частоти у вигляді решітчастих функцій цифрових відліків та розробки інтегрально-диференціального методу [97, 155, 191, 323, 327, 328].

Задача розпізнавання збурення у ЛЕП може бути успішно вирішена цифровим опрацюванням гармонічних сигналів  $X_i = A_i \cos \omega_0 t$  згідно запропонованого структурного представлення гармонічного сигналу у вигляді решітчастої функції (рис.4.11) [97, 155, 191, 323, 327, 328].



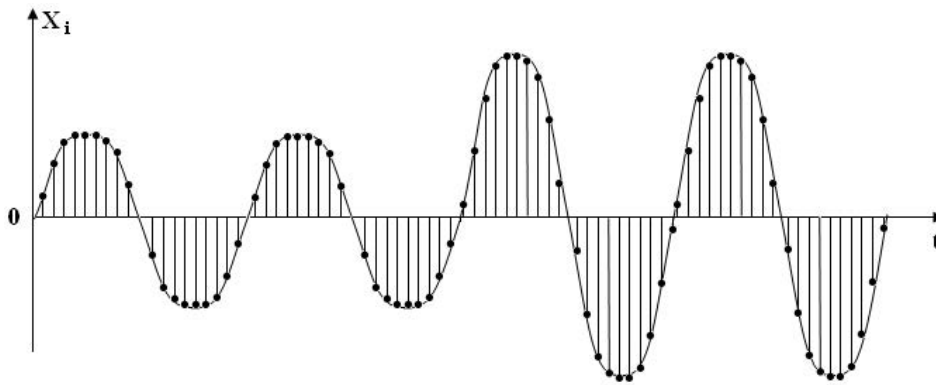


Рис.4.11 – Структура решітчастої функції накиду гармонічного сигналу з врахуванням дискретизації по амплітуді ( $\delta = const$ ) та часу ( $\tau = const$ ).

У результаті на виході АЦП на інтервалі одного періоду гармонічного сигналу отримуємо потік цифрових центрованих відліків

$$(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_i, \dots, \dot{x}_n), \text{ де } M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i = 0; -A \leq x_i \leq A.$$

З метою спрощення рішення задачі подамо  $\dot{x}$  у вигляді  $|\dot{x}|$ , тобто це можна зробити на виході АЦП шляхом відкидання знаку або випрямлення гармонічного сигналу  $|\dot{x}|$  до входу АЦП (рис.4.12) [97, 155, 191, 323, 327, 328].

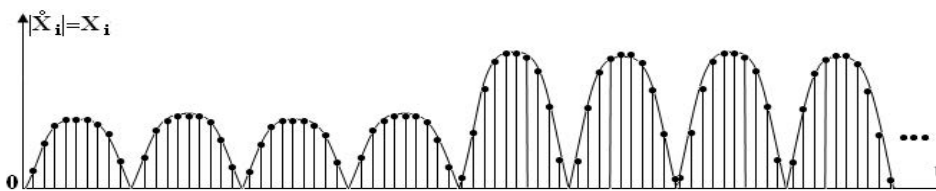


Рис.4.12 - Модульна характеристика решітчастої функції накиду гармонічного сигналу.

Алгоритм опрацювання даних такого структурного представлення гармонічного сигналу виконується з кроком  $\Delta t = \frac{\pi}{2}$ , тобто у ковзному режимі через півперіода промислової частоти.

Для виконання різницевого імпульсно-квадратичного методу рекурентно (у стековому режимі) запам'ятовуються цифрові відліки  $x_i$  у регістрі пам'яті  $x_i \rightarrow x_{i-1} \rightarrow x_{i-2} \dots \rightarrow x_{i-j} \dots \rightarrow x_{i-n}$  і різницево порівнюються запам'ятовані значення з поточними відліками  $x_i$ . Тобто згідно наступного процесу

запам'ятовування та опрацювання цифрових сигналів

$$\rightarrow x_i \rightarrow x_{i-1} \rightarrow x_{i-2} \dots \rightarrow x_{i-j} \dots \rightarrow x_{i-n} \Rightarrow x_i - x_{i-n}.$$

Тобто операція віднімання виконується над цифровими даними гармонічного сигналу у наступні моменти часу, зміщені на  $\frac{\pi}{2}$  (рис.4.13) [97, 191, 323, 327, 328].

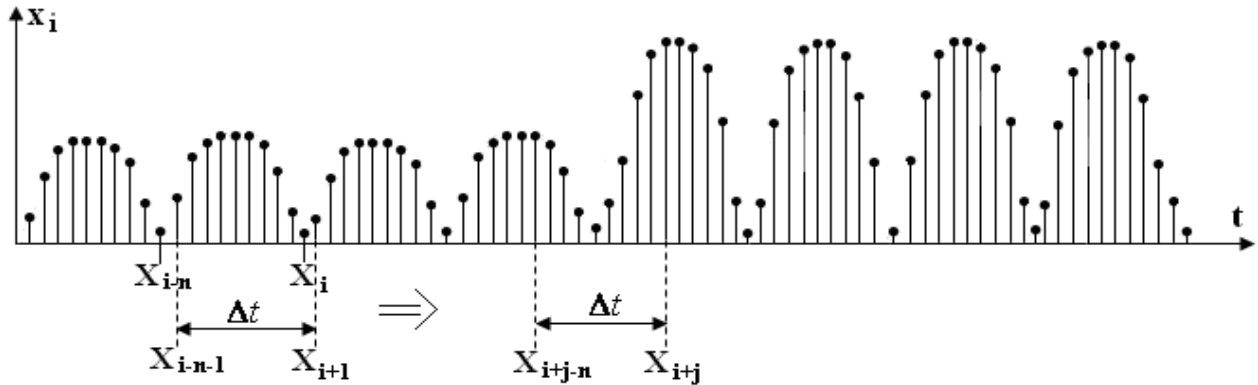


Рис.4.13 - Структура решітчастої функції формування різниць текучих та запам'ятованих значень гармонічного сигналу.

У результаті виконання такої операції у ковзному режимі з кроком  $\Delta t$  отримаємо:

$$Z_i = |x_i - x_{i-n}|,$$

де модульна операція враховує симетрію зміни амплітуд струмів у напрямі зростання при накиді та спадання при скиді навантаження в електромережі.

Графік зміни  $Z_i$  в часі при накиді показаний на рис.4.14 [97, 191, 323, 327, 328].

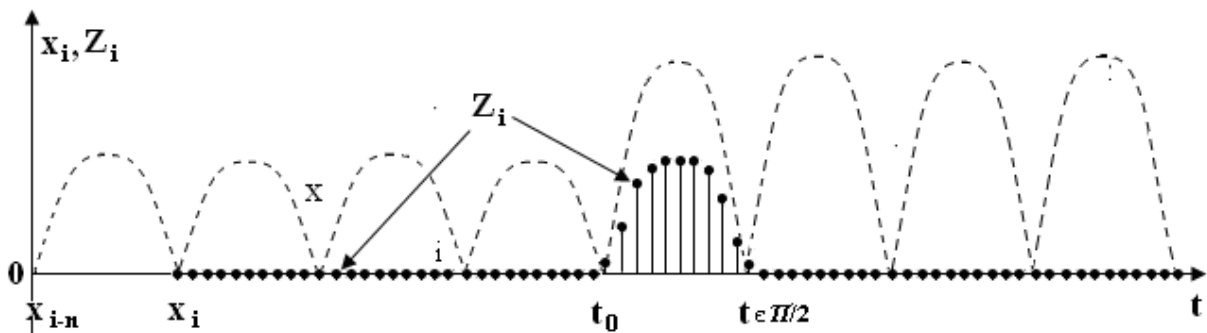


Рис.4.14 - Характеристика формування модульної різниці при виникненні "накиду" навантаження в електромережі.

З рис.4.14 видно, що процесор буде реєструвати зміну амплітуди струму у момент стрибка:  $A_1 \rightarrow A_2$ ;  $A_1 \ll A_2$  на інтервалі півперіоду, але є інваріантна до можливих інших більших чи менших стрибків амплітуди струму у інші моменти часу, тобто:

$$Z_i = \begin{cases} 0, t \leq t_0; \\ (A_2 - A_1) \sin \omega t, t_0 \leq t \leq t + \frac{\pi}{2}; \\ 0, t > t_0 + \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

Розглянемо задачу розпізнавання та ідентифікації короткого замикання в електромережі.

Експериментальні дослідження та реєстрація збурень в електромережах за допомогою пристроїв "Альтра" та їх модифікацій [191] показують, що при виникненні коротких замикань різної природи спостерігається наближення до експоненціального затухання або спотворення форми гармонічного сигналу на кількох періодах синусоїди струму на інтервалі часу  $t > t_0$ . У цьому випадку структура решітчастої функції короткого замикання має вигляд, показаний на рис.4.15 [155, 158, 170, 191, 314, 315].

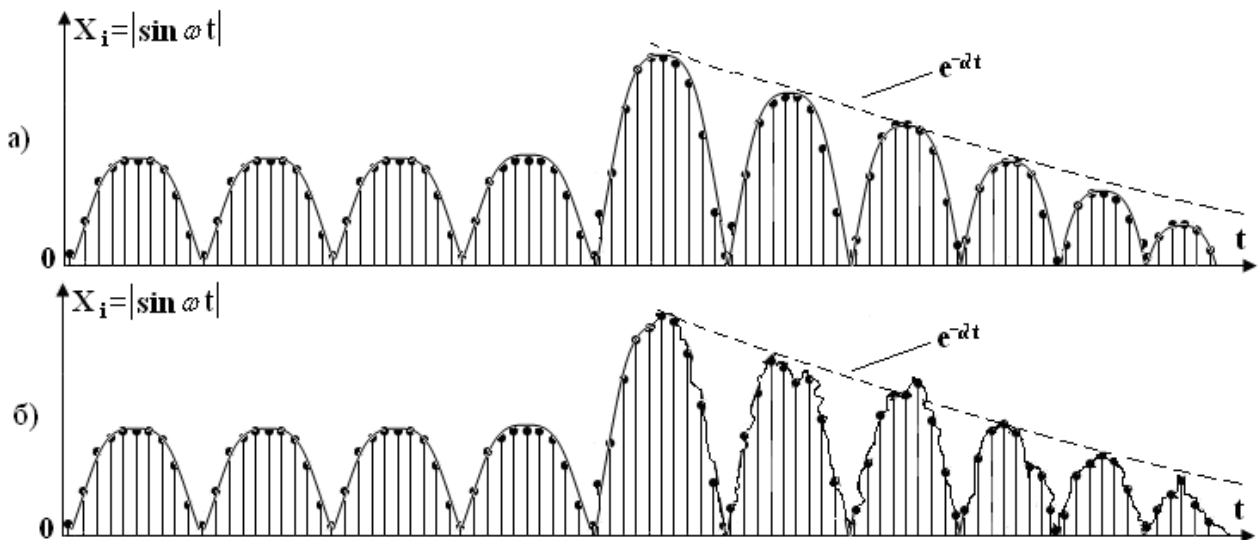


Рис.4.15 – Структури неспотворених (а) та спотворених (б) решітчастих функцій гармонічних сигналів при виникненні короткого замикання:  $e^{-\alpha t}$  - огибаюча спотворених решітчастих функцій гармонічного сигналу ( $0 < \alpha < 1$ ).

При виникненні такого роду збурення в електромережах у результаті різницево-імпульсного опрацювання гармонічних сигналів в околі часу  $t_0$  отримаємо графік структури ковзного різницевого сигналу, яка показана на рисунку 4.16 [97, 155, 157, 158, 170, 191].

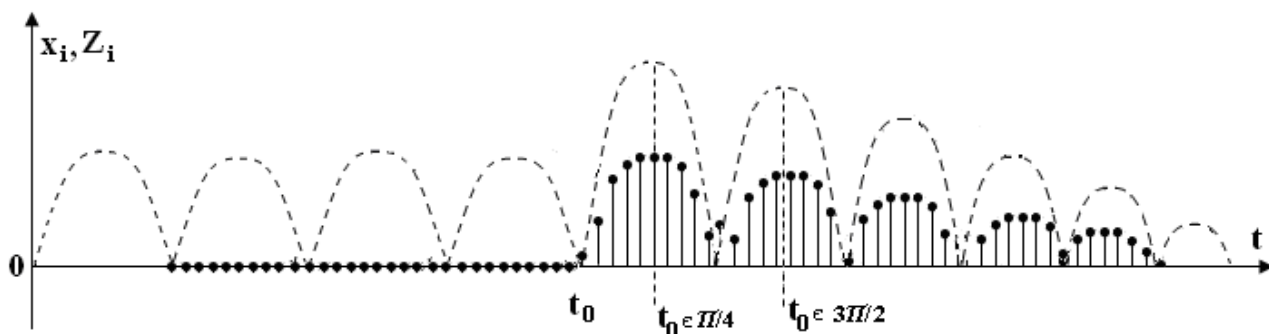


Рис.4.16 - Характеристика розпізнавання та ідентифікації короткого замикання в електромережах без спотворення гармонічного сигналу.

Таким чином на основі запропонованого інтегрально-диференціального методу факт виникнення збурення в електромережі буде зареєстрований на інтервалі часу  $t_0 + \frac{\pi}{2}$  або навіть на інтервалі  $t_0 + \frac{\pi}{4}$  [169].

Структурна складність решітчатих моделей збурень у високовольтних ЛЕП характеризуються експертними оцінками структурної складності їх компонентів (табл.4.1) згідно оцінок структурної складності (2.1, 2.2) та даних табл.2.1, 2.2 [98, 191].

Таблиця 4.1 - Оцінка структурної складності структур решітчатих функцій оцифрованих даних збурень у високовольтних ЛЕП.

Решітчатая модель	Кількість елементів параметра						Кількісна оцінка структурн. складності, $k_c$
	Лінія	Дотик	Поворот	Точка реєстрації	Стрілка	Пересіч.	
Рис.4.11	75	82		80	2	8	283,2
Рис.4.12	75	89	7	80	2	1	291,6
Рис.4.13	74	80		80	2	1	257
Рис.4.14	14	20	7	80	2	1	92,6
Рис.4.15б	77	89	9	80	2	1	298,4
Рис.4.16	53	61	9	50	2	1	212

Автором вперше запропонована модель структурних перетворень сигналів промислової частоти шляхом автокореляційного опрацювання оцифрованих та квантованих решітчатих функцій випрямлених фазних струмів, яка показана на рис.4.17 [97, 155, 157, 158, 169, 170, 191].

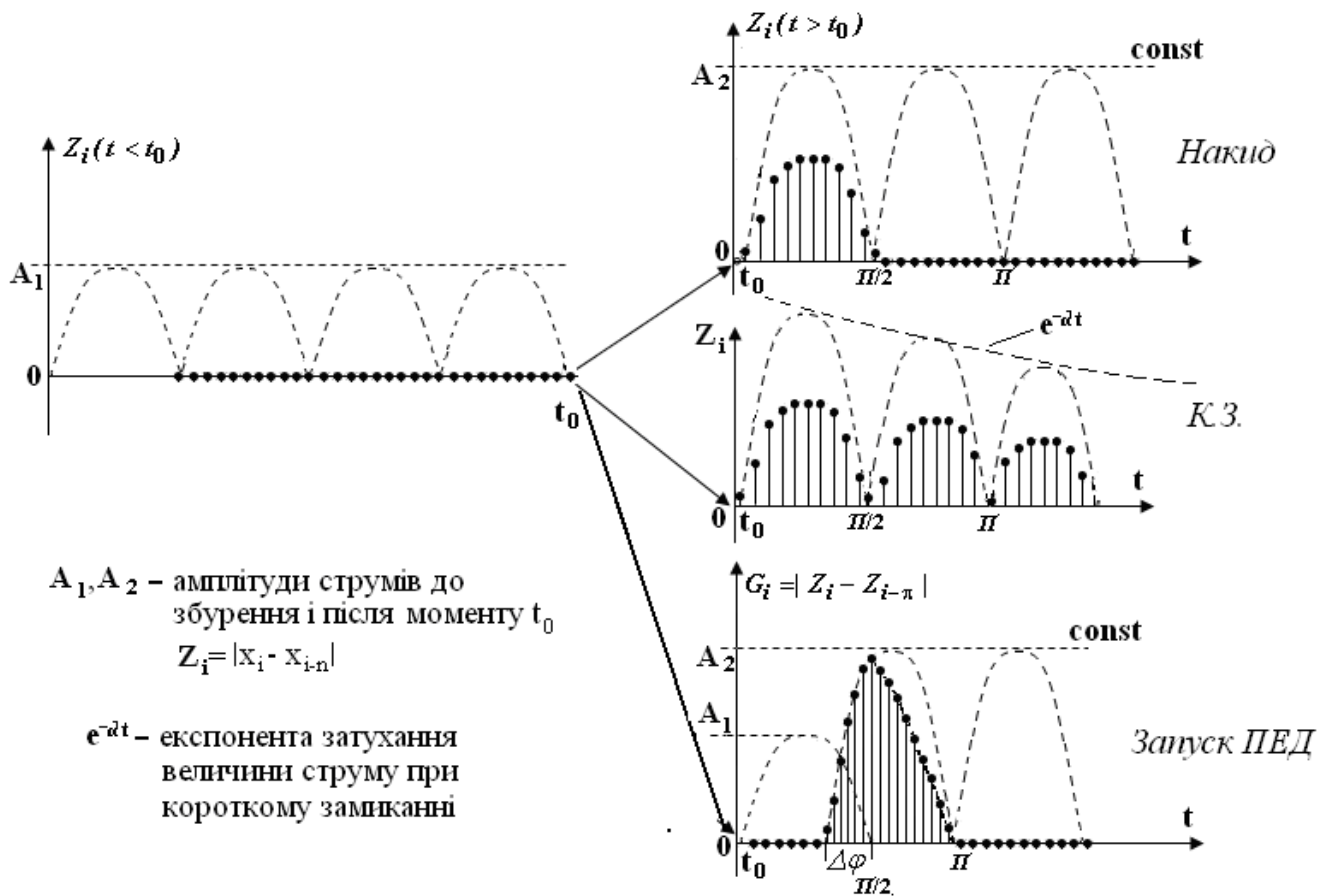


Рис.4.17 - Часова продукційна модель виявлення, розпізнавання та ідентифікації збурень в електромережах типу накиду, запуску ПЕД та короткого замикання.

На рис.4.17 [191, 315]:  $A_1, A_2$  - амплітуди струмів до збурення і після моменту  $t_0$ ;  $e^{-\alpha t}$  - експонента затухання величини струму при короткому замиканні;  $Z_i$  - поточні миттєві та зсунуті на півперіода значення амплітуд струмів при накиді та короткому замиканні; амплітуда струму в одній з випрямлених фаз ЛЕП до збурення  $A_1$ , коли  $t < t_0$  та після збурення  $A_2$ , коли  $t \geq t_0$ ;  $G_i$  - модульна різниця між поточними та зсунутими значеннями  $Z_i$ .

Як видно з рис.4.17, виникнення короткого замикання згідно розробленого методу можна ідентифікувати на інтервалі часу  $t_0 + \frac{\pi}{4} < t_0 + \frac{\pi}{2} < t_0 + \pi$ . Тобто на інтервалі чверть або півперіоду після реєстрації збурення в електромережі.

З метою підвищення чутливості та дозволяючої здатності ідентифікації факту збурення на початковій стадії його розвитку на інтервалі часу  $t > t_0 + \frac{\pi}{2}$  запропонований інтегральний квадратично-імпульсний метод цифрового опрацювання даних  $Z_i$  згідно виразів [97, 155-158, 170, 191, 322]:

$$S_{KЗ} = \begin{cases} 1, Z_i^2 \geq P_{KЗ}; \\ 0, Z_i^2 < P_{KЗ}, \end{cases} \quad S_{ПЕД} = \begin{cases} 1, P_H \leq Z_i^2 < P_{KЗ}; \\ 0, P_{KЗ} \leq Z_i^2 < P_H, \end{cases} \quad S_H = \begin{cases} 1, 0 \leq Z_i^2 < P_H; \\ 0, Z_i^2 \geq P_{ПЕД}, \end{cases}$$

де  $P_{KЗ}, P_{ПЕД}, P_H$ , - порогові значення ідентифікації відповідно короткого замикання, запуску ПЕД та накиду.

У той же час очевидно, що процеси розвитку коротких замикань можуть мати більш складний характер, ніж показано на структурі решітчастої функції (рис.4.15). У процесі пробоїв ізоляції у високовольтних кабелях можуть спостерігатися кілька наростаючих стрибків чи випадково амплітудних стрибків струму. У цьому випадку може з'явитися необхідність більш потужного опрацювання серій ідентифікованих коротких замикань, що є предметом більш глибоких теоретичних, експериментальних та промислових досліджень на основі теорії Марківських моделей ідентифікації станів квазістаціонарних об'єктів управління та джерел інформації.

Ілюстрація імпульсно-квадратичного порогового розпізнавання та ідентифікації коротких замикань спецпроцесором продемонстрована на рис.4.18 наростанням ідентифікаційної функції розвитку короткого замикання в електромережах [97, 155, 157, 158, 172, 191, 314].

На рис.4.18 [157, 314] показаний графік наростання імпульсно-квадратичної функції  $S_i$ .

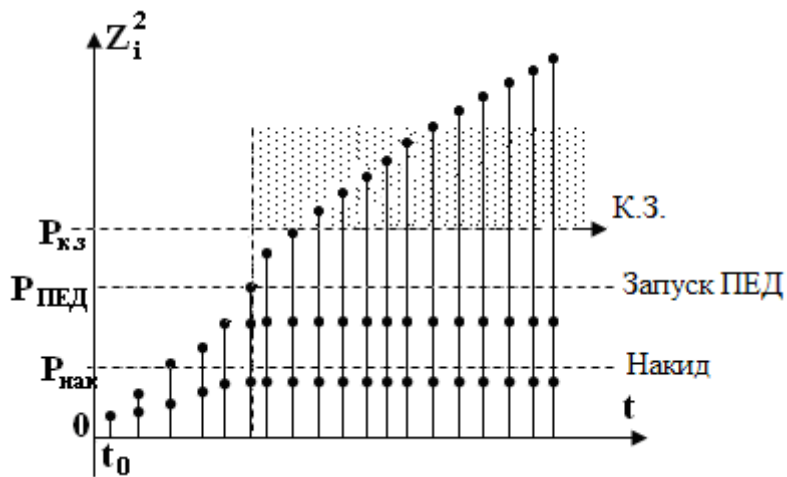


Рис.4.18 - Наростання ідентифікаційної функції розвитку короткого замикання в електромережах.

В основу удосконаленого інтегруючого квадратора (рис.4.19) [337] покладено введення в пристрій: другого входу синхронізації скиду в нульовий стан лічильника регістра; третього входу задання циклів накопичення суми квадратів вхідних унітарних входів  $G_{ij}$ ; четвертого входу пристрою задання порогового значення  $P_0$  – стартової активізації роботи пристрою та введення схеми формування стартових сигналів скиду у нульовий стан регістра пам'яті пристрою, що дозволяє розширити його функціональні можливості, організувати роботу пристрою у режимах очікування, при відсутності збурень у високовольтних лініях електропередач, активізацію у момент їх виникнення шляхом розпізнавання накидів, запусків ПЕД та коротких замикань.

Удосконалений спецпроцесор, який реалізує функції інтегруючого квадратора, складається з першого входу (1), який з'єднаний з першим входом  $n$ -розрядного двійкового лічильника-регістра (2), першим входом модуля стартової синхронізації (7) та першим входом регістра пам'яті (4).  $N$ -виходів лічильника (2) з'єднанні з відповідними, починаючи з другого молодшого розряду, першими  $n$ -входами  $(n + k)$ -розрядного комбінаційного суматора (3), перший молодший вхід якого з'єднаний з входом логічної "1" (5), виходи комбінаційного суматора з'єднані з відповідними другими входами регістра пам'яті (4), прями виходи D-тригерів якого з'єднані з відповідними третіми

входами комбінаційного суматора та першими входами модуля формування вихідних керуючих сигналів (10), другий вхід якого з'єднаний з пороговою уставкою (11), а виходи (12, 13, 14) є відповідно сигнальні виходи ідентифікації накиду, замикання на землю та запуску потужних електродвигунів.

Другий вхід модуля стартової синхронізації (7) з'єднаний з другим входом синхронізації пристрою (6) та другим входом скиду в нульовий стан лічильника (2). Третій вхід модуля (7) з'єднаний з третім входом числа циклів накопичень  $k$  (8), четвертий вхід з'єднаний з входом порогового значення старту  $P_0$  (9), а вихід з'єднаний з четвертим входом регістра скиду в "нуль" регістра пам'яті (4).

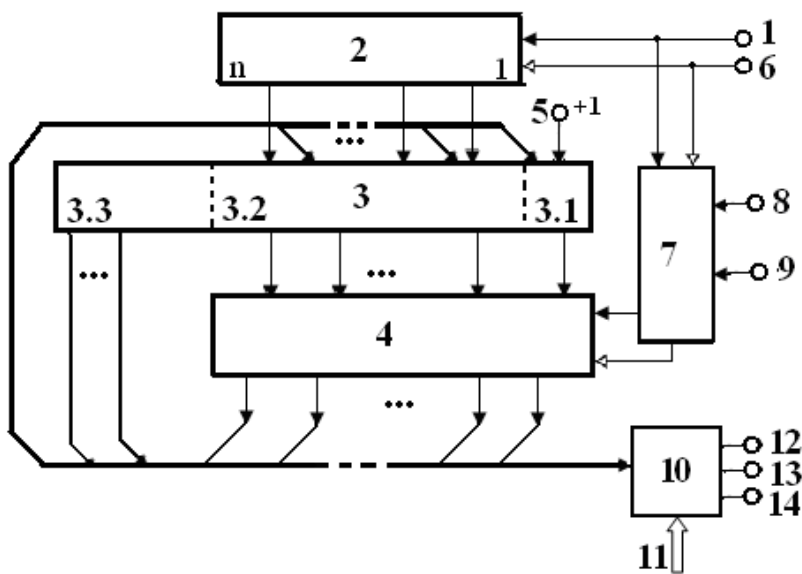


Рис.4.19 - Структурна схема спецпроцесора обчислення порогової суми квадратів модульних різниць  $G_i^2$ .

Пристрій працює наступним чином:

1. На вхід 6 поступають сигнали синхронізації роботи пристрою з інтервалом дискретизації АЦП  $\tau$ . При цьому лічильник 2 і лічильник у модулі 7 скидаються у нульовий стан. Один раз, після  $k$  циклів роботи пристрою, регістр пам'яті 4 скидається у нульовий стан.



2. У наступних циклах, після поступання сигналів синхронізації  $\tau_1$  на вході 6 цикл роботи пристрою повторюється і в регістрі пам'яті 4 накопичується сума квадратів модульних різниць.

3. На вхід 1 з елемента "Виключаюче АБО" пристрою релейного захисту поступає пачка імпульсів модульної різниці між фазними струмами  $\Delta x$ .

4. Одночасно у лічильнику 2 накопичується код модульної різниці  $\Delta x$ , який з зсувом на один старший розряд подається на перші входи суматора 3 у вигляді коду  $2\Delta x$  плюс одиниця в молодшому розряді суматора. Таким чином на перші входи суматора поступає код непарного числа  $2\Delta x + 1$ . Після закінчення циклів, що відповідають кількості імпульсів унітарного коду, що представляє модульну різницю фазних струмів, до регістра пам'яті 4 додається квадрат модульної різниці  $\Delta x^2$ .

5. Після закінчення кількості циклів накопичення  $k$  регістр пам'яті 4 скидається в нульовий стан з виходу модуля 7.

6. У процесі роботи пристрою коди, які формуються в регістрі пам'яті 4 порівнюються з кодами уставок 11 у модулі порівняння 10, на виході якого формуються сигнали управління силовими вимикачами режимів накиду, КЗ, запуску ПЕД.

Модуль стартової синхронізації 7 призначений для активізації роботи пристрою (в режимі очікування) при відсутності збурень в ЛЕП та активізації роботи в момент виникнення збурень та перехідних процесів.

На рис.4.20 показана структура модуля стартової синхронізації.

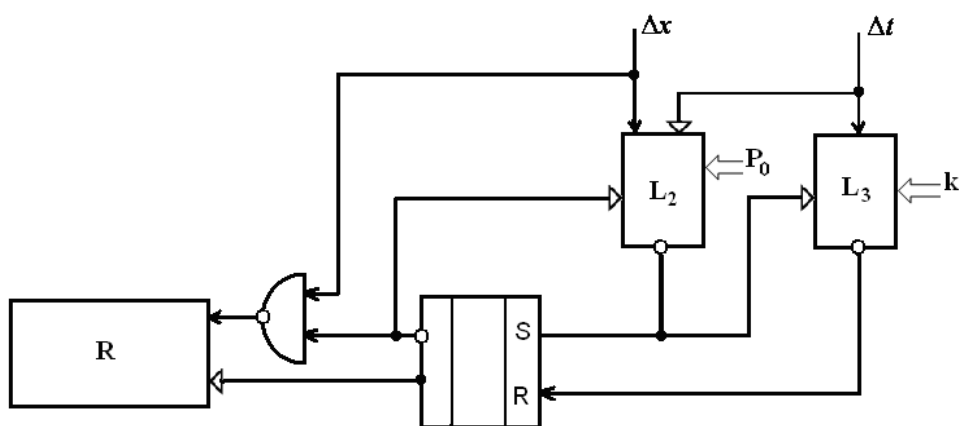


Рис.4.20 - Структура модуля стартової синхронізації.

Модуль стартової синхронізації призначений для управління алгоритмом роботи пристрою у режимах очікування та активізації у момент виникнення збурення у високовольтній ЛЕП. У режимі очікування на вхід модуля поступають сигнали  $\Delta t$  кроку дискретизації АЦП у вигляді імпульсів з нульовим потенціалом, які поступають на вхід скиду в нульовий стан лічильника  $L_2$ , в якому порівнюються значення модульної різниці  $\Delta x$  з пороговою уставкою  $P_0$  і одночасно на інформаційний вхід лічильника  $L_3$ , де задається кількість циклів активної роботи  $k$ , протягом яких відбувається розпізнавання збурень. Одночасно сигнали  $\Delta t$  поступають на вхід логічного елемента "І-НЕ" для тактування сигналів запису даних з суматора у регістр пам'яті  $R$ .

Сигнали пачок імпульсів  $\Delta x$ , які формуються на виході логічного елемента "Виключаюче АБО" пристрою поступають між тактами сигналів  $\Delta t$  на інформаційний вхід лічильника  $L_2$ , де порівнюються з уставкою активізації  $P_0$ . Якщо код  $\Delta x$  у лічильнику  $L_2$  перевищує код уставки  $P_0$  на інверсному виході  $L_2$  формується сигнал нульового потенціалу, який скидає лічильник  $L_3$  у нульовий стартовий стан, а RS-тригер по S-входу встановлює тригер у стан одиниці, який активізує роботу всього пристрою. При цьому з інверсного виходу тригера сигнал нульового потенціалу встановлює в нульовий стан лічильник  $L_1$ , виключаючи його з роботи на період активної роботи пристрою, а також поступає на другий вхід логічного елемента "І-НЕ", на виході якого з тактовою частотою  $\Delta t$  формуються сигнали запису даних з суматора у регістр пам'яті, які представляють собою квадрати числових значень  $\Delta x$ .

При виконанні  $k$  активних циклів роботи пристрою інверсним сигналом з виходу лічильника  $L_3$  по R-входу RS-тригер скидається у нульовий стан. При цьому сигналом у вигляді плюсового потенціалу забороняється формування імпульсів запису на вхід регістра пам'яті  $R$  та дозволяється робота лічильника  $L_2$ , а нульовий сигнал з прямого виходу тригера скидає регістр  $R$  у нульовий стан.

Протягом  $k$  циклів активізації роботи пристрою сигнали вихідної шини регістра пам'яті, які поступають на вхід модуля порівняння з пороговими уставками формуються сигнали управління силовими вимикачами. Після цього пристрій переходить в режим очікування.

#### 4.4. Обґрунтування алгоритму розпізнавання сигналів промислової частоти енергосистем.

Алгоритм розпізнавання сигналів промислової частоти енергосистем та ідентифікації типів збурень методом інтегрально-диференціального розпізнавання та ідентифікації збурень та накидів у високовольтних електромережах будується на основі теорії алгоритмів, проблемно орієнтованих до систем реального часу [331-333]. На рис.4.21 показано уточнену структуру розробленого алгоритму розпізнавання досліджуваних спотворень гармонічних сигналів [97, 191].

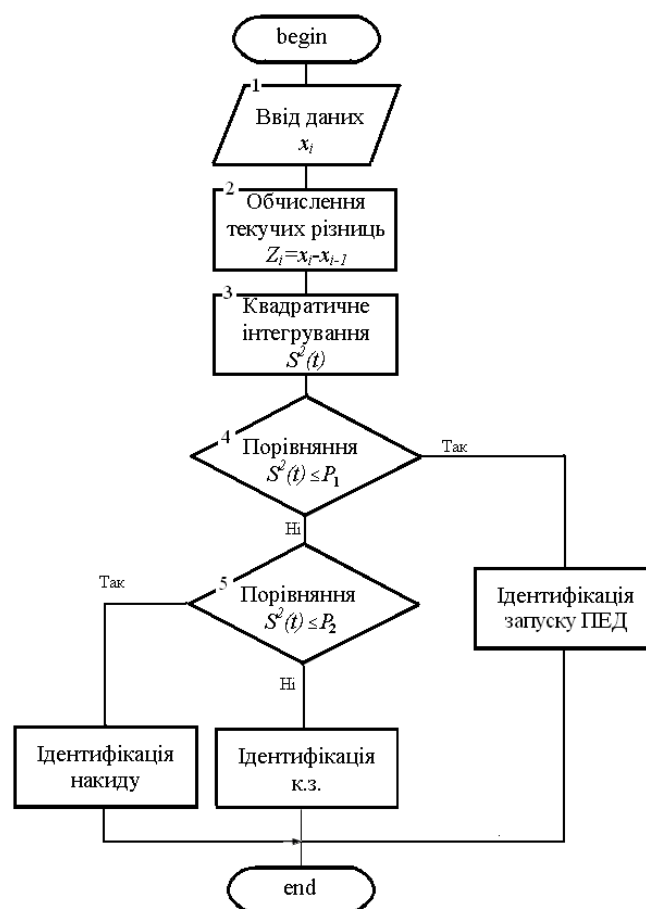
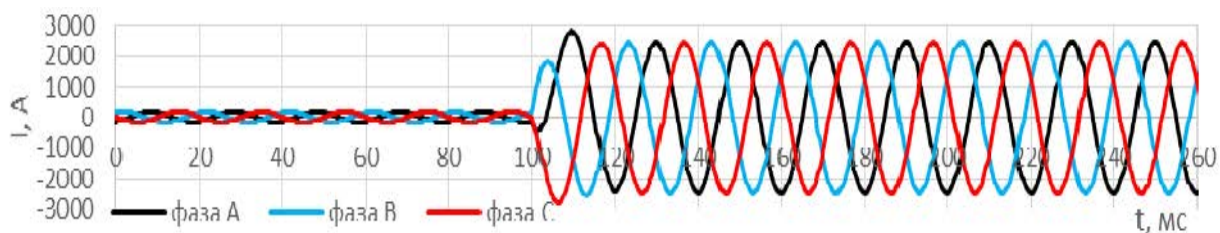


Рис.4.21 - Алгоритм розпізнавання спотворень гармонічних сигналів.

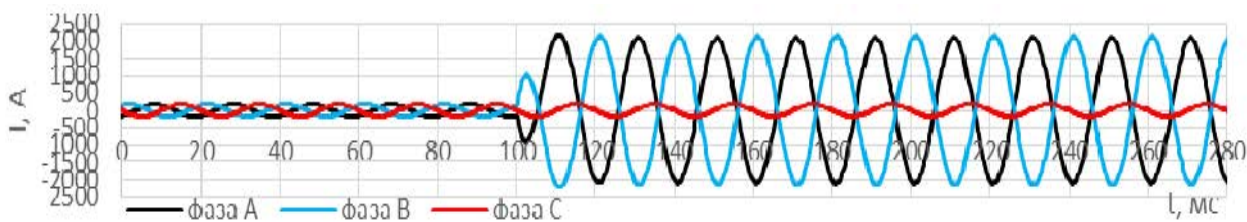
4.5. Імітаційне та експериментальне моделювання характеристик алгоритму розпізнавання збурень в ЛЕП на основі інтегрально-диференціального методу.

Моделювання накиду навантаження здійснюється шляхом вимкнення однієї з двох паралельно працюючих ліній [155, 157, 158, 191, 330, 331].

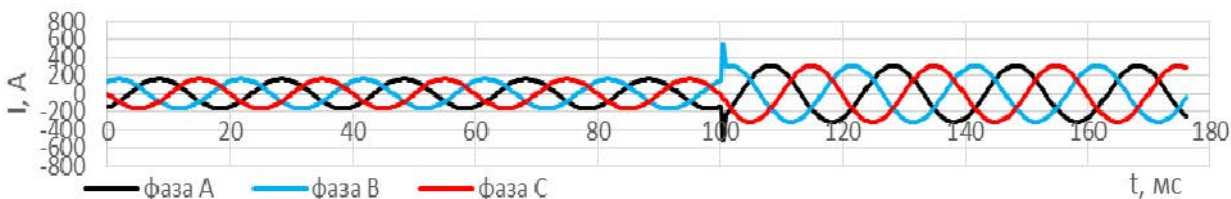
На рис.4.22 представлені цифрограми струмів отримані шляхом моделювання процесів електричної мережі в режимах: а) трифазне КЗ; б) двофазне КЗ; в) накид навантаження; г) самозапуск групи двигунів [156, 170].



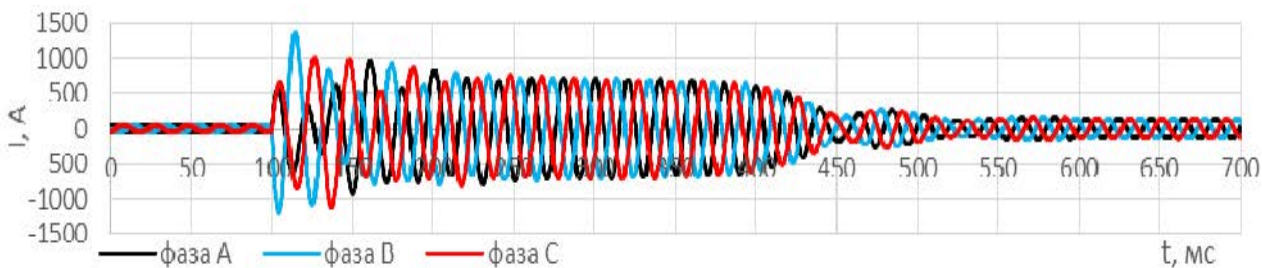
а)



б)



в)



г)

Рис.4.22 - Цифрограми струмів фаз за: а) трифазного КЗ; б) двофазного КЗ; в) накиду навантаження; г) самозапуску групи двигунів.

Найважчими режимами, з точки зору їх розпізнавання, є режими трифазного КЗ, накиду навантаження та самозапуску потужних двигунів. Ці режими є подібні, оскільки, характеризуються одночасним значним збільшенням струмів.

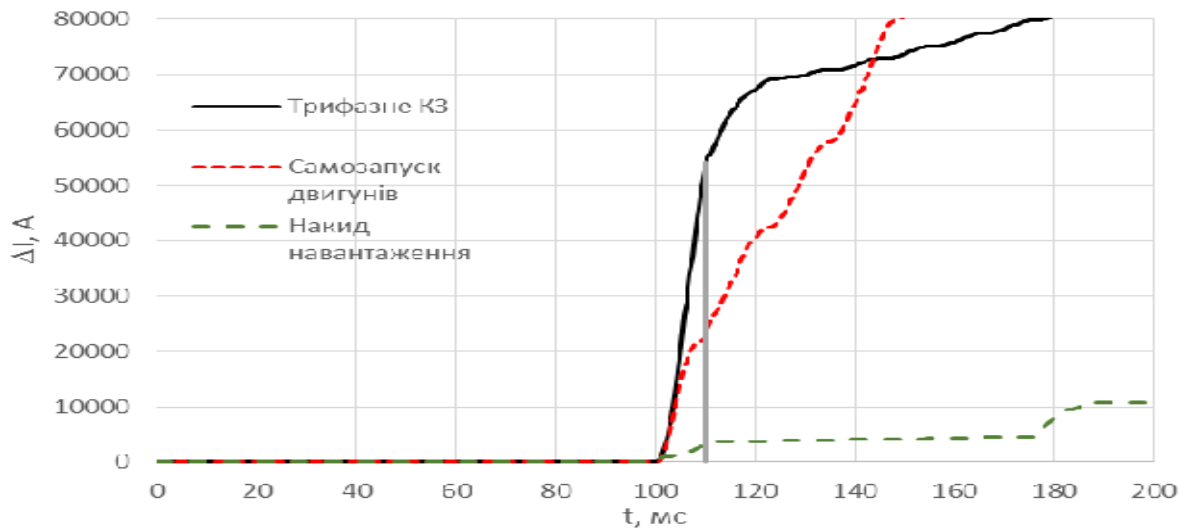
В [156] здійснено порівняння струмів двох режимів - трифазного КЗ та накиду навантаження. До координат цих двох режимів застосовано інтегрально-диференціальний метод їх ідентифікації. Порівнюючи результати застосованого різницево-модульного методу, можна зробити висновок, що розпізнати режим трифазного КЗ від накиду навантаження можна за півперіоду промислової частоти. Однак метод не дозволяє чітко розпізнати трифазне КЗ від самозапуску двигунів.

Для підвищення можливості розпізнавання сигналів використано запропонований метод інтегрально-диференціального обчислення результатів  $H(t)$  [156]. Крок дискретизації, при обчисленнях взято таким самим, як крок інтегрування, який, в нашому випадку, прийнято 60 точок на період та вихідною розрядністю АЦП 16 біт.

На рис.4.23а [330, 331] представлені інтегральні характеристики модульних різниць миттєвих значень струмів поточного та попереднього періодів у випадку трифазного КЗ, самозапуску двигунів та накиду навантаження і аналогічні характеристики для квадратів модульних різниць миттєвих значень струмів (рис.4.23б) [155, 330, 331].

Слід відмітити, що вже після першого періоду можна судити який з режимів відноситься до аварійних, а який - ні. Оскільки швидка лінійна зміна квадрату модульних різниць миттєвих значень струму відбувається за перший півперіод, то є можливість розпізнати аварійний режим навіть за півперіоду промислової частоти. Ознакою для розпізнавання аварійних режимів може бути швидкість наростання, амплітуда та кут нахилу інтегральної характеристики.

Розроблена програма реалізує алгоритм розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах.



а)



б)

Рис.4.23 - Залежність інтеграла модульних різниць струму фази А від часу за:  
а), б) - різних режимів.

Суть алгоритму полягає у розрахунку різниць між значеннями струмів до збурення і після збурення в лінії електропередач.

У програмі розраховуються 2 показники:

-  $\Delta$  – різниця між поточним і зміщеним на півперіода назад значенням струму;

-  $P$  – порогова функція, яка ідентифікує накид або коротке замикання.

Вимоги до встановленого програмного забезпечення: Microsoft Excel 2010/2013, Microsoft .NET 4.5.

Вхідні дані є наступними:

- 1) Список функцій та їх кількість  $\pi/2$  періодів;
- 2) Число точок розбиття кожного з  $\pi/2$  періодів;
- 3) Коефіцієнт масштабування точок функції.

Вихідні дані:

- 1) розраховані точки  $\Delta$  (вкладка Вихідні дані 1);
- 2) розраховані точки  $P$  (вкладка Вихідні дані 1);
- 3) розраховані точки кожної з функцій для кожної точки її розбиття з урахуванням коефіцієнта масштабування (вкладка Вихідні дані 2);
- 4) графіки у Microsoft Excel на основі розрахованих значень.

Результати розрахунків для тестових даних приведені на рис. 4.24, 4.25:

1) Накид (рис.4.24):

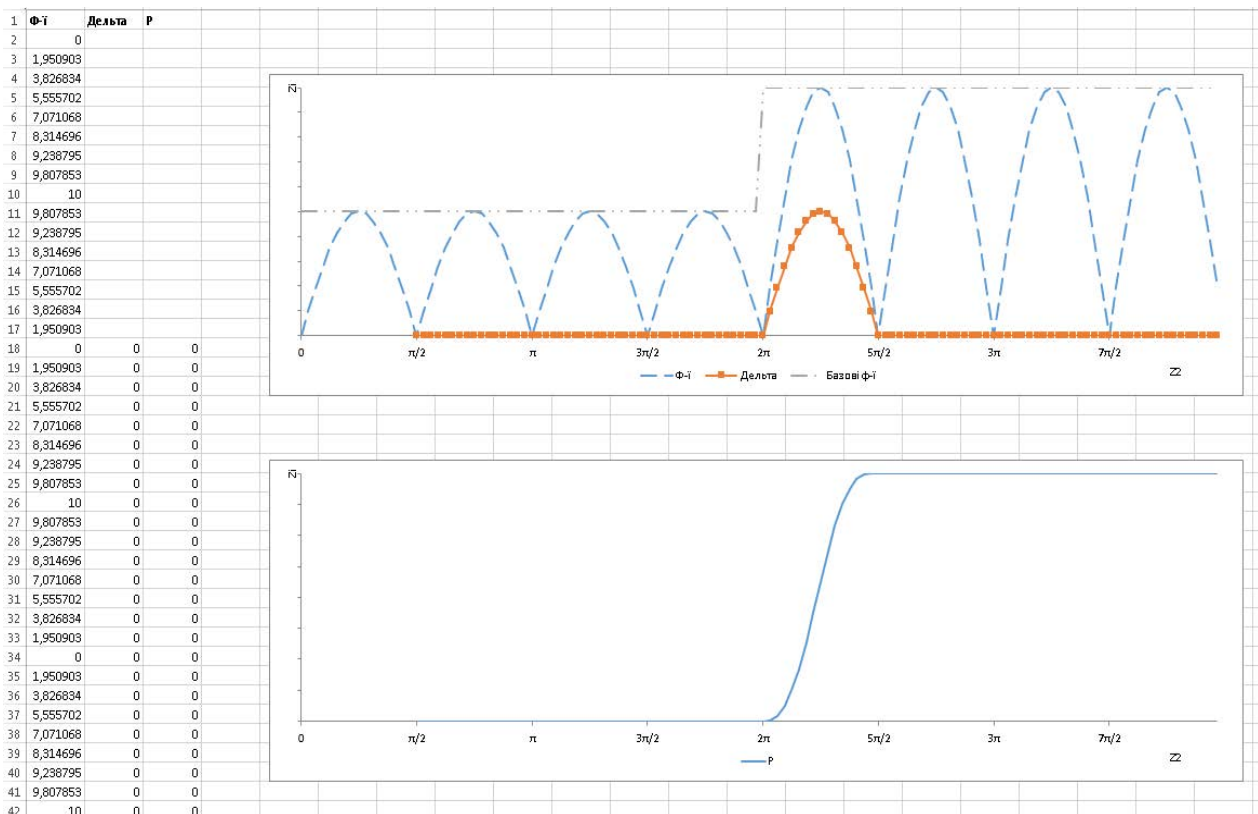


Рис.4.24 - Тестова модель накиду.

## 2) Коротке замикання (рис.4.25):

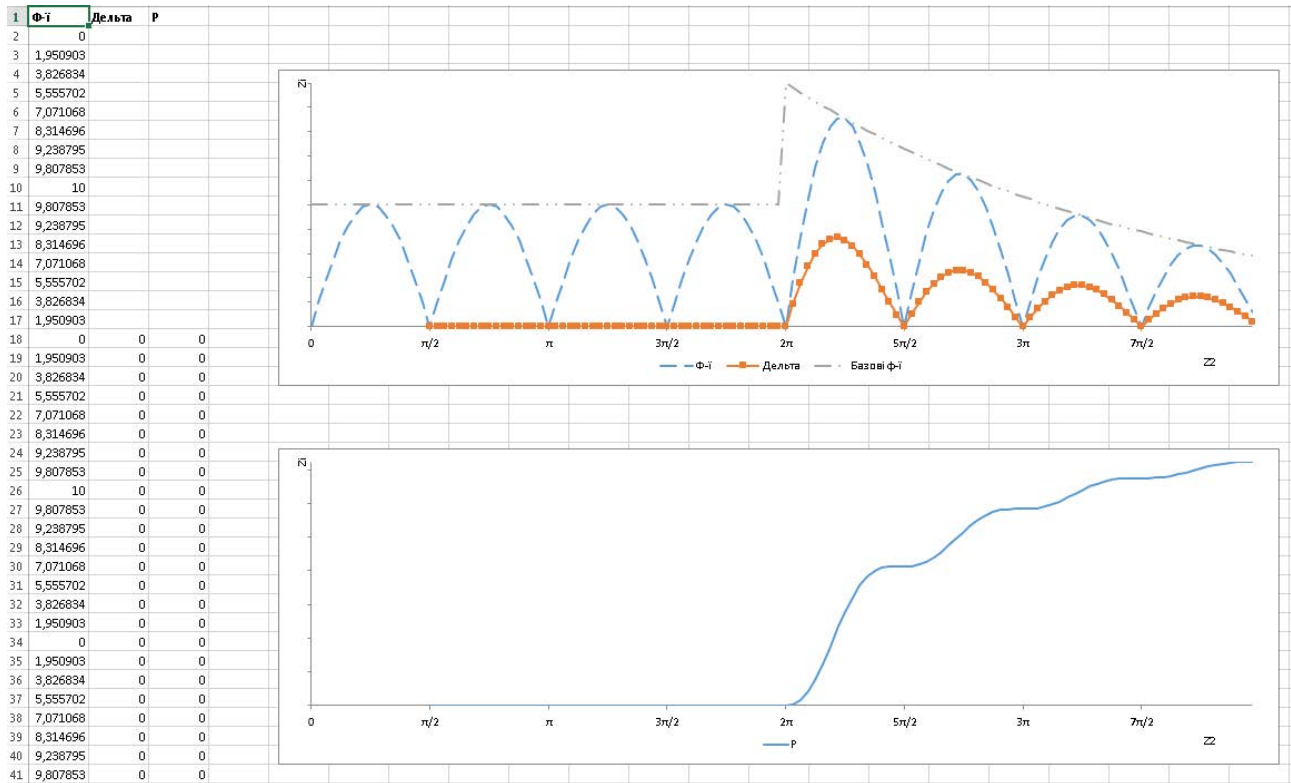


Рис.4.25 - Тестова модель короткого замикання.

Код програми приведено в додатку Ж2.

Отримані вихідні дані щодо структурної організації та характеристик спеціалізованих пристроїв розпізнавання збурень у високовольтних електромережах, які у порівнянні з відомими методами та пристроями, відрізняються інваріантністю до зміни амплітуд фазних струмів, дозволяють, шляхом опрацювання оцифрованих даних, здійснити ідентифікацію типу збурення на інтервалі 1-2 періодів промислової частоти.

### 4.6. Розробка структури та розрахунок характеристик мікроелектронного пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач.

Характеристики струмових реле захисту високовольтних ліній електропередач від коротких замикань, схеми їх підключення на електричних підстанціях та структурна схема цифрового пристрою релейного захисту, який реалізовано на основі мікроконтролера приведені в додатку З1.



В основу удосконалення пристрою релейного захисту поставлена реалізація запропонованого методу інтегрального диференціально-різницевого кореляційного опрацювання оцифрованих значень випрямлених фазних струмів. Структура пристрою релейного захисту, який реалізує запропонований метод показана на рис.4.26 [97, 170, 158, 169, 172, 191, 314]. Характеристики даної структури досліджені в роботах [97, 158, 169, 170, 172, 191, 314].

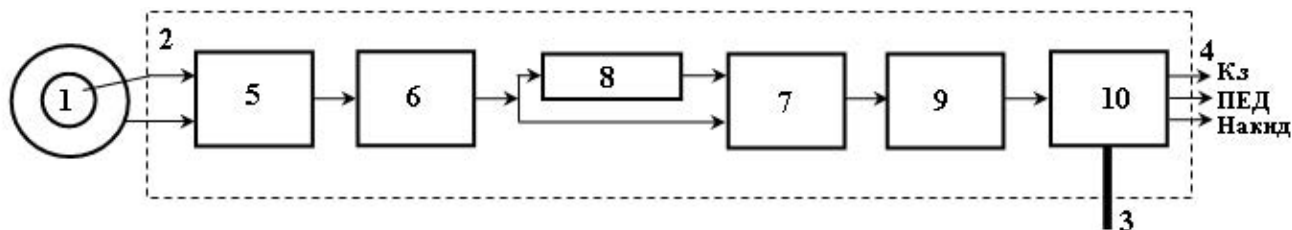


Рис.4.26 - Структурна схема запропонованого пристрою релейного захисту.

Пристрій релейного захисту (рис.4.26) (Патент 103938) містить: 1 – трансформатор струму, 2 - модуль опрацювання сигналів, 3 – шина порогової уставки, 4 – вихід управління силовим вимикачем, 5 – двохпівперіодний випрямляч, 6 – аналого-цифровий перетворювач з вихідним унітарним кодом, 7 – логічний елемент "Виключаюче АБО", 8 – регістр зсуву, 9 – інтегруючий квадратор, 10 – елемент порівняння.

Характеристики запропонованого пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач:

- розширені функціональні можливості;
- висока швидкодія розпізнавання накидів та коротких замикань на інтервалі одного – двох періодів промислової частоти;
- спрощена схема мікроелектронної реалізації пристрою;
- можливість реалізації у вигляді кристала ПЛІС;
- зменшена вартість пристрою та можливість масового тиражування та впровадження на високовольтних підстанціях;
- підвищена надійність та можливість працювати в широкому діапазоні температур.

Структурні перетворення сигналів у мікроелектронних компонентах пристрою релейного захисту описуються перетвореннями, приведеними на рис.4.27.

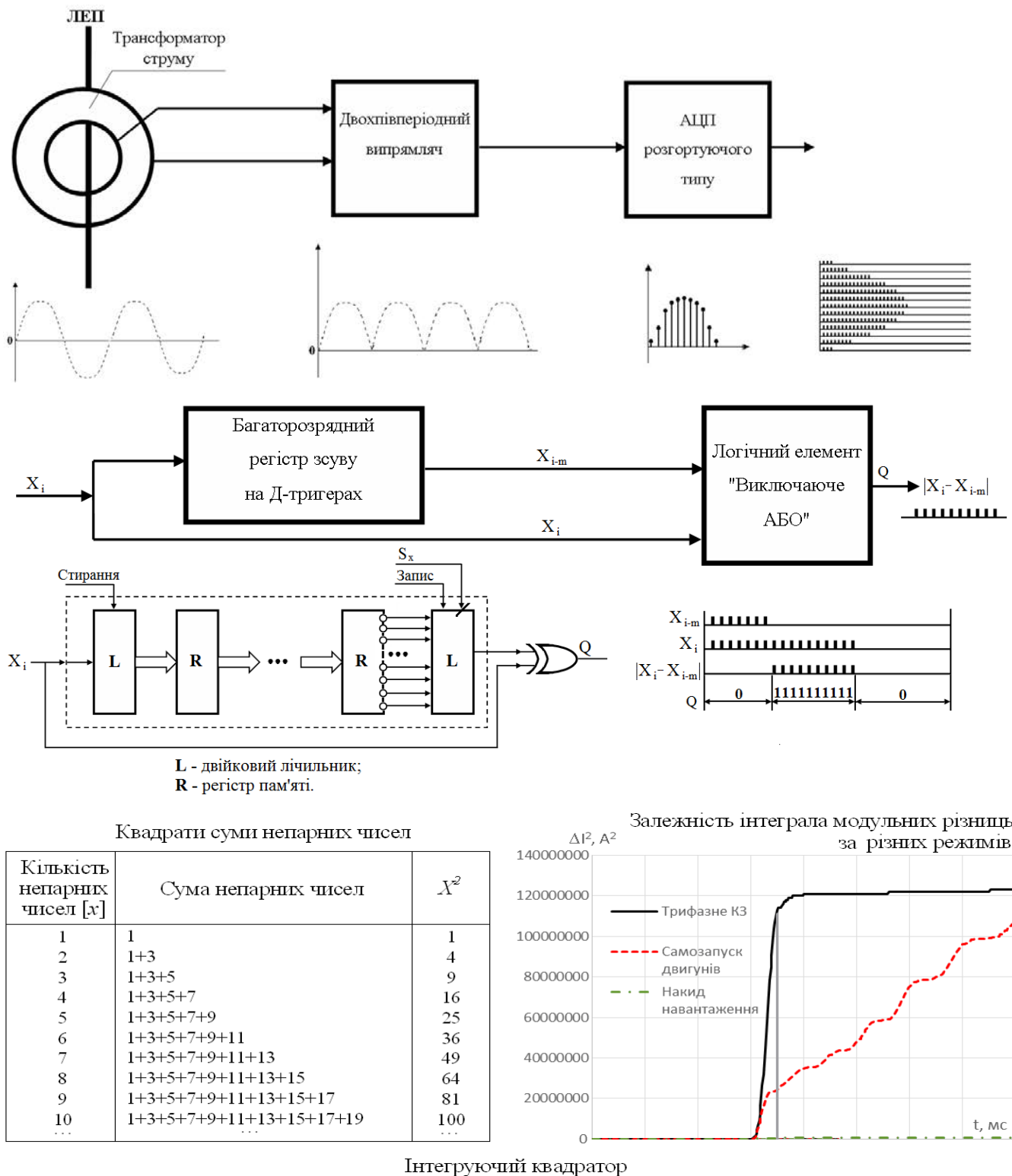
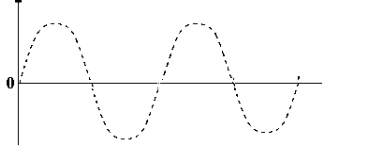
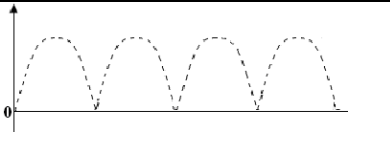
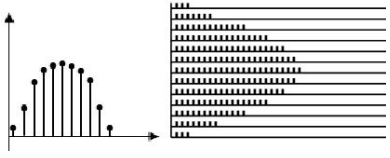
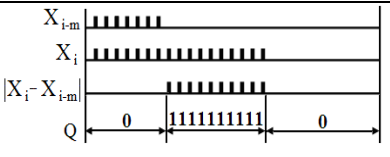
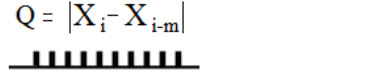


Рис.4.27 - Структурні перетворення сигналів у мікроелектронних компонентах пристрою релейного захисту.

Розрахунок кількісної оцінки структурної складності перетворень сигналів у мікроелектронних компонентах пристрою релейного захисту приведено у табл.4.2.

Таблиця 4.2 - Оцінка структурної складності перетворень сигналів у мікроелектронних компонентах пристрою релейного захисту

Структурне відображення сигналу	Лінія		Пересічення		Дотик		Поворот	Стрілка	$k_c$
	1	1,2	3	3,1	2	2,2	2,2	2	
	2	1	1	4	1			2	22,6
	2	1	1		5		4	2	29
	24	163	1		174	11		2	594,8
	6	28			34				107,6
	1	10			10				33

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано вибір функціональних та структурних рішень пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань.

Таким чином для реалізації взірця пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач обґрунтовано наступні мікроелектронні компоненти:

- двохпівперіодний випрямляч фазного струму з характеристиками типу CS10D- CS50D фірми Diotec [336];
- аналого-цифровий перетворювач розгортуючого типу, який містить послідовно з'єднані генератори імпульсів, двійковий лічильник, ЦАП, компаратор, на один з входів якого подається вхідний потенціал, логічний

елемент "Г", на виході якого формується унітарний код вхідного аналогового сигналу [98];

- біт-орієнтований  $60 \cdot k$ -розрядний регістр зсуву на D-тригерах, де 60 – кількість цифрових відліків фазних струмів на інтервалі одного періоду промислової частоти,  $2^k$  - діапазон квантування вхідних сигналів [98];
- логічний елемент "Виключаюче АБО" на основі логічних елементів "І-НЕ" та "АБО" з об'єднаними виходами [181];
- інтегруючий квадратор з елементом порівняння порогової уставки, структура якого відповідає спрощеній структурі перемножувача унітарних кодів [191].

Розрахунок системних характеристик компонентів пристрою релейного захисту приведений в додатку 32.

Схеми стенду для лабораторних випробувань дослідного взірця пристрою релейного захисту (ПРЗ.6-10) приведені в додатку 33.

Таким чином для забезпечення ідентифікації типу збурення на виході інтегруючого квадратора на інтервалі одного періоду промислової частоти тактова частота генератора повинна бути не менше 6 кГц.

У результаті розробки схемотехнічних рішень пристрою релейного захисту розроблений і реалізований його дослідний взірець ПРЗ.6-10, який випробуваний в лабораторних умовах згідно розробленої програми та результатів випробувань, які наведені в додатку Й. За результатами випробувань скоректовані характеристики окремих компонентів дослідного взірця, який переданий ІМСКОЕ для виготовлення дослідної партії та промислових випробувань у складі керувально-діагностувальної системи "Альтра".

#### Висновки до четвертого розділу

1. Проведений аналіз перехідних процесів у високовольтних електромережах при виникненні збурень типу: накидів, коротких замикань, запусків та відключень потужних електроприводів. Це дозволило з єдиних методологічних позицій дослідити процеси зміни структурних характеристик

гармонічних сигналів та сформулювати вимоги та рекомендації з вибору та порядку використання методів та алгоритмів опрацювання даних. Перехідні процеси розглянуто в різних аспектах, в умовах дії збурюючих впливів і, виникаючих при цьому, спотворень гармонічних сигналів промислової частоти.

2. Проаналізовані теоретичні засади методів структурних перетворень гармонічних сигналів на основі принципів рандомізації, нейропроцесорного опрацювання. Запропоновані оцінки розпізнавання збурень у високовольтних електромережах на основі нормованого коефіцієнта взаємкореляції та цифрового інтегрального опрацювання функцій огинаючих низьких та високих частот. Показано, що досліджені принципи структурного перетворення гармонічних сигналів та методи їх цифрового опрацювання характеризуються великою алгоритмічною та часовою складністю, а також потребують великої вибірки, більше 10-15 періодів сигналів промислової частоти.

3. Вперше запропонований інтегрально-диференціальний метод розпізнавання збурень у високовольтних електромережах шляхом квадратичного перетворення структури гармонічних сигналів та накопичення інтегралу модульних різниць фазних струмів зсунутих на інтервал півперіода промислової частоти. Вперше розроблена структурна формалізація координат цифрових даних перехідних процесів на основі решітчастих функцій. Розроблено структурне представлення гармонічних сигналів при коротких замикання в електромережах з експоненціальним спадом струму без спотворення та одночасним спотворенням гармонічного сигналу на інтервалі часу  $t_0 + \pi/2$  та  $t_0 + \pi/4$ .

4. Вперше розроблена структура решітчастої функції виявлення, розпізнавання та ідентифікації збурень в електромережах типу накиду та короткого замикання, яка дозволяє розпізнавати даний клас збурень шляхом порівняння квадратичної інтегрально-різницевої функції з пороговою уставкою.

5. На основі теоретичних засад запропонованого методу сформульовано алгоритм розпізнавання сигналів промислової частоти та ідентифікації типів збурень. Запропонований алгоритм дозволив реалізувати технологію

програмного моделювання різних типів замикань та запуску потужних електроприводів у високовольтних електромережах. Найважчими режимами, з точки зору їх розпізнавання, є режими трифазного КЗ, накиду навантаження та самозапуску потужних двигунів. Ці режими є подібні, оскільки, характеризуються одночасним значним збільшенням струмів. До координат цих двох режимів застосовано інтегрально-диференціальний метод їх ідентифікації. Крок дискретизації  $\tau$ , при обчисленнях прийнято 60 точок на період промислової частоти. В результаті моделювання отримані інтегральні характеристики модульних різниць миттєвих значень струмів поточного та попереднього періодів у випадку трифазного КЗ, самозапуску двигунів та накиду навантаження і аналогічні характеристики для квадратів модульних різниць миттєвих значень струмів. Аналіз отриманих характеристик демонструє можливість чіткої ідентифікації спотворень типу накиду, коротких замикань та запуску потужних електроприводів. Слід відмітити, що вже після першого періоду можна судити який з режимів відноситься до аварійних, а який - ні. Оскільки швидка лінійна зміна квадрату модульних різниць миттєвих значень струму відбувається за перший півперіод, то є можливість розпізнати аварійний режим навіть за півперіоду промислової частоти. Ознакою для розпізнавання аварійних режимів може бути швидкість наростання, амплітуда та кут нахилу інтегральної характеристики.

6. Розроблений інтерфейс користувача для програми, яка реалізує алгоритм розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах, що полягає у розрахунку різниць між значеннями струмів до і після збурення в лінії електропередач.

7. Розроблена структура пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач, реалізованого шляхом конвеєрного різницево-модульного кореляційного опрацювання гармонічних сигналів промислової частоти 50 Гц, що дозволило розпізнавати накиди, замикання на землю та запуски потужних електроприводів, який, у порівнянні з відомими, характеризується інваріантністю до амплітуди струмів збурень, що спростило його структуру та реалізацію у мікроелектронному виконанні на ПЛІС.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ ПРИ ПОБУДОВІ ОБРАЗНО- КЛАСТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Теорія та методологія структуризації поліфункціональних даних може бути ефективно застосована при вирішенні широкого класу задач, пов'язаного з необхідністю підвищення інформативності одномірних та багатомірних потоків цифрових інформаційних даних, зображень шляхом зменшення їх надлишковості на основі різних принципів та методів їх структурних перетворень. Одним з перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є комплексне інтегроване застосування статистичного, кореляційного, спектрального, кластерного та ентропійного аналізів [50, 136, 164, 234, 338]. Актуальною прикладною задачею при цьому є підвищення інформативності та зменшення об'ємів даних, які формуються у моніторингових РКС шляхом побудови образно-кластерних моделей станів об'єктів управління [97, 159, 164, 168, 173, 177].

5.1. Структурна та функціональна організація моніторингових комп'ютеризованих систем.

Швидкий розвиток потужних високопродуктивних інформаційних мереж, хмарних технологій, спецпроцесорної мікроелектроніки створює нові широкі можливості удосконалення методів та засобів локального і дистанційного моніторингу станів складних промислових об'єктів управління (ОУ). При цьому обґрунтовано виникає необхідність ефективного вирішення комплексу теоретичних і прикладних завдань взаємодії ресурсів розподілених комп'ютерних і комп'ютеризованих систем, структуризації інформаційних потоків, які формуються, передаються і обробляються в сучасних інформаційних мережах.

Важливим результатом оптимізації методів і характеристик таких систем та потоків інформації є підвищення інтегрованості уявлення моніторингової інформації про стан ОУ, що дозволяє істотно покращити структуру інформаційних потоків, які передаються в реальному часі по виділених або колективних каналах інформаційних мереж. Зазначений фактор зменшення обсягу повідомлень також відноситься до завдань організації баз даних і знань при тривалому періоді (дні, місяці і т.д.) моніторингу ОУ.

Актуальність вирішення такої проблеми особливо виділяється для вибухо- і екологічно небезпечних об'єктів [97, 159].

Іншим класом ОУ, які вимагають безперервного моніторингу, є квазістаціонарні об'єкти і промислові установки, які можуть на інтервалах коротких проміжків часу здійснювати перехід в передаварійні та аварійні стани.

Для поступового переходу до створення подібних систем перш за все необхідно визначити фундаментальні обмеження, властиві сучасним інформаційним системам. І в рамках цих обмежень розробити відповідні методи і технології. В якості таких обмежень для розподілених систем особливо важливими є наступні [159, 338]:

- архітектурна та структурна організація розподілених інформаційних систем повинні відповідати сучасним міжнародним стандартам;
- задоволення фундаментальних обмежень, властивих методам і технологіям доставки інформаційних ресурсів між взаємодіючими вузлами комп'ютерних систем і мереж;
- обмеження, пов'язані з можливостями створення функціонально повних систем, які включають особливі умови аналізу складних систем стаціонарних, квазістаціонарних і нестаціонарних об'єктів на основі сучасної теорії структурного, статистичного, кореляційного, спектрального, логіко-статистичного, кластерного, ентропійного і образно-кластерного аналізу;
- обмеження, пов'язані із забезпеченням граничних можливостей створюваних інформаційних систем та їх компонентів;



- системовизначаючі або інтегративні властивості великих інформаційних мереж, що обмежують можливості їх оптимальної структуризації при створенні бажаних спеціалізованих і проблемно-орієнтованих систем;
- можливості сучасних інтеграційних технологій;
- граничні можливості створення об'єктно-орієнтованих технологій.

Системно-структуроване задоволення концептуально сформульованих фундаментальних обмежень дозволяє успішно реалізувати методику адаптивної інтеграції системовизначаючих характеристик існуючих і майбутніх інформаційних технологій.

На основі проведеного у першому розділі аналізу систем моніторингу станів розподілених об'єктів здійснено експертні оцінки їх інформативності та структурної складності. Слід відмітити, що експертні оцінки є індивідуальні для кожної системи і можуть змінюватися у процесі модернізації та удосконалення компонентів систем.

В таблиці 5.1 приведені експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів структури типової системи 800xA (рис.1.3) [97, 98, 162, 266, 267].

Таблиця 5.1 - Експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів типової структури дистрибутивної РКС на базі 800xA System

Назва об'єкта	Інформаційна складність	Структурна складність	Кількість об'єктів
Монітор	20	18	3
Системний сервер	60	20,6	1
Мережа	5	31	1
Модем	10	8	1
Контролер	30	47	3
Сервер бази даних	60	28	1
Контролер низової мережі	15	12	3
Сенсор	100	27	n

Відповідно до даних таблиці 5.1 та згідно критерію (2.2), оцінка інформативності типової структури АСУТП на базі 800xA System становить  $F_C = 100n + 330$  одиниць, структурної складності -  $k_c = 27n + 312,6 + 32_z$

одиниць, а ефективність структури  $k_e = \frac{100n + 330}{27n + 312,6 + 32_z}$  одиниць, де  $n$  -

кількість об'єктів.

В таблиці 5.2 приведені експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів системи моніторингу "Диспетчер" (рис.1.4) [97, 98, 162, 266, 267].

Таблиця 5.2 - Експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів системи моніторингу "Диспетчер"

Назва об'єкта	Інформаційна складність	Структурна складність	Кількість об'єктів
Станція оператора	20	18	4
Сервер моніторингу	40	21	1
Wi Fi роутер	5	10	1
LAN роутер	5	10	1
Мережа	5	31	1
Контролер	10	27	4
Сенсор	100	27	n

Відповідно до даних таблиці 5.2 та згідно критерію (2.2), оцінка інформативності системи моніторингу "Диспетчер" становить  $F_C = 100n + 175$  одиниць, структурної складності -  $k_c = 27n + 252 + 24_z$  одиниць, а ефективність

структури  $k_e = \frac{100n + 175}{27n + 252 + 24_z}$  одиниць.

В таблиці 5.3 приведені експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів системи управління виробництвом Centum VP (рис.1.5) [97, 98, 162, 266, 267].

Таблиця 5.3 - Експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів системи управління виробництвом Centum VP

Назва об'єкта	Інформаційна складність	Структурна складність	Кількість об'єктів
Станція управління інформацією	40	21	1
Станція управління активами	20	18	1
Станція оператора	20	18	6
Сервер моніторингу	60	20,6	1
Мережа	5	31	1
Контролер	30	47	3
Сенсор	100	27	n

Відповідно до даних таблиці 5.3 та згідно критерію (2.2), оцінка інформативності системи управління виробництвом Centum VP становить  $F_C = 100n + 335$  одиниць, структурної складності  $k_c = 27n + 339,6 + 36_z$  одиниць, а ефективність структури  $k_e = \frac{100n + 335}{27n + 339,6 + 36_z}$  одиниць.

В таблиці 5.4 приведені експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів системи моніторингу, діагностики та керування "ЕСМДУ-ТРАНС" (рис.1.6) [97, 98, 162, 266, 267].

Таблиця 5.4 - Експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів системи моніторингу, діагностики та керування "ЕСМДУ-ТРАНС"

Назва об'єкта	Інформаційна складність	Структурна складність	Кількість об'єктів
Станція оператора	20	18	1
Сервер моніторингу	60	20,6	1
Мережа	5	31	1
Монітор	20	18	1
Контролер	30	47	2
Виконавчий механізм	5	10	n/2
Сенсор	100	21	n

Відповідно до даних таблиці 5.4 та згідно критерію (2.2), оцінка інформативності системи моніторингу, діагностики та керування "ЕСМДУ-

ТРАНС" становить  $F_C = 100n + 165 + 5n/2$  одиниць, структурної складності  $k_c = 21n + 181,6 + 10n/2 + 128z_z$  одиниць, а ефективність структури

$$k_e = \frac{100n + 165 + 5n/2}{21n + 181,6 + 10n/2 + 128z_z} \text{ одиниць.}$$

На рис.5.1 приведені графіки розрахунку інформаційно-структурної складності моніторингових РКС, які розроблені відомими фірмами: АВВ, Yokogawa, Електросвіт і застосовуються в різних галузях промисловості.

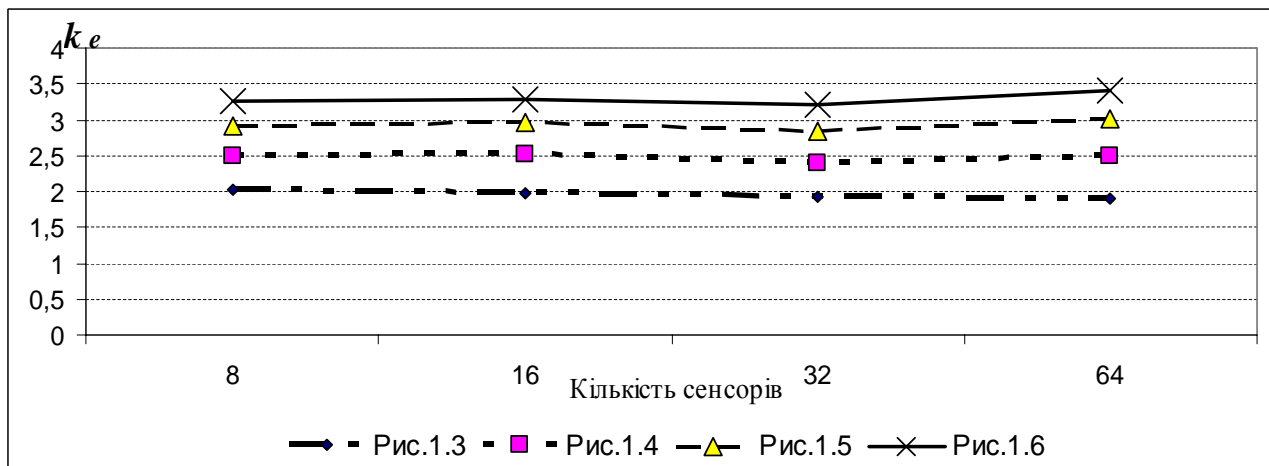


Рис.5.1 - Графіки інформаційно-структурної складності моніторингових РКС.

Результати аналізу показують, що характеристики ефективності структур відомих моніторингових систем покращуються при зростанні кількості сенсорів та виконавчих механізмів. В той же час оцінки інформаційно-структурної складності відомих структур згідно критерію складності (2.2) та експертних оцінок інформативності та структурної складності їх компонентів (табл..2.1, 2.2) не перевищують 4 одиниць.

Виконаний аналіз структури та функцій інтегрованих комп'ютеризованих систем моніторингу універсального призначення свідчить, що проблемі розвитку теорії, систематизації функцій та методам підвищення ефективності роботи операторів взаємодії "оператор – моніторингова система" (ОМС) приділено недостатньо уваги. При цьому практично відсутні дослідження структуризованих моделей ОМС, адаптованих до конкретних інформаційних, технологічних та семантичних станів реальних промислових об'єктів управління. Недостатньо уваги приділено реалізації принципів побудови

образно-кластерних моделей (ОКМ) моніторингу відхилень станів об'єктів від норми на основі статистичних, кореляційних, спектральних, ентропійних, кластерних та логіко-статистичних інформаційних моделей, теоретичні основи яких викладено у наукових працях [50, 234, 338].

У структурі комп'ютеризованих систем контролю та управління промислових об'єктів моніторинг за їх станом та технологічними режимами роботи виконують оператори абонентських станцій [234]. При цьому методи представлення, структуризація даних та технологія інтерактивної взаємодії ОМС, як свідчить практика, дослідження науковців та розробки фірм [238, 239, 243, 339, 340], надійність та результативність функціонування ОМС в реальному часі суттєво впливає на ефективність роботи об'єктів та інформаційної системи діагностування в цілому.

Важливим елементом вказаної інформаційної взаємодії є інтерактивний режим реалізації моніторингу, ефективна структуризація моделей об'єктів управління, а також надійне розпізнавання квазістаціонарних, нештатних, передаварійних, аварійних та екологічно-небезпечних ситуацій на об'єктах. Особливе значення при цьому надається забезпеченню низької складності та високої швидкодії реакції оператора на зміни станів об'єктів.

Перспективним методом реалізації таких характеристик комп'ютеризованої системи на рівні абонентської станції оператора є образно-кластерна структуризація даних та відображення відповідної моделі на екрані монітора [168, 234, 243]. Досвід побудови такого класу моделей, отриманий у галузі літакобудування, на основі теорії та ентропійних принципів суб'єктивного аналізу В. Касьянова [257], а також проектування спеціалізованих комп'ютерних систем [96].

5.2. Метод побудови образно-кластерної моделі контролю квазістаціонарних технологічних процесів.

Контрольно-вимірювальні комп'ютеризовані системи призначені для вимірювання технологічних параметрів та ідентифікації станів технологічного

процесу у системах збору та підготовки інформації автоматизованих систем керування технологічними процесами складних виробничих комплексів. Зокрема для контролю та ідентифікації станів "норми", "прогноз аварії" та "аварії" для технологічних процесів та об'єктів, які характеризуються підвищеним рівнем вибухо- та екологічної безпеки, наприклад об'єктів атомної, енергетичної та нафтогазової промисловості.

Суть відомих методів контролю параметрів технологічного процесу полягає у вимірюванні фізичних параметрів об'єкта, розрахунку їх статистичних характеристик та відображенні станів технологічного процесу на дисплеї оператора типовими формами, які описані у 1 розділі (п.1.2).

Недоліком таких методів є звужені функціональні можливості та низька інформативність, оскільки відображення окремих технологічних та віртуальних розрахункових параметрів здійснюється не інтегровано на екрані монітора оператора і не дозволяє здійснювати структуризовану ідентифікацію стану технологічного процесу та об'єкту контролю. При певній складності об'єкту контролю і великій кількості контрольованих та розрахункових технологічних параметрів спостерігається низька ефективність та можливість появи великої кількості помилок дій оператора при ідентифікації станів технологічного процесу "норма", "прогноз аварії" та "аварія".

Відомий метод контролю параметрів технологічного об'єкта, реалізований у пристрої контролю роботи технологічного процесу [341], суть якого полягає у тому, що стани технологічного об'єкта "норма", "прогноз аварії" та "аварія" розраховуються на основі вимірних параметрів та обчисленої кластерної моделі, і кожен з цих станів відображається на окремому індикаторі (рис.5.2) [341].

На рис.5.2 зображена структурна схема системи контролю технологічного процесу, що реалізує відомий метод, яка містить: 1 – блок оцінки стану об'єкту контролю, 2 – об'єкт контролю (технологічний параметр багатоканального об'єкта), 3 – генератор імпульсів, 4 – двійковий лічильник, 5 – постійний запам'ятовуючий пристрій, 6 – схема порівняння, 7 – логічний елемент "АБО", 8 – RS-тригер, 9 – індикатор стану.

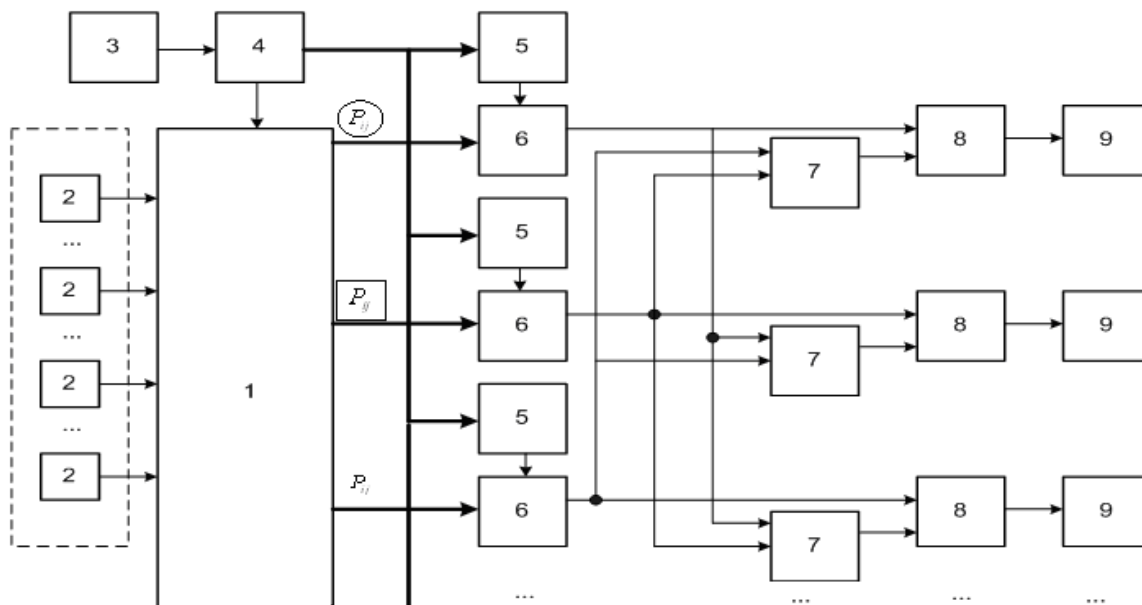


Рис.5.2 – Структурна схема системи контролю роботи технологічного процесу ( $k_c = 518,6$ ).

В таблиці 5.5 приведені експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів даної системи [97, 98, 162, 265-267]. Структура модуля оцінки стану об'єкту управління представлена рис.2.4 і характеризується характеристиками інформативності та структурної складності згідно таблиці 2.4.

Таблиця 5.5 - Експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів структурної схеми процесора контролю роботи технологічного об'єкту

Назва об'єкта	Інформаційна складність	Структурна складність	Кількість об'єктів
Блок оцінки стану об'єкту контролю (рис.2.4)	135	217,2	1
Сенсор	100	27	$n$
Генератор імпульсів	5	15	1
Лічильник	10	19	1
Постійний запам'ятовуючий пристрій	15	17	3
Схема порівняння	10	19	3
Логічний елемент АБО	1	19	3
RS -тригер	2	19	3
Індикатор стану	2	15	3

На основі приведених експертних оцінок та критеріїв розрахунку структурної складності (2.1) та інформативності (2.2) розраховано кількісні оцінки структурної складності та інформативності структурної схеми процесора для контролю роботи технологічного об'єкту:  $k_c = 27n + 518$ ;  $F_C = 100n + 240$ . Відповідно ефективність даної структури становить:

$$k_e = \frac{100n + 240}{27n + 518} \text{ одиниць.}$$

Недоліком такого методу є звужені функціональні можливості та низька інформативність, оскільки результатом аналізу технологічного процесу є контроль відхилення від норми тільки ймовірнісних переходів кластерної моделі без врахування його вимірних та розрахованих статистичних характеристик. Також недоліком є контроль параметрів технологічного процесу шляхом відображення його станів "норма", "прогноз аварії" та "аварія" на багатьох окремих індикаторах, які здійснюють тільки реєстрацію факту відхилення від норми і не дозволяють інтегровано ідентифікувати ці стани у вигляді структуризованої образно-кластерної фейс-моделі.

Ще один відомий метод контролю параметрів технологічного процесу [342], включає циклічний вимір значень кожного параметра та їх запам'ятовування, визначення стану технологічного процесу шляхом порівняння вимірюваних значень параметра в області можливих значень норми, ідентифікацію стану квазістаціонарного об'єкта, визначення структурної автокореляційної функції та нормованого коефіцієнта взаємкореляції, за якими порівнюють:

- ковзні статистичні характеристики математичного сподівання, згідно

виразу: 
$$L_1 = \begin{cases} 0, a_1 < M_j < a_2 \\ 1, a_1 \geq M_j \geq a_2 \end{cases},$$

де 
$$M_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} x_{i+j}, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad n - \text{кількість контрольованих параметрів}$$

технологічного об'єкту;



- структурну кореляційну функцію, згідно виразу:

$$L_2 = \begin{cases} 0, b_1 < C_{xx}(j) < b_2 \\ 1, b_1 \geq C_{xx}(j) \geq b_2 \end{cases},$$

$$\text{де } C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} (x_i - x_{i-j})^2, j = \overline{0, m};$$

- коефіцієнти нормованої взаємкореляції між двома параметрами, згідно

$$\text{виразу: } L_3 = \begin{cases} 0, 0 < \rho_{xy} < 1 \\ 1, 0 \geq \rho_{xy} \geq -1 \end{cases},$$

$$\text{де } \rho_{xy} = \frac{R_{xy}(0)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \sigma_x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} (x_i - M_{xj})^2, \sigma_y = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} (y_i - M_{yj})^2.$$

Таким чином згідно приведеної сукупності вимірних та визначених параметрів технологічного процесу в даному способі виконується наступна послідовність операцій;

$$\begin{aligned} X_{ТП} = F(\{x_i\}, \{y_i\}, S, M_j, M_{xj}, M_{yj}, \sigma_x, \sigma_y, C_{xx}(j), \\ R_{xy}(0), \rho_{xy}, L_1, L_2, L_3), \end{aligned} \quad (5.1)$$

де:  $\{x_i\}, \{y_i\}$  - вимірювання параметрів технологічного процесу;  $S$  - ідентифікація квазістаціонарного стану технологічного процесу;  $M_j, M_{xj}, M_{yj}$  - визначення ковзних статистичних характеристик математичного сподівання;  $\sigma_x, \sigma_y$  - визначення середньоквадратичних оцінок дисперсії;  $C_{xx}(j)$  - визначення структурної кореляційної функції;  $R_{xy}(0)$  - визначення центрованої взаємкореляційної функції в нульовій точці між параметрами  $x_i, y_i$ ;  $\rho_{xy}$  - визначення коефіцієнта нормованої взаємкореляції між кожною парою параметрів, на основі яких визначаються  $L_1, L_2, L_3$  - логіко-статистичні оцінки порівняння вимірюваних значень параметрів в області можливих значень норми, відповідно по амплітуді ( $L_1$ ), по динаміці ( $L_2$ ) та фазі ( $L_3$ ).

Критерії аналітичних виразів приведеної сукупності параметрів технологічного процесу характеризуються експертними оцінками структурної складності їх компонентів (табл.5.6) [97, 98, 162, 265-267].

Таблиця 5.6 - Компоненти оцінки структурної складності аналітичних виразів параметрів технологічного процесу.

Назва параметра	Кількість елементів параметра					Структурн. складність параметра, $k_c$
	Літера	Цифра	Індекс	Символ	Знак	
Порівняння характеристик по амплітуді $L_1$	7	2	7	2	7	114
Статистичні характеристики математичного сподівання $M_j, M_{xj}, M_{yj}$	3	1	7	2	5	64
Порівняння динамічних характеристик $L_2$	9	2	9	2	7	138
Структурна кореляційна функція $C_{xx}(j)$	5	1	10	5	7	120
Порівняння характеристик по фазі $L_3$	3	6	5	2	8	92
Коефіцієнт нормованої взаємкореляції $\rho_{xy}$	4	1	6	2	3	74
Середньоквадратичні оцінки дисперсії $\sigma_x, \sigma_y$	4	1	9	3	6	96

Отже, кількісна оцінка структурної складності аналітики параметрів технологічного процесу (5.1) становить:

$$k_{cX_{ТП1}} = k_{cM_j, M_{xj}, M_{yj}} + k_{c\sigma_x, \sigma_y} + k_{cC_{xx}(j)} + k_{cR_{xy}(0)} + k_{c\rho_{xy}} + k_{cL_1, L_2, L_3} = 698 \text{ од.}$$

Система контролю, що реалізує відомий метод (рис.5.3) містить блок введення інформації 1, датчики вимірів параметрів 1, 1-2, ..., 1-п, блок збору інформації 2, пульт оператора 3, пристрій підготовки інформації 4, пульт оператора 3, блок виведення інформації 7, інформаційні шини – 5, 6, 8, 9.

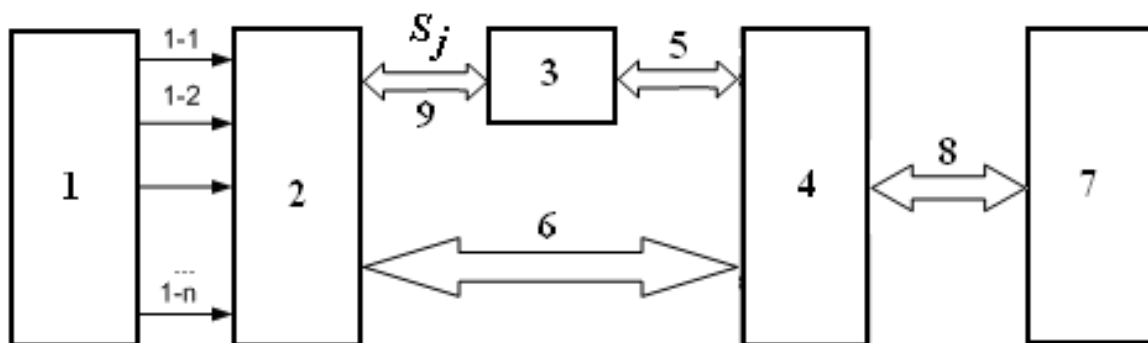


Рис.5.3 – Структурна схема системи контролю параметрів технологічного процесу ( $k_c = 193$ ).

В таблиці 5.7 приведені експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів даної системи [97, 98, 162, 265-267].

Таблиця 5.7 - Експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів структурної схеми відомої системи контролю роботи технологічного об'єкту

Назва об'єкта	Кількість об'єктів	Інформаційна складність	Структурна складність	Інформаційно-структурна складність
Блок збору інформації	1	135	217,2	0,62
Сенсор	$n$	100	27	3,7
Оператор	1	15	13,2	1,14
Пристрій підготовки інформації	1	10	19	0,52
Блок виведення інформації	1	15	15	1

На основі приведених експертних оцінок та критеріїв розрахунку структурної складності (2.1) та інформативності (2.2) розраховано кількісні оцінки структурної складності та інформативності структурної схеми процесора для контролю роботи технологічного об'єкту:  $k_c = 27n + 264$ ;  $F_C = 100n + 175$ . Відповідно інформаційно-структурна складність даної

структури становить:  $k_e = \frac{100n + 175}{27n + 264}$  одиниць.

Блок збору інформації 2 призначений для видачі по сигналу ідентифікації стану об'єкта контролю від пульта 3 кодів значень вимірюваних параметрів і передачі їх в пристрій підготовки інформації 4.

Недоліком даного методу є звужені функціональні можливості, які обумовлені тим, що контроль параметрів технологічного процесу не здійснюється шляхом визначення вибірових та зважених ковзних математичних сподівань параметрів технологічного процесу, порівняння спектральних характеристик вимірювальних значень параметрів технологічного процесу в області можливих значень норми, визначення матриці ймовірностей переходу технологічного процесу з одного стану в інший, визначення оцінки

кореляційної ентропії технологічного процесу, формування еталонного зображення образно-кластерної моделі стану технологічного процесу "норма", порівняння параметрів еталонного стану з вимірними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу "норма", "прогноз аварії", "аварія" та ідентифікації стану технологічного процесу відображення на моніторі оператора у вигляді образно-кластерної моделі, що знижує інформативність ідентифікації стану технологічного процесу

В основу удосконалення відомого методу контролю параметрів технологічного процесу покладено розширення функціональних можливостей та збільшення його інформативності шляхом розрахунку нових моделей:

- вибіркві математичні сподівання, згідно виразів:

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad M_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i,$$

які характеризують відповідність значень уставкам регуляторів технологічного процесу;

- зважені ковзні математичні сподівання параметрів, згідно виразів:

$$M_{vx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1+j}^{n+j} V_{i-j} X_{i+j}, \quad M_{vy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1+j}^{n+j} V_{i-j} Y_{i+j},$$

які дозволяють виконувати екстраполяцію та передбачення зміни станів технологічного процесу в часі, де  $V_{i-j}$  - вагова функція, що визначає інформативність виміряного значення технологічного процесу з нульовим ефектом старіння інформації, що дозволяє прогнозувати тенденцію та майбутні стани технологічного процесу;

- порівняння спектральних характеристик вимірюваних значень параметрів в області можливих значень норми, згідно виразів:

$$L_4 = \begin{cases} 0, S_1 < S_w < S_2 \\ 1, S_1 \geq S_w \geq S_2 \end{cases},$$

де  $S_w = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \rho_{xx}(j) \cdot w_j \cdot e^{-\alpha j}$ ,  $w$  - кругова частота косинусного перетворення Фур'є,

$\alpha$  - коефіцієнт затухання енергії нормованої автокореляційної функції

$(0 \leq \alpha < 1)$ ,  $\rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{D_x}$  - нормована і центрована автокореляційна функція контролюваного параметру технологічного процесу,  $D_x = \sigma_x^2$  - дисперсія технологічного процесу,  $R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i \cdot \dot{x}_{i+j}$  - центрована автокореляційна функція параметра технологічного процесу,  $\dot{x}_i = x_i - M_x$ ;

- порівняння ймовірностей штатних та нештатних переходів на основі даних на основі двовимірної ймовірнісної матриці:

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} \boxed{P_{11}} & \boxed{P_{12}} & \dots & P_{1j} & \dots & \boxed{P_{1n}} \\ P_{21} & \boxed{P_{22}} & \dots & P_{2j} & \dots & \boxed{P_{2n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & \boxed{P_{i2}} & \dots & \boxed{P_{ij}} & \dots & \boxed{P_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \boxed{P_{m1}} & P_{m2} & \dots & \boxed{P_{mj}} & \dots & P_{mn} \end{pmatrix},$$

де  $\boxed{P_{ij}}$  – ймовірнісний стан норми,  $\boxed{P_{ij}}$  – ймовірнісний стан прогнозу різних видів передаварійних станів,  $P_{ij}$  – ймовірнісний стан аварії,  $i \in \overline{1, m}$ ,  $j \in \overline{1, n}$ ;

- оцінка кореляційної ентропії технологічного процесу, яка відображає деградацію кореляційних характеристик технологічного процесу і передбачає розвиток передаварійних станів технологічного процесу, згідно виразу:

$$I_x = n \cdot \hat{E} \left[ \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (D_x^2 - R_{xx}^2(j)) \right],$$

де  $m$  - кількість точок автокореляційної функції,  $\hat{E}[\bullet]$  - цілочисельна функція з округленням до більшого цілого [50, 98];

- формування еталонного зображення образно-кластерної моделі стану технологічного процесу "норма", шляхом порівняння параметрів еталонного стану з вимірними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу "норма", "прогноз аварії" та "аварія" та ідентифікації стану технологічного процесу відображенням на моніторі оператора структуризованої образно-кластерної фейс-моделі.

Критерії аналітичних виразів приведених параметрів визначення стану технологічного процесу характеризуються експертними оцінками структурної складності їх компонентів (табл.5.8) [97, 98, 162, 265-267].

Таблиця 5.8 - Компоненти оцінки структурної складності аналітики параметрів визначення стану технологічного процесу.

Назва параметра	Кількість елементів параметра					Структурн. складність параметра, $k_c$
	Літера	Цифра	Індекс	Символ	Знак	
Вибіркове математичне сподівання $M_x$	3	1	5	1	3	58
Ковзне математичне сподівання $M_{vx}$	4	1	11	1	7	98
Порівняння спектральних характеристик $L_4$	7	2	7	2	7	114
Матриця ймовірностей $P_{ij}$	17		34	20	3	376
Оцінка кореляційної міри ентропії $I_x$	10	3	10	2	12	164

Отже, кількісна оцінка структурної складності аналітичних виразів розрахунку нових моделей (табл.5.8) становить:

$$k_{cX_{HM}} = k_{cM_x, M_y, M_{vx}, M_{vy}} + k_{cL_4} + k_{cP_{ij}} + k_{cI_x} = 810 \text{ одиниць.}$$

Таким чином, в результаті введення операцій визначення вибірових математичних сподівань, здійснення контролю реальних відхилень середньостатистичних станів технологічного процесу від заданих уставок регуляторів параметрів; визначення оцінок зважених ковзних математичних сподівань; контролю відхилення технологічного процесу по спектру в області можливих значень норми та оцінки кореляційної ентропії технологічного процесу досягнуто розширення функціональних можливостей контролю параметрів технологічного процесу; формування еталонного зображення образно-кластерної моделі стану технологічного процесу "норма", порівняння параметрів еталонного стану з виміряними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу "норма", "прогноз аварії", "аварія" та ідентифікація стану технологічного процесу відображенням на

моніторі оператора образно-кластерної моделі, яке полягає в тому, що дозволяє передбачати та прогнозувати розвиток передаварійних станів технологічного процесу. Побудова та відображення образно-кластерної моделі дозволяє підвищити інформативність контролю параметрів технологічного процесу.

Таким чином, згідно визначення нових параметрів технологічного процесу, удосконалений контроль параметрів технологічного процесу з можливістю передбачення розвитку передаварійних та аварійних станів технологічного процесу, запропонований спосіб здійснюється згідно наступної послідовності операцій:

$$X_{ТП} = F(\{x_i\}, \{y_i\}, S, M_j, M_{xj}, M_{yj}, \sigma_x, \sigma_y, C_{xx}(j), R_{xy}(0), \rho_{xy}, L_1, L_2, L_3, M_x, M_y, M_{vx}, M_{vy}, L_4, P_{ij}, I_x), \quad (5.2)$$

де  $M_x, M_y, M_{vx}, M_{vy}, L_4, P_{ij}, I_x$  - визначаються нові параметри технологічного процесу, які дозволяють збільшити функціональні можливості й інформативність способу контролю параметрів технологічного процесу, а також формувати еталонне зображення образно-кластерної моделі стану технологічного процесу "норма", порівнювати параметри еталонного стану з вимірними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу "норма", "прогноз аварії" та "аварія", ідентифікувати стани технологічного процесу відображенням на моніторі оператора образно-кластерної моделі. Внаслідок виконання вказаних операцій, запропонований спосіб дозволяє підвищити швидкість реакції оператора на відхилення технологічного процесу від норми та попередити виникнення його аварійних станів.

Таким чином, кількісна оцінка структурної складності аналітики параметрів визначення стану технологічного процесу (5.2) з можливістю передбачення розвитку передаварійних та аварійних станів, становить

$$k_{cX_{ТП2}} = k_{cX_{ТП1}} + k_{cX_{НМ}} = 1508 \text{ одиниць.}$$

5.3. Методологія суб'єктивного моніторингу промислових об'єктів керування.

Успіхи сучасної мікропроцесорної техніки, теорії формування, передавання та опрацювання СД забезпечили створення та успішне впровадження інтерактивних комп'ютеризованих систем реального часу, що здійснюють моніторинг, діагностування та керування складними багатопараметричними процесами та промисловими об'єктами. При побудові таких систем використовується потужна теоретична база опрацювання вимірювальних даних на основі САПР та формування структуризованих інформаційних потоків у вигляді ансамблю фреймів інтерактивних систем на рівні: об'єкта управління, оператора, комп'ютерної мережі, середовища реєстрації моніторингових даних та системи автоматизованого управління.

Важливою проблемою вдосконалення та підвищення ефективності використання моніторингових даних є відповідний розвиток теорії та методів інтегрованого образного відображення на рівні оператора штатних, нештатних, передаварійних та аварійних станів ОУ. Особливо це стосується вибухо- та екологічно небезпечних ОУ. До таких об'єктів належать мобільні транспортні та літальні апарати, АЕС, установки видобутку, підготовки, транспортування, переробки та зберігання продуктів нафтогазової промисловості, шахти, хімічні, металургійні та інші підприємства.

При зростанні складності технології виробництва керованими мікропроцесорними засобами, відповідно зростають об'єми, структурна складність моніторингових інформаційних потоків та небезпека виникнення нештатних або аварійних станів контрольованих ОУ. Одночасно зростає роль та відповідальність операторів комп'ютеризованої системи до забезпечення швидкої суб'єктивної реакції на відхилення ОУ від норми та прийняття еквівалентно швидких правильних рішень по їх ліквідації. Тому розробка теорії та формування СД для образно-кластерного моніторингу станів складних стаціонарних багатопараметричних об'єктів є актуальною проблемою.



Фундаментальні математичні основи ролі людини – оператора ("суб'єкта") у моніторингу станів та керування ОУ викладені у роботі В.Касьянова [257], де під поняттям "суб'єктивний аналіз" розуміється, що ядром активної системи моніторингу та прийняття рішень по управлінню є людина – суб'єкт. Тобто, згідно В.Касьянова – "суб'єктивний аналіз" - це діагностування та керування функціями інтерактивної системи у тому змісті, що всі рішення приймаються суб'єктом або групою суб'єктів цієї системи.

Операторська діяльність - специфічний вид трудової діяльності, що виник в результаті технічного прогресу. З психологічної точки зору дана діяльність виступає складним, багатовимірним, багаторівневим та динамічним явищем.

Людина-оператор виступає важливим компонентом системи "людина-машина", який не тільки визначає мету діяльності, а й організовує всю систему для досягнення наперед визначеного результату [98]. Технічні засоби, що використовує оператор, сприяють виконанню його дій і в той же час несуть інформацію про їх результати.

Основними психологічними складовими операторської діяльності виступають: образ-мета, оперативний образ, прогнозування розвитку ситуації, прийняття рішень, програма дій, зворотний зв'язок.

Також серед особливостей операторської діяльності можна виділити наступні:

- керування великою кількістю об'єктів та параметрів, що зумовлює значне навантаження на нервово-психічні функції індивіда;
- сприймання, переробка інформації та прийняття рішення;
- необхідність декодування інформації, отриманої в закодованому вигляді від приладів та співвіднесення її з реальним станом технологічного процесу або об'єкту;
- висока точність дій та швидкість прийняття рішення, здійснення управлінських функцій;
- висока відповідальність за дії та прийняті рішення;
- висока готовність до екстрених дій;
- обмежена рухова активність, незначні м'язові навантаження;

- сенсорні, емоційні та інтелектуальні перенавантаження.

Ефективність роботи оператора та всієї системи, залежить від раціонального розподілу функцій між людиною та машиною виходячи з відомостей про переваги та обмеження кожної зі сторін.

Діяльність оператора в різних системах має ряд загальних властивостей, проте для кожного окремого випадку притаманні свої особливості. Специфіка діяльності оператора пов'язана зі спрямованістю системи "людина-машина", характером її використання, ступенем участі і кількістю операторів, умовами експлуатації [343, 345].

5.4. Метод побудови образно-кластерної моделі ОУ та розпізнавання станів об'єктів на основі оцінки Хеммінгової віддалі.

В якості образно-кластерного відображення динаміки станів "норми", "прогноз аварії" та "аварії" технологічного процесу на моніторі оператора формується структуризована образно-кластерна модель динамічних слайдів стилізовано наближених до ознак обличчя (фейс-моделі) людини з циклічним оновленням слайдів в реальному часі з дискретністю в межах 0,8-2,4с., що відповідає вимогам ергономіки сприймання інформації суб'єктом – оператором.

Принцип побудови структуризованої образно-кластерної моделі полягає в тому, що в особливих точках монітору, наближених до структуризованого зображення обличчя людини, формуються статичні або динамічні дворівневі чи кольорові символи, що відображають динаміку виміряних та розрахованих параметрів технологічного процесу. При цьому зображення образно-кластерної моделі (рис.5.4 (а,б,в)) відповідно відображають стани технологічного процесу – "норма", "прогноз аварії" та "аварія". Відображення на моніторі оператора образно-кластерної моделі технологічного процесу у стані "норма" є еталонним, яке задається постійним запам'ятовуючим пристроєм, порівнюється з виміряними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу і динамічно відображається на моніторі оператора. При зміні виміряних та розрахованих параметрів технологічного процесу у

відповідних позиціях образно-кластерної фейс-моделі відбувається реструктуризація образно-кластерного відображення станів технологічного процесу, відповідно "норма", "прогноз аварії" та "аварія".

Приклад реалізації образно-кластерної моделі для різних станів технологічного процесу у порівнянні з еталонним на основі оцінки Хеммінгової віддалі [161, 205], показано в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 - Приклад реалізації образно-кластерної моделі для різних станів технологічного процесу

Стан технологічного процесу	Параметри технологічного процесу									
	$\{x_i\}$	$\{y_i\}$	$S$	$M_j$	$M_{xj}$	$M_{yj}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$C_{xx}(j)$	$R_{xy}(0)$
Еталон	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Норма	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Прогноз аварії	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+
Аварія	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-

Продовження табл.5.9

Стан технологічного процесу	Параметри технологічного процесу										
	$\rho_{xy}$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$M_x$	$M_y$	$M_{vx}$	$M_{vy}$	$L_4$	$P_{ij}$	$I_x$
Еталон	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Норма	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Прогноз аварії	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
Аварія	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Відображення динаміки зміни структуризованого зображення образно-кластерної моделі на екрані монітора оператора відбувається згідно відповідного програмного забезпечення шляхом порівняння вимірних, спостережуваних та розрахованих параметрів технологічного процесу з еталонними.

Пропонований спосіб передбачає наступні види контролю, виконувани в приведеному нижче порядку:

- контроль перебування отриманого значення ковзного математичного сподівання  $M_j$  контрольованих параметрів в області можливих значень норми  $L_1$ ;

- контроль середньостатистичної динаміки  $C_{xx}(j)$  станів технологічного процесу по кожному параметру в області можливих значень норми  $L_2$ ;
- контроль нормованих коефіцієнтів взаємкореляції між кожною парою параметрів  $\rho_{xy}$  в області можливих значень норми  $L_3$ ;
- контроль вибірових математичних сподівань  $M_x, M_y$ ;
- контроль зважених математичних сподівань  $M_{yx}, M_{yy}$ ;
- контроль відхилень параметрів технологічного процесу по спектру  $L_4$  в області можливих значень норми;
- контроль кластерної моделі матриці ймовірностей переходу технологічного процесу з одного стану в інший ( $P_{ij}$ );
- контроль відхилень параметрів технологічного процесу згідно кореляційної міри ентропії  $I_x$ .

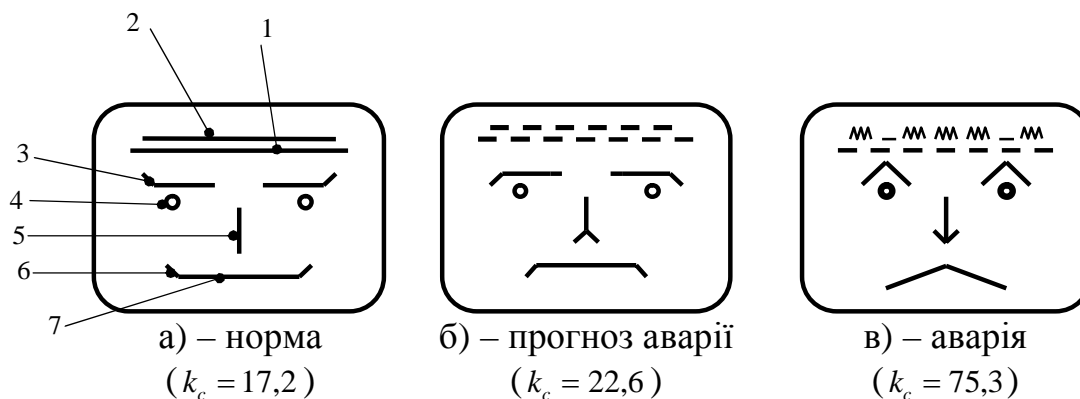


Рис.5.4 - Приклад структурного відображення образно-кластерної моделі станів технологічного процесу.

На рис.5.4 відображено:

1. Відхилення параметрів: ковзного математичного сподівання  $L_1$ , середньостатистичної динаміки станів технологічного процесу по кожному параметру  $L_2$ , по спектру  $L_4$ .
2. Ідентифікація параметрів технологічного процесу згідно кореляційної міри ентропії  $I_x$ .

3. Нормовані коефіцієнти взаємкореляції між кожною парою параметрів  $\|\rho_{ij}\|$  в області можливих значень норми  $L_3$ .
4. Кластерну модель матриці ймовірностей переходу технологічного процесу з одного стану в інший ( $P_{ij}$ ).
5. Значення ковзних математичних сподівань  $M_j$  в межах заданих уставок регуляторів технологічних параметрів.
6. Значення вагових математичних сподівань  $M_{vx}, M_{vy}$ .
7. Значення вибірових математичних сподівань  $M_x, M_y$  у порівнянні з заданими уставками регуляторів технологічних параметрів.

Структурні відображення образно-кластерної моделі характеризуються експертними оцінками структурної складності їх компонентів (табл.5.10) [97, 98, 162, 265-267].

Таблиця 5.10 - Компоненти оцінки структурної складності образно-кластерної моделі станів технологічного процесу.

Назва параметра	Кількість елементів параметра					Структурн. складність відображення стану, $k_c$
	Лінія	Пунктир	Поворот	Коло	Дотик	
Стан "норма"	6		4	2		17,2
Стан "прогноз аварії"	5	2	5	2	1	22,6
Стан "аварія"	5	1	29	2	1	75,3

При зміні коефіцієнтів структуризованих даних у відповідних позиціях ОКМ відбувається реструктуризація образно-кластерного відображення. Приклад відхилення станів від математичних сподівань заданих уставок показано на рис.5.5 [164].

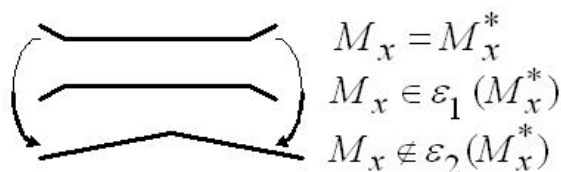


Рис.5.5 - Принцип формування атрибутів ОКМ.  $M_x^*$ - уставка норми стану ОУ.

Розрахунок структурної складності представлення ОКМ у порівнянні з аналітичним та алгоритмічним представленням компонентів функціоналу подано у вигляді діаграми (рис.5.6).

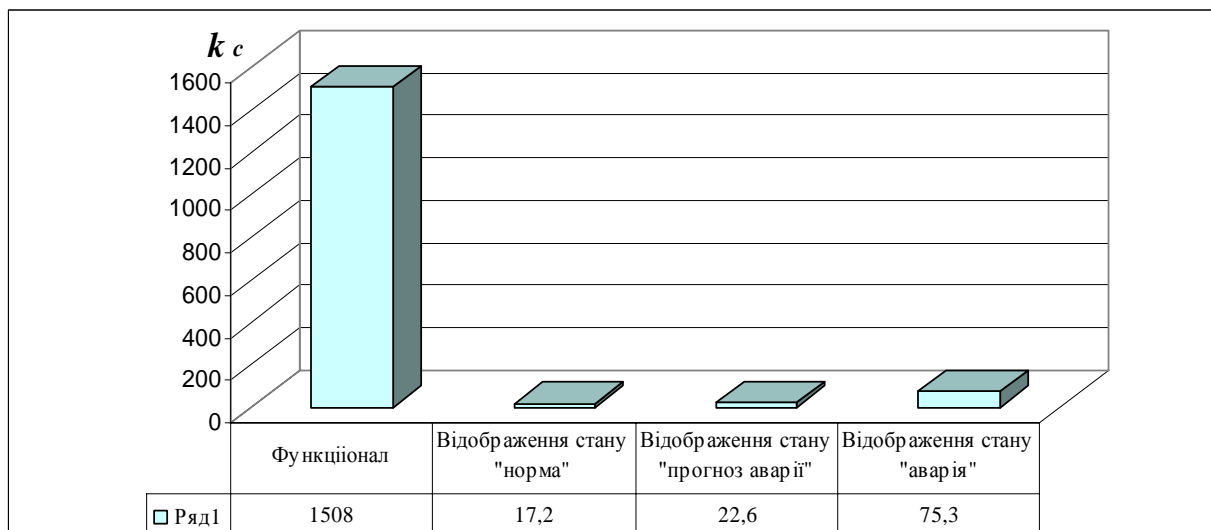


Рис.5.6 - Діаграма розрахунку структурної складності аналітичного представлення функціоналу у порівнянні з відображенням ОКМ.

Аналіз діаграми структурної складності способів характеристично-функціонального, алгоритмічного та моніторингового представлення образно-кластерної моделі показує, що в останньому випадку об'єм інформаційних даних зменшується не менше, ніж на 2 порядки, що сприяє підвищенню інформативності відображення станів технологічних об'єктів, підвищує швидкість реакції операторів при виникненні нештатних операцій на контрольованих об'єктах.

Дослідження характеристик моніторингу об'єктів нафтогазових та енергетичних підприємств на основі ОКМ відображено в роботах [165, 168, 202].

Викладена методологія суб'єктивного аналізу та теоретичні засади аналізу структуризованих даних, моніторингу основних об'єктів свідчить про важливість функції реакції суб'єкта-оператора на зміну інтегральних ентропійних характеристик ОУ та необхідністю оснащення сучасних комп'ютеризованих систем САПР для побудови образно-кластерних моделей та їх демонстрації на моніторах операторів. Запропонована математична база та

інформаційна технологія побудови такого класу моделей, застосування яких в комп'ютеризованих системах дозволяє на 1-2 порядки зменшити об'єми цифрових даних, які реєструються та архівуються у базах даних моніторингових систем, підвищити швидкодію реакції операторів на процеси відхилення від норми станів складних багатопараметричних квазістаціонарних об'єктів, а також прийняття еквівалентно швидких правильних рішень по їх ліквідації.

### 5.5. Архітектура та функції інформативних моніторингових систем у нафтогазовій промисловості

Практично всі технологічні об'єкти нафтогазового комплексу (НГК) мають найбільш виражені квазістаціонарні статистично змінні у часі, аварійно-вибухо-екологонебезпечні характеристики. Тому у структурі інформаційних систем моніторингу такого класу об'єктів високу відповідальність несуть оператори комп'ютеризованих комплексів контролю та управління. Крім цього, навіть при умові високої надійності промислового обладнання, засобів автоматики та компонентів інформаційно-моніторингової системи, також повинні враховуватися питання інформаційної безпеки та захисту інформаційних ресурсів від зовнішніх випадкових та ціленаправлених негативних впливів.

Класифікація об'єктів НГК наведена на рис.5.7.



Рис.5.7 - Промислові об'єкти НГК.

Оскільки процеси буріння є достатньо тривалими у часі, енергоємні та економічно затратні, функції оператора у підсистемі контролю та управління будівництвом свердловин потребують глибокої систематизації та оптимізації.

Розробка та серійний випуск систем комплексного управління бурінням (СКУБ-М) та програмно-апаратних засобів активного терміналу оперативної системи буріння (АТОС-Б) виконувалися Івано-Франківським заводом "Промприлад". Структура названих систем, у розробці яких безпосередню участь приймали співробітники ІФНТУНГ під керівництвом професорів Семенцова Г.Н. та Николайчука Я.М. зображено на рис.5.8 та рис.5.9 [168].

Особливістю автоматизованої системи управління бурінням є трьохрівнева інтерактивна архітектура, на кожному рівні якої функції моніторингу та управління в реальному часі паралельно виконують 3 ієрархічно підпорядковані оператори: бурильник (оператор 1); буровий майстер (оператор 2); диспетчер УБР (оператор 3).

Слід зауважити, що незважаючи на багаторічну експлуатацію такої структуризації моніторингу технологічних процесів буріння теоретичні, методологічні, експериментальні, ергономічні та техніко-експлуатаційні дослідження взаємодії ОМС практично не проводилися і недостатньо повно відображені у наукових працях. Крім того, відсутній аналіз взаємодії ОМС, виходячи з фундаментальних положень теорії джерел інформації та теорії суб'єктивного ентропійного аналізу операторів складних відкритих систем [50, 164, 168].

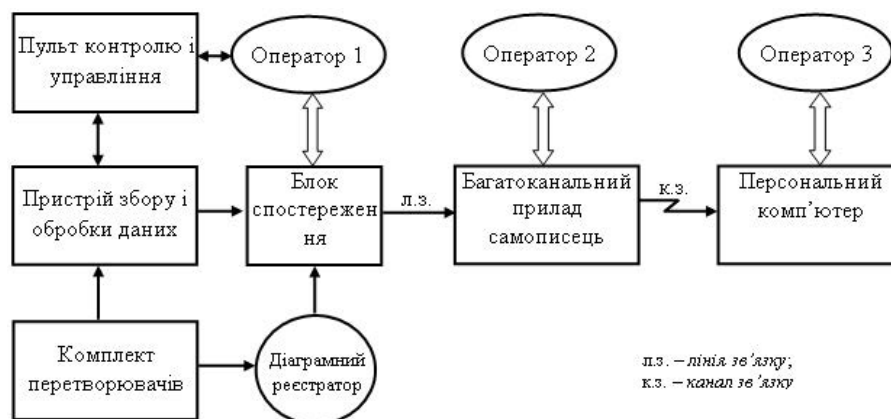


Рис.5.8 - Структура аналогової розподіленої інтерактивної системи контролю і управління бурінням СКУБ-М.



Структуру цифрової системи контролю та моніторингу процесів роторного буріння АТОС-Б зображено на рис.5.9 [168].

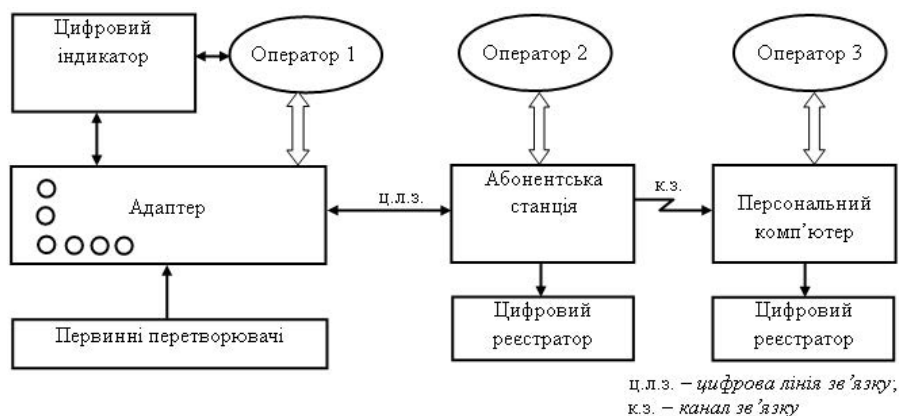


Рис.5.9 - Архітектура цифрової інтерактивної розподіленої системи моніторингу процесів буріння.

Оцінки структурної та інформаційно-структурної складностей, наведених на рис.5.8, 5.9 архітектур комп'ютеризованих систем контролю та управління технологічним процесами буріння, розраховані згідно аналітики коефіцієнтів структурної складності (2.1) і інформаційно-структурної складності (2.2) та експертних оцінок, приведені в табл.5.11, 5.12.

Таблиця 5.11– Оцінки інформаційної та структурної складності аналогової системи контролю і управління бурінням

Назва компонента структури	Кількість об'єктів	Інформаційна складність	Структурна складність	Інформаційно-структурна складність
Пульт контролю і управління	1	15	201	0,07
Оператор	3	50	69,2	0,72
Пристрій збору і обробки даних	1	35	217	0,16
Блок спостереження	1	16	145	0,11
Багатоканальний самописець	1	16	257	0,06
Персональний комп'ютер	2	40	175	0,23
Комплект перетворювачів	12	20	185	0,11
Діаграмний реєстратор	1	12	161,2	0,07
Сумарна оцінка		564	3758,8	4,41

Таблиця 5.12– Оцінки інформаційної та структурної складності цифрової системи контролю і управління бурінням

Назва компонента структури	Кількість об'єктів	Інформаційна складність	Структурна складність	Інформаційно-структурна складність
Цифровий індикатор	1	36	145	0,25
Оператор	3	50	69,2	0,72
Адаптер	1	62	72,5	0,86
Абонентська станція	1	42	153	0,27
Персональний комп'ютер	2	40	175	0,23
Первинний перетворювач	12	10	177	0,06
Цифровий реєстратор	2	14	153	0,09
Сумарна оцінка		518	3358,1	4,9

Інформаційно-структурна складність аналогової системи моніторингу процесів буріння становить 4,41 одиниць, а цифрової відповідно – 4,9.

У системі моніторингу технологічних процесів буріння визначені наступні функції операторів:

- 1 оператор – бурильник: вибір з допомогою адаптера одного з шести технологічних станів бурової установки:

- 1 - буріння, 4 – випробування,
- 2 – промивання, 5 – компоновка,
- 3 – спуско-підйомні операції, 6 – очікування;

- 2 оператор – буровий майстер, виконує наступні функції:

- інтерактивна взаємодія з оператором 1;
- моніторинг і аналіз стану та режимних параметрів процесу буріння, представлених у цифровій формі;
- формалізований ввід даних добового майстра (СРБМ) у реальному часі або у пакетному режимі вкінці доби.

Абонентський пункт бурового майстра, оснащений спецпроцесором, виконує наступні інформаційні операції:

- зменшення надлишковості вхідної вимірювальної та алфавітно-цифрової інформації;

- структуризоване кодування вхідних вимірювальних та техніко-економічних даних у кодї системи залишкових класів з захистом від помилок та несанкціонованого доступу;
- квазітрійкова частотна маніпуляція вихідного коду з внутрішньою бітовою та блоковою синхронізацією;
- реєстрація інформаційних даних на цифровому носії.

Функції 3 оператора в УБР співпадають з функціями оператора системи СКУБ-М, а також розширені можливістю контролю та моніторингу станів БУ та трендів технологічних параметрів в реальному часі на моніторі персонального комп'ютера.

Таким чином аналіз архітектури, функцій тиражованих комп'ютеризованих систем моніторингу та особливостей реалізації взаємодії ОМС у системах управління процесом буріння дозволяє зробити наступні висновки.

1. В існуючих системах даного класу контроль та моніторинг відхилень станів та технологічних процесів об'єктів управління виконується виключно шляхом контролю та реєстрації відхилень по амплітуді.

2. Функції та інформаційна взаємодія ОМС в інструкціях по експлуатації та описах систем практично відсутні.

3. Недостатньо досліджені теоретично та експериментально моделі та способи відображення структуризованих даних інтерактивного моніторингу операторами систем.

4. Практично не використовується для інтегрованого відображення на моніторах операторів результати статистичного, кореляційного, спектрального, кластерного, ентропійного та логіко-статистичного опрацювання квазістаціонарних переходів об'єктів управління у різні інформаційні, технологічні, семантичні та евристичні стани.

5. Не проаналізовано перспективу підвищення ефективності роботи операторів в умовах виникнення нештатних, передаварійних, аварійних та еколого-небезпечних ситуацій на промислових установках нафтогазової галузі.

6. Потребують глибоко теоретичного та експериментального дослідження методи структуризації моніторингових даних на основі образно-кластерних моделей та ергономіки інформаційної взаємодії ОМС.

#### 5.6. Організація моніторингової системи електричної підстанції.

Електричні станції та підстанції (ПС) можуть поставлятися на ділянку монтажу в готовому, повністю зібраному вигляді або ж окремими блоками і вузлами, при цьому обладнання буде носити назву комплектне. Основні елементи і вузли:

- камера для установки в ній апаратури, включаючи і трансформатор, а також шинопровід. Зустрічається два виконання: повністю закрите без сітчастих вставок і частково закрите з огорожею у вигляді сітки;

- збірні шини. Вони в сукупності становлять цілу систему. Електричні станції та підстанції (ПС) можуть містити також окремі секції, які являють собою ті ж збірні шини, відокремлені комутаційним вузлом;

- струмопровідна система, що включає в себе шини або кабелі, які з'єднуються з ізоляторами;

- трансформатор в кількості від одного до декількох одиниць;

- розподільний пристрій (РП) забезпечує прийом і подальший розподіл енергії. РП складається з декількох вузлів: комутаційна апаратура, збірні шини, елементи керування та захисту.

Стани силових вимикачів ( $C$ ) у конкретних структурах ПС повинні відображатися на дисплеї оператора у вигляді відповідно просторово розміщених компонентів ОКМ.

Крім діагностування та відображення станів силових вимикачів у розподільчих вузлах пересилання електроенергії контролюються наступні параметри: напруга ( $U$ ), струм ( $I$ ), споживана потужність ( $P$ ), частота ( $F$ ), спектр ( $S$ ).

В якості інформаційних даних ОКМ прийнято вважати стан засобів релейного захисту ( $RZ$ ), а також обладнання, що контролює технологічні

параметри силових трансформаторів ( $TR$ ) (температура, рівень масла та ін.), стани засобів розпізнавання накидів, коротких замикань та запуску ПЕД ( $PR$ ).

Таким чином, в залежності від структурної конфігурації ПС та відповідної номенклатури обладнання системи комутації, релейного захисту та контролю технологічних даних обладнання ПС базовою основою інформаційних даних для побудови ОКМ складають наступні масиви:

$C_i$  – стани силових вимикачів,  $i \in 1, k$ ;

$V_i = (U_i, I_i, P_i, F_i, S_i)$  - вимірювальні параметри напруги, струму, потужності у вузлових точках ПС, промислової частоти та спектру гармонік,  $i \in 1, n$ ;

$RZ_i$  – інформаційні дані про стани засобів релейного захисту,  $i \in 1, m$ ;

$TR_i = (t, h, \dots)$  – інформаційні параметри силових трансформаторів,  $i \in 1, r$ ;

$PR_i = (N, C, Z)$  - ідентифікаційні параметри відповідно накиду, КЗ та запуску ПЕД.

У результаті наведеної систематизації інформаційних даних, які ідентифікуються на ПС в реальному часі і підлягають побудові та відображенню ОКМ на дисплеї оператора у вигляді характеристичного функціоналу:

$$X_{i\bar{N}} = F(\{C_i\}, \{V_i = (U_i, I_i, P_i, F_i, S_i)\}, \{RZ_i\}, \{TR_i = (t, h, \dots)\}, \{PR_i = (N, C, Z)\}).$$

Реалізація образно-кластерної моделі для різних станів ПС у порівнянні з еталонним, показано в таблиці 5.13.

Таблиця 5.13 - Стани технологічного процесу ПС у порівнянні з еталонним ( $k_c = 1088$ ).

Стан технологічного процесу	Параметри технологічного процесу									
	$\{C_i\}$	$\{V_i\}$	$U_i$	$I_i$	$P_i$	$F_i$	$S_i$	$M_x$	$D_x$	$L_x$
Еталон	•	•	•	•	•	•	•			
Норма	+	+	+	+	+	+	+			
Прогноз аварії	+	-	+	+	-	-	+			
Аварія	+	-	+	-	-	-	-			

Стан технологічного процесу	Параметри технологічного процесу										
	$RZ_i$	$TR_i$	$t$	$h$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$PR_i$	$N$	$C$	$Z$
Еталон	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Норма	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Прогноз аварії	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Аварія	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таким чином в основу теорії інтерактивних комп'ютеризованих систем покладені оцінки суб'єктивної ентропії, ентропійні принципи оптимальності предметних і рейтингових переваг [257].

Приклади успішного застосування інтегральної оцінки ентропії та моніторингу станів ОУ згідно структури (рис.5.10), викладеної у роботах [50, 344].

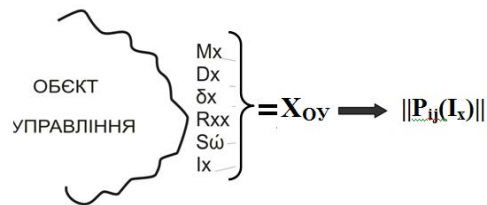


Рис.5.10 - Ідентифікація станів ОУ:  $M_x, D_x, \delta_x, R_{xx}, S_{\omega}, I_x$  – атрибути фрейму оператора  $X_{OU}$ .

Розробка програми та верифікація алгоритмів побудови ОКМ ПС для відображення технологічних станів ПС на тестових та експериментальних сигналах приведена в додатку К.

5.7. Спосіб контролю параметрів технологічного процесу на основі образно-кластерної моделі.

Метод контролю параметрів технологічного процесу на основі образно-кластерної моделі реалізується згідно запропонованого способу (Патент 107039) [167]. На рис.5.11 зображено структуру системи, що реалізує запропонований спосіб, яка містить: датчики вимірів параметрів 1, 1-2, ... 1-n, блок збору інформації 2, до інформаційного входу якого підключені датчики 1-1, 1-2, ... 1-n, пульт оператора 3, пристрій підготовки інформації 4, першу шину

5, що з'єднує пристрій підготовки інформації 4 і пульт оператора 3, другу шину 6, що з'єднує пристрій підготовки інформації 4 і блок збору інформації 2, блок введення інформації 1, третю шину 8, що з'єднує блок виведення інформації 7, і пристрій підготовки інформації 4, шину 9, що з'єднує пульт оператора 3 і блок збору інформації 2; яка містить постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) 10, вхід якого з'єднаний шиною 11 з першим виходом блоку виводу 7, а вихід ПЗП 10 з'єднаний з першим входом блоку порівняння 12, другий вхід якого з'єднаний шиною 13 з другим виходом блоку виводу 7, а вихід з'єднаний шиною 14 з монітором оператора 15, на якому відображається образно-кластерна модель (рис.5.4).

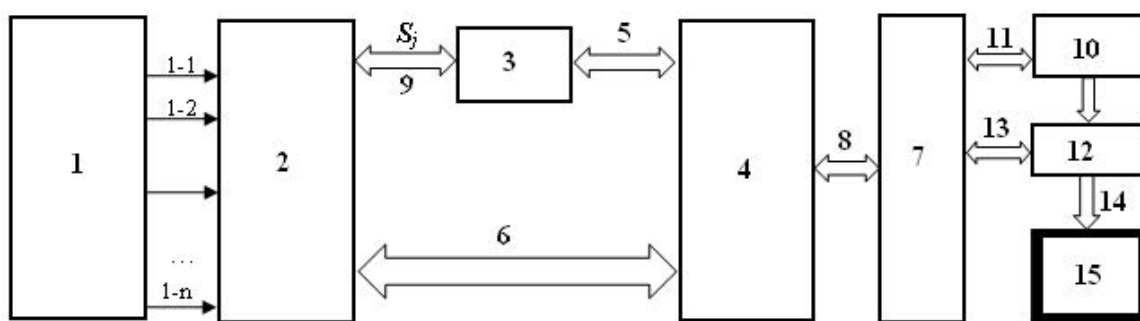


Рис.5.11 – Структура системи контролю, що реалізує запропонований спосіб контролю параметрів технологічного процесу.

Блок збору інформації 2 призначений для видачі по сигналу ідентифікації стану об'єкта контролю від пульта 3 кодів значень вимірних параметрів і передачі їх в пристрій підготовки інформації 4.

Коди вимірних значень, які передаються по шині 6 супроводжуються кодом стану об'єкта  $S$ , які передаються по шині 5 з пульта оператора 3 в блок попередньої підготовки інформації 4.

Пристрій підготовки інформації 4 являє собою програмний контролер, що реалізує паралельне опитування датчиків 1 і перетворення кодів вихідних величин датчиків, отриманих від блоку збору інформації 2 у значення відповідних параметрів. На виході блоку збору інформації 2 за допомогою шини 6 в пристрій підготовки інформації надходить набір кодів ансамблю параметрів, які визначаються кодом стану керування  $S$ , що надходять з пульта

оператора 3 шиною 9 в блок збору інформації 2. В блоці ПЗП 10 зберігаються коди еталонного зображення стану технологічного процесу "норма" образно-кластерної моделі, які порівнюються у блоці порівняння 12 з вимірними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу, а на моніторі оператора 15 динамічно відображаються слайди у відповідності з реальним станом технологічного процесу: "норма", "прогноз аварії", "аварія".

Процес виміру та ідентифікації станів об'єкту контролю включає наступні етапи:

- з пульта оператора 3 подачу сигналу стану технологічного процесу  $S$  по шині 9 подається в блок збору інформації 2, а по шині 5 в пристрій підготовки інформації 4;

- прийом і розшифровку сигналу виклику ансамблів  $n$  з  $m$  параметрів блока збору інформації 2 і видачу кодів з його багатоканального аналого-цифрового перетворювача в пристрій підготовки інформації 4;

- перетворення і запам'ятовування отриманих значень кодів параметрів;

- визначення стану технологічного процесу;

- формування еталонного зображення образно-кластерної моделі стану технологічного процесу "норма";

- порівняння параметрів еталонного стану з вимірними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу;

- виведення значення параметрів технологічного процесу на моніторі оператора у вигляді образно-кластерної моделі.

При чому структуризоване розміщення атрибутів структури образно-кластерної моделі може бути довільно-адаптованим до конкретних умов контрольованого технологічного процесу та об'єкту контролю.

Розрахунок інформаційно-структурної складності такої системи моніторингу станів технологічного процесу виконується згідно таблиці 5.14.

На основі приведених експертних оцінок та критеріїв розрахунку структурної складності (2.1) та інформативності (2.2) розраховано кількісні оцінки структурної складності та інформативності структурної схеми запропонованої системи контролю параметрів технологічного процесу:



$k_c = 27n + 944$ ;  $F_C = 100n + 21195$ . Відповідно інформаційно-структурна

складність даної структури становить:  $k_e = \frac{100n + 21195}{27n + 944}$  одиниць.

Таблиця 5.14 - Експертні оцінки інформативності та структурної складності компонентів системи контролю, що реалізує запропонований спосіб контролю параметрів технологічного процесу

Назва об'єкта	Кількість об'єктів	Інформаційна складність	Структурна складність	Інформаційно-структурна складність
Сенсор	$n$	100	27	3,7
Блок збору інформації	1	135	217,2	0,62
Оператор	1	15	13,2	1,14
Пристрій підготовки інформації	1	10	19	0,52
Блок виведення інформації	1	15	15	1
Постійний запам'ятовуючий пристрій	1	15	119	0,13
Блок порівняння	1	5	546	0,0007
Монітор	1	21000	15	1400

На рис.5.12 приведені графіки розрахунку інформаційно-структурної складності системи контролю (рис.5.11), яка реалізує запропонований спосіб контролю технологічних параметрів, у порівнянні з відомими способами контролю (рис.5.2, 5.3).

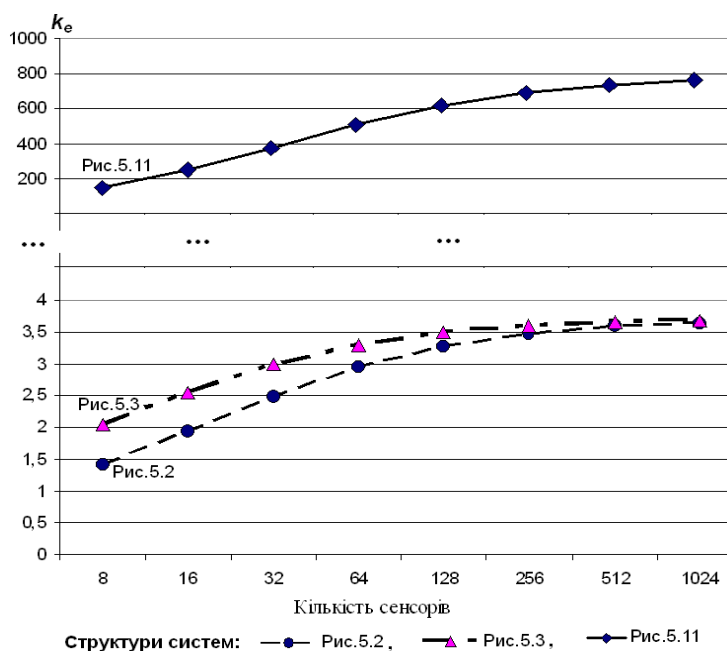


Рис.5.12 - Графіки інформаційно-структурної складності запропонованої та відомих систем контролю технологічних параметрів.

Згідно патенту 134154 [346] розширені інформативні характеристики відображення стану ОУ у вигляді ОКМ шляхом доповнення візуального відображення стану ОУ на моніторі оператора аудіосупроводженням. При цьому інформативність запропонованого методу та способу контролю технологічного процесу зростає за рахунок аудіо уточнення типу нештатної ситуації з конкретизацією моделі, яка реєструє відхилення від норми; технологічного параметру, який вийшов за межі апертури та рекомендації оператору процедури відновлення стану "норма".

Таким чином, розрахунок інформаційно-структурної складності такої системи контролю технологічного процесу визначається згідно виразу:

$$k_e = \frac{100n + 21195 + f_a}{27n + 944 + k_{ca}}$$

Згідно експертної оцінки:  $f_a = 1000$  одиниць,  $k_{ca} = 5$  одиниць.

Порівняльна діаграма інформаційно-структурної складності запропонованої структури системи контролю по відношенню до відповідної системи з аудіосупроводом приведена на рис.5.13.

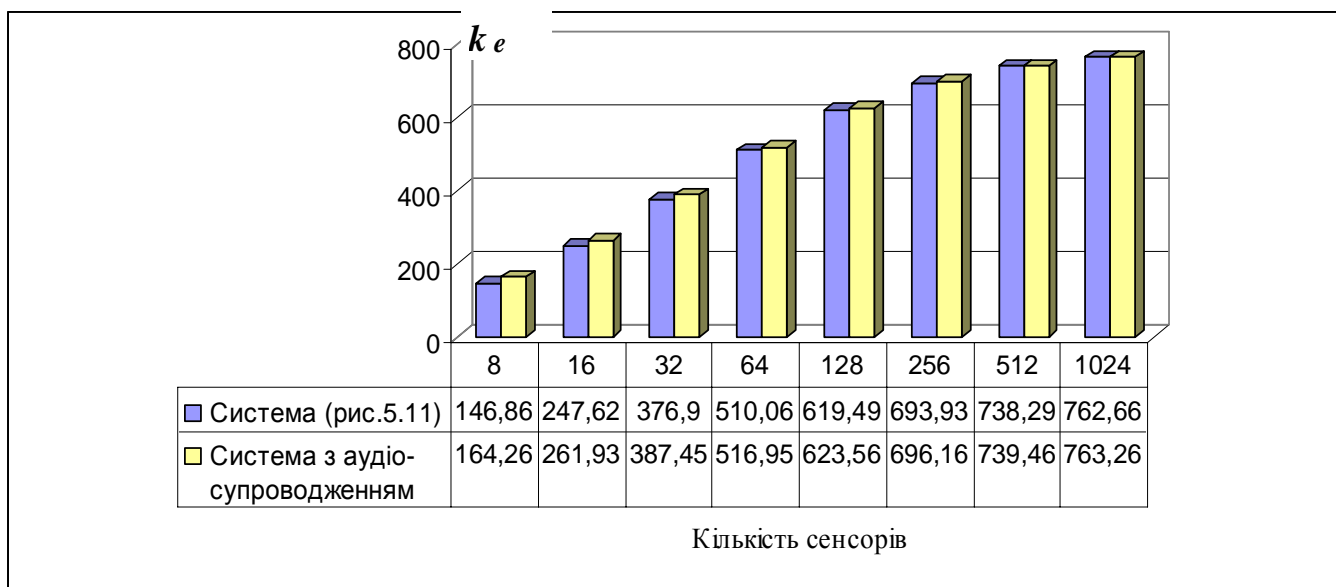


Рис.5.13 – Порівняльна діаграма інформаційно-структурної складності запропонованої системи контролю технологічного процесу та системи з аудіосупроводом.

Результати аналізу показують, що інформативність запропонованої системи з аудіосупроводом по відношенню до системи, яка відображає ОКМ не перевищує 5%.

Результатом запропонованого способу контролю параметрів технологічного процесу є розширення функціональних можливостей способу контролю технологічного процесу та збільшення його інформативності, внаслідок чого збільшується швидкодія реакції оператора на виникнення нештатних ситуацій та можливості попередження виникнення вибухо- та екологічно небезпечних ситуацій на об'єктах.

Викладена методологія суб'єктивного аналізу та теоретичні засади аналізу структуризованих даних, моніторингу основних об'єктів свідчить про важливість функції реакції оператора на зміну інтегральних ентропійних характеристик ОУ та необхідністю оснащення сучасних комп'ютеризованих систем САПР для побудови образно-кластерних моделей та їх демонстрації на моніторах операторів. Запропонована математична база та інформаційна технологія побудови такого класу моделей, застосування яких в комп'ютеризованих системах дозволяє підвищити швидкодію реакції операторів на процеси відхилення від норми станів складних багатопараметричних квазістаціонарних об'єктів, а також прийняття еквівалентно швидких правильних рішень по їх ліквідації.

### Висновки до п'ятого розділу

1. На основі проведеного аналізу структурної та функціональної організації відомих моніторингових систем вперше запропонований метод побудови образно-кластерної моделі контролю квазістаціонарних технологічних процесів на основі розробленого функціоналу станів технологічного процесу шляхом побудови сукупності інформаційних, статистичних, кореляційних, спектральних, логіко-статистичних, кластерних та ентропійних моделей, який, у порівнянні з відомими методами, дозволяє розпаралелити обчислювальні процеси розрахунку параметрів моделей та

відобразити на моніторі оператора стан об'єкту контролю у вигляді структур образно-кластерних моделей, які ідентифікують стани "норми", "розвитку аварії" та "аварії", що дозволяє підвищити реакцію оператора на відхилення технологічного процесу від норми та попередити виникнення аварійних ситуацій.

2. Отримані характеристики структурної складності функціоналу, який описує квазістаціонарні стани технологічного процесу, а також оцінка структурної складності процесу моніторингу та розпізнавання станів технологічного процесу: "норма", "розвиток аварії", "аварія". Побудовані порівняльні діаграми оцінок структурної складності аналітичних виразів розрахунку моделей, алгоритмів реалізації моделей, порівняльних таблиць виявлення та ідентифікації нештатних станів технологічного процесу, структур систем моніторингу і контролю та образно-кластерної моделі. В результаті доведено, що структурна складність розробленої образно-кластерної моделі, у порівнянні з іншими формами представлення станів технологічного процесу, дозволяє суттєво зменшити об'єми реєстрованих інформаційних даних, а також підвищити швидкість реакції оператора при виникненні нештатних ситуацій.

3. Розраховані характеристики інформаційно-структурної складності відомих моніторингових систем та запропонованої системи на основі побудови ОКМ, які дозволили встановити, що ефективність запропонованої системи на 1-2 порядки перевищує відповідні показники існуючих систем, що застосовуються у промисловості, у залежності від кількості контрольованих параметрів. Отриманий ефект досягнуто за рахунок суттєвого зменшення структурної складності відображення стану ОУ у вигляді ОКМ, характеристики якої практично не залежать від кількості контрольованих параметрів, а визначаються кількістю побудованих інформаційних моделей згідно характеристичного функціоналу.

4. Запропонована структура системи контролю, що реалізує метод побудови ОКМ та спосіб контролю параметрів технологічного процесу шляхом визначення вибірових та зважених ковзних математичних сподівань, контролю відхилення технологічного процесу по спектру, визначення

кореляційної ентропії стану технологічного процесу, введення еталонного зображення образно-кластерної моделі, порівняння параметрів еталонного стану з вимірними, що дозволило зменшити структурну складність ідентифікації станів об'єкта управління на 2-3 порядки, зменшити структурну складність образно-кластерної моделі відносно кількості складових алгоритмічних компонентів функціоналу у 22 рази, розширити функціональні можливості, збільшити інформативність та підвищити швидкодію реакції оператора на виникнення нештатних ситуацій.

5. Розраховані та побудовані характеристики структурно-інформаційної складності існуючих та запропонованої системи моніторингу технологічних процесів, які дозволили встановити, що інформаційно-структурна складність не перевищує 4 одиниць, а запропонованої змінюється в діапазоні 146-762 одиниць пропорційно до кількості сенсорів (8-1024). Тобто інформаційно-структурна ефективність запропонованої системи покращена у 36-191 разів за рахунок побудови та відображення на моніторі оператора 21 високоінформативної моделі станів ОУ, розрахованих згідно характеристичного функціоналу.

## РОЗДІЛ 6

### РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СТРУКТУРИЗАЦІЇ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ У КОМПОНЕНТАХ СКЛАДНИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Згідно розробленої концепції, теоретичних основ вирішення задач структуризації даних в інформаційних комп'ютеризованих системах, викладених у роботі [150], та переліку задач вирішено проблему, поставлену в дисертаційній роботі, яка охоплює: розроблення способів структурної оптимізації системних характеристик компонентів різних архітектур багаторозрядних спецпроцесорів, які забезпечують можливість підвищення швидкодії, зменшення апаратної складності та спрощення задач розпізнавання образів у Хеммінговому просторі; розроблення структурних рішень пристроїв синтезованого формування алфавітно-цифрових даних, розпізнавання накидів, запусків ПЕД та коротких замикань у високовольтних ЛЕП, системи перетворення та захищеного від несанкціонованого доступу передавання даних в комп'ютерних мережах, які, у порівнянні з відомими, мають покращені часові, апаратні та поліфункціональні системні характеристики; розроблення структурних рішень компонентів обчислювальних засобів розподілених комп'ютерних систем з вдосконаленими та покращеними характеристиками на основі запропонованих критеріїв складності, у тому числі, запропонованих в роботі оцінок структурної та інформаційно-структурної складності мікроелектронних компонентів складних кіберфізичних систем. Вирішення комплексу, поставлених в роботі, взаємопов'язаних теоретичних та науково-прикладних задач проблеми розробки теоретичних основ, методології, методів аналізу та вдосконалення структурної організації ПФД у РКС, досягнуто шляхом розробки та реалізації запропонованих нових методів структурних перетворень та алгоритмів обчислень у процесах опрацювання ПФД. Розроблені нові та вдосконалені структурні рішення компонентів складних комп'ютерних систем з покращеними системними характеристиками реалізовані у вигляді схемотехнічних рішень у мікроелектронному виконанні та

впроваджені у комп'ютеризованих системах моніторингу технологічних процесів нафтогазової та енергетичної промисловості, що відображено в даному розділі дисертаційної роботи.

6.1. Розробка та дослідження системних характеристик пристроїв структуризації даних на основі АЦП з вихідними кодами у різних теоретико-числових базисах.

6.1.1. Структура високопродуктивного АЦП та характеристики складності його компонентів у базисі Хаара-Крестенсона.

Аналого-цифрові перетворювачі є важливими базовими компонентами мікроконтролерів та спеціалізованих пристроїв вводу та цифрового перетворення аналогових сигналів, які випускаються і тиражуються багатьма фірмами [347-350]. Тому удосконалення кожного компонента їх структури та оптимізація системних характеристик є суттєвим економічним показником їх успішного застосування у сучасних складних та розподілених КС. Важливими характеристиками АЦП у якості компонентів РКС та моніторингових систем контролю технологічних процесів є системні параметри, які відповідають умові мінімальної структурної, часової та апаратної складності. Таку умову функціонально, структурно та схемотенічно забезпечують АЦП паралельного типу [347-352]. Тому актуальною науково-прикладною задачею є удосконалення характеристик їх складності у відповідності до вимог їх мікроелектронної реалізації.

Відомі структури АЦП паралельного типу, для яких в дисертаційній роботі розраховані характеристики структурної, апаратної та часової складностей їх схемотехнічних рішень та компонентів при їх реалізації в ТЧБ Радемахера та Хаара-Крестенсона, приведені в додатку Л.

Автором запропоновано вирішення задачі вдосконалення такого класу АЦП (Патент 116185) [184-189] шляхом зменшення структурної складності та підвищення швидкодії застосуванням парафазних компараторів та заміною

апаратно складних низько швидкодіючих логічних елементів "Виключаюче АБО" (рис.6.1) [353] відповідними логічними елементами "І-НЕ".

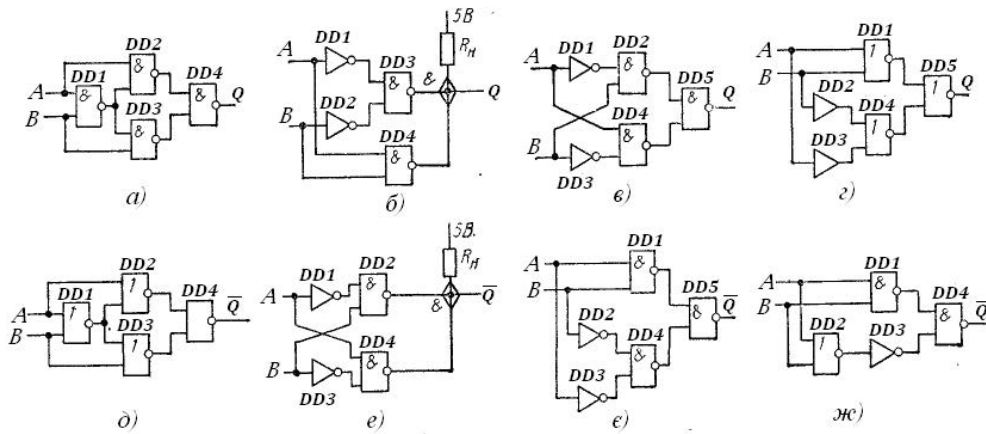


Рис.6.1 - Структури вузла "Виключаюче АБО" без інверсії (а-г) та з інверсією (д-ж).

Класичні мікроелектронні реалізації логічного елемента "Виключаюче АБО" показані на рис.6.1 та 6.2а [353].

При застосуванні парафазних входів структура логічного елемента "Виключаюче АБО" спрощується, що показано на рис.6.2 б,в [11], а також при його реалізації на основі логічного елемента "Виключне І" (рис.6.2 г) [359],.

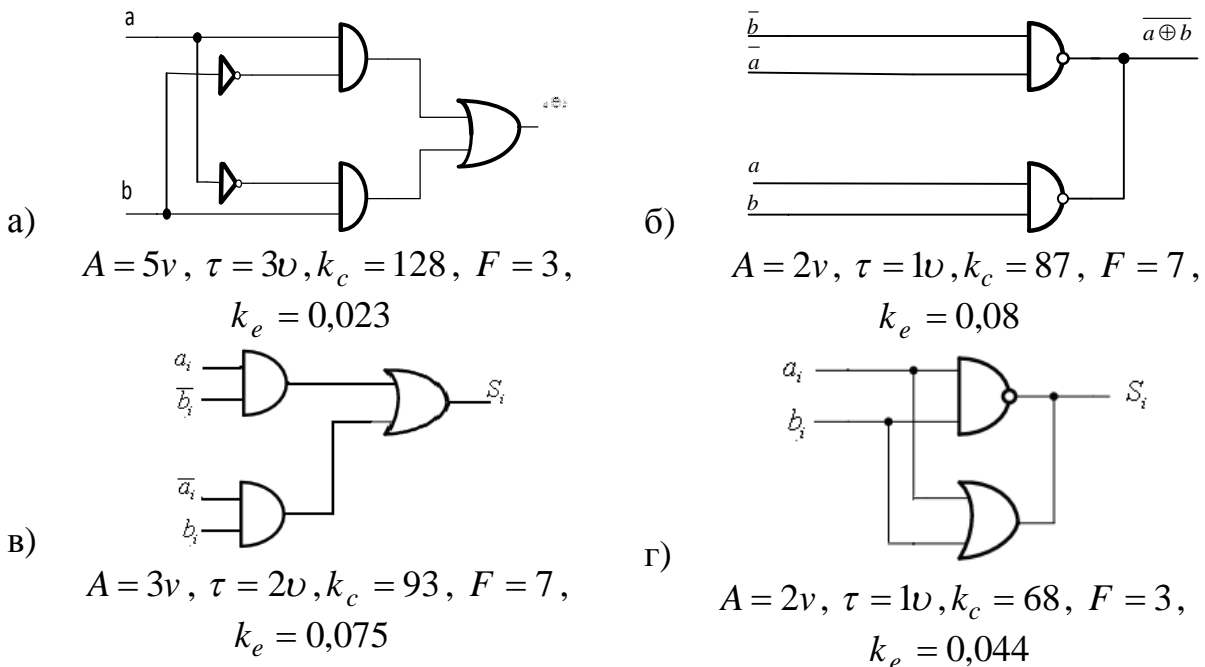


Рис.6.2 - Структури різних схемотехнічних реалізацій логічного елемента "XOR".



Порівняльні характеристики оцінки структурної складності класичних вузлів "Виключаюче АБО" (рис.6.1) та його удосконалених структур (рис.6.2) приведені на діаграмі (рис.6.3).

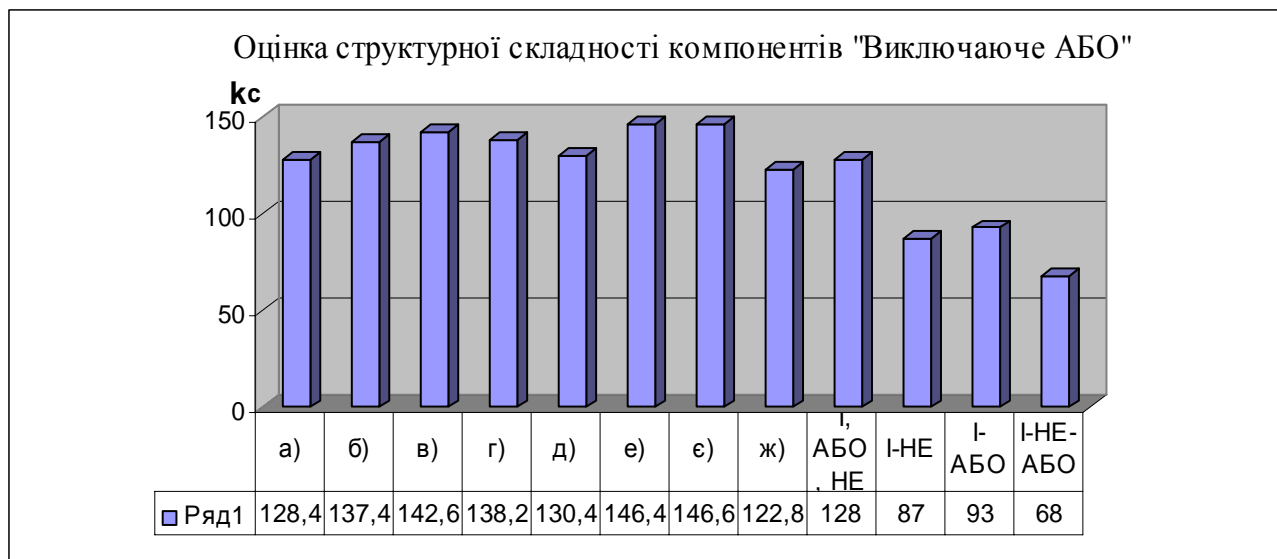


Рис.6.3 - Діаграма оцінки структурної складності різних схемотехнічних реалізацій логічного елемента "Виключаюче АБО".

При розрахунку структурної та функціональної складності таких компонентів обчислювальних засобів враховується різниця між функціональною складністю прямих та інверсних входів та виходів. Тобто прямі виходи функціонально оцінюються як 1, а інверсні – 2 [98].

Якщо кількість елементів у складній структурі перевищує 2-3 порядки, то розрахунок структурної складності доцільно виконувати згідно виразу:

$$k_{cl} = \hat{E}[\log_2 k_c]. \quad (6.1)$$

Логарифмічна оцінка структурної складності досліджуваного компонента "XOR" різних структур, представлених на рис.6.2, буде складати відповідно:

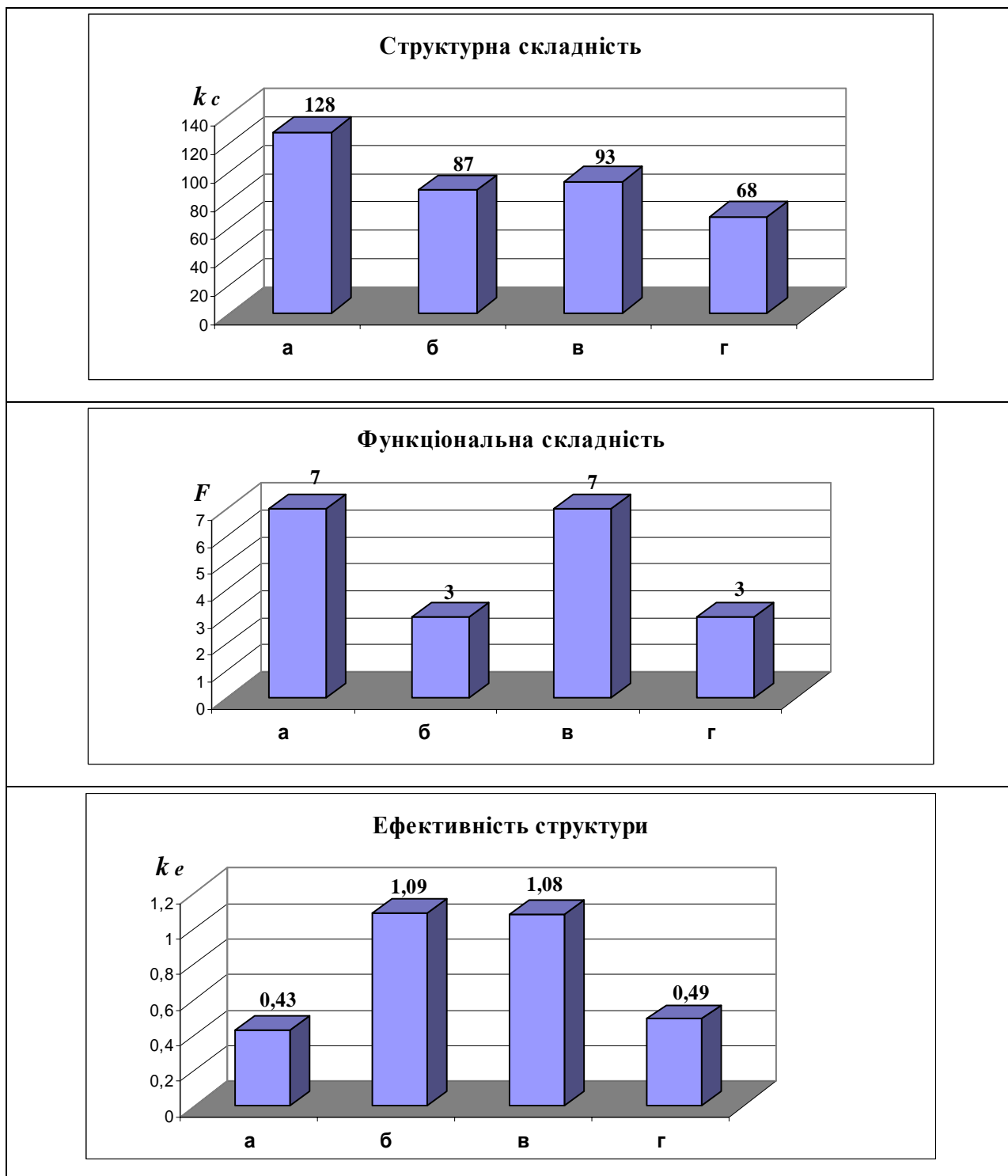
$$k_{cl}a = \log_2 128 = 7; \quad k_{cl}в = \log_2 93 = 6,5$$

$$k_{cl}д = \log_2 87 = 6,4; \quad k_{cl}г = \log_2 68 = 6,1.$$

Таким чином оцінка структурної складності буде визначатися кількістю двійкових одиниць (біт).

У таблиці 6.1 приведені отримані діаграми характеристик структурної, функціональної та інформативної складності різних удосконалених (рис.6.2) схемотехнічних реалізацій логічного елемента "XOR".

Таблиця 6.1 - Діаграми характеристик структурної, функціональної та інформативної складності різних схемотехнічних реалізацій логічного елемента "XOR".



Реалізація компонента АЦП (рис.6.2б) у перетворювачі паралельного унітарного коду у код Хаара є універсальною і відповідає симетричній схемі перетворення, тому є структурно надлишковою.

У роботі [189] (Патент 116185) автором запропонована реалізація компонента - перетворювача паралельного унітарного коду у паралельний інверсний код Хаара, який враховує переключення компараторів в одиничний стан, починаючи з нульової позиції, на базі одного логічного елемента "І-НЕ".

У результаті застосування компараторів з парафазними виходами та реалізації функції логічного елемента "Виключаюче АБО" на логічних елементах "І-НЕ", отримуємо компонент АЦП, який відповідає одному рівню квантування згідно наступної структури (рис.6.4) [190].

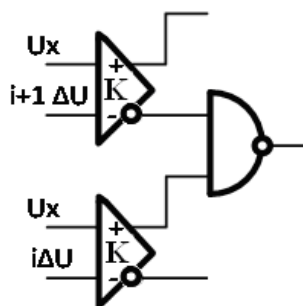


Рис. 6.4 - Структура компонента  $i$ -того рівня квантування АЦП Хаара-Крестенсона на основі міжрівневих парафазних зв'язків.

На основі компонентів з покращеними характеристиками структурної, апаратної та часової складності запропонована удосконалена структура високопродуктивного АЦП з вихідними кодами у базисі Хаара-Крестенсона [189, 190].

Структура удосконаленого АЦП ілюструється рисунком 6.5 (Патент 116176) [184, 189, 190].

Структура АЦП містить: 1 – вхідну шину аналогового потенціалу; 2 – парафазні компаратори; 3 – вхідну шину еталонного потенціалу; 4 – взірцеві резистори; 5 – перші логічні елементи "І-НЕ"; 6 – другі логічні елементи "І-НЕ", 7 – вихідну шину паралельного коду Хаара-Крестенсона.

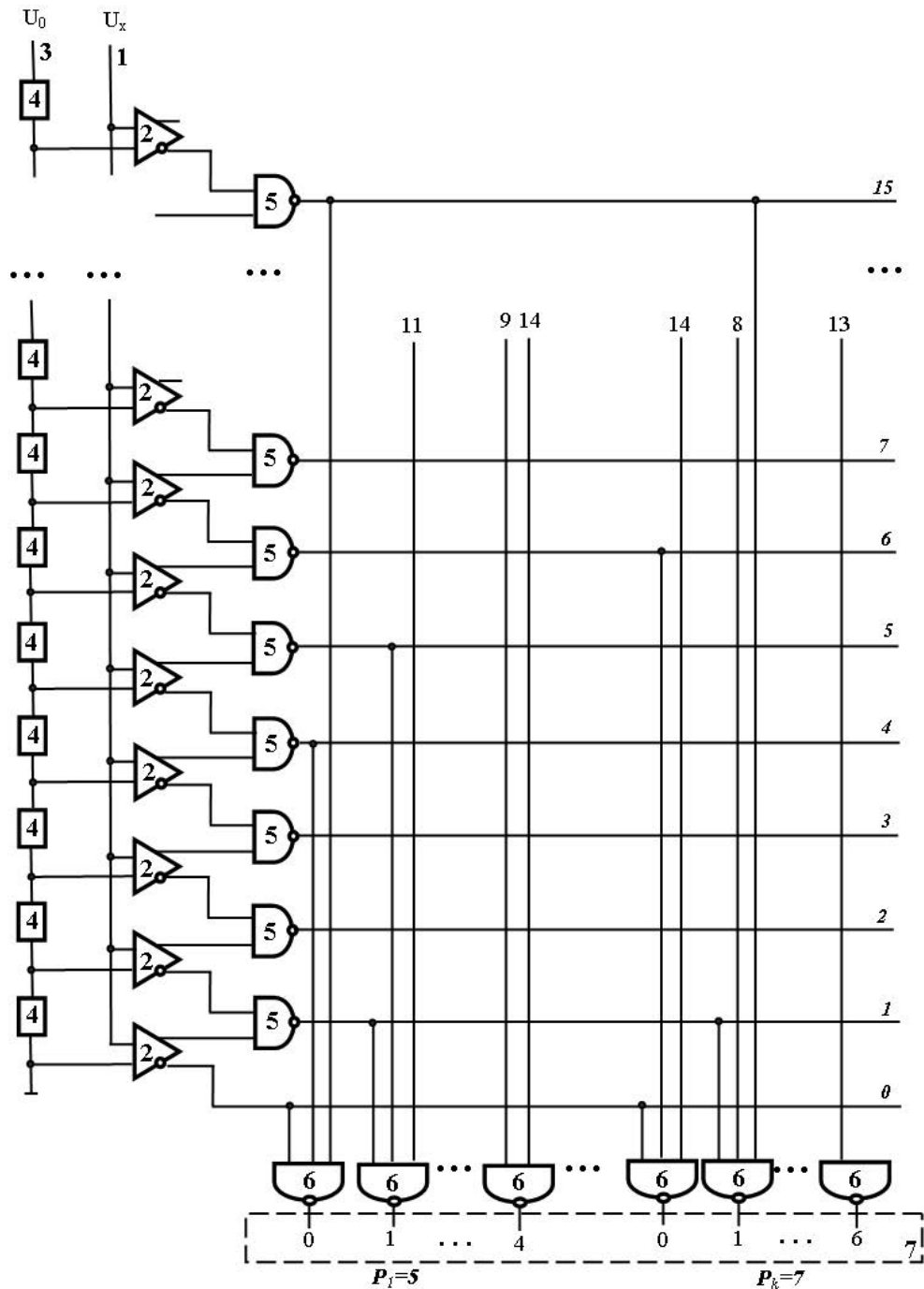


Рис.6.5 - Удосконалена структура високопродуктивного АЦП з вихідними кодами у базисі Хаара-Крестенсона.

Принцип роботи удосконаленого АЦП описано в додатку М.

Апаратна складність відомого АЦП з вихідним кодом у базисі Хаара-Крестенсона (рис.Д.6.3) розраховується згідно виразу:

$$A_1 = 2^k [(A_{k_1} + A_{JE_1}) + K \cdot A_v],$$

де  $k$  - розрядність АЦП,  $K = p_1 + p_2 + \dots + p_n$  при виконанні умови однозначного кодування даних:  $K = \hat{E}[\log_2 \prod_{i=1}^n p_i] \geq 2^k$ ;  $A_{k_1}$  - апаратна складність компаратора з однофазним виходом ( $A_{k_1}=3$ );  $A_{ЛЕ_1}$  - апаратна складність логічного елемента "Виключаюче АБО" ( $A_{ЛЕ_1} = 4 \div 5$ ),  $A_v$  - апаратна складність вентиля ( $A_v = 1$ ).

Апаратна складність удосконаленого АЦП (рис.6.5) розраховується згідно виразу:

$$A_2 = 2^k \cdot (A_{k_2} + A_{ЛЕ_1}) + (p_1 + p_2 + \dots + p_n) \cdot A_{ЛЕ_2},$$

де  $A_{k_2}$  - апаратна складність компаратора з парафазними виходами ( $A_{k_2} = 4$ );  $A_{ЛЕ_1}$  - апаратна складність двовходового логічного елемента "І-НЕ" ( $A_{ЛЕ_1} = 1$ );  $A_{ЛЕ_2}$  - апаратна складність багатовходового логічного елемента "І-НЕ" ( $A_{ЛЕ_2} = 2$ ),  $p_1, p_2 \dots p_n$  - взаємнопрості модулі системи залишкових класів.

При розрахунках відомого та удосконаленого АЦП враховується, що апаратна складність парафазного компаратора [355] на 25% вища за апаратну складність однофазного компаратора, оскільки його структурна схема містить інверсний вихід, а апаратна складність багатовходового логічного елемента "І-НЕ" у два рази перевищує відповідну складність двовходового елемента "І-НЕ" ( $A_{ЛЕ_3} = 2 \cdot A_{ЛЕ_2}$ ) при їх реалізації на емітерно-зв'язній логіці мікроелектронної технології [356].

При  $k = 10$  та наборі модулів  $P_1 = 32$ ,  $P_2 = 33$  оцінки апаратної складності відомого та удосконаленого АЦП наступні:

$$A_1 = 1024 \cdot [3 + (4 \div 5) + 2] = 1024 \cdot (9 \div 10) = 9216 \div 10240v.$$

$$A_2 = 1024 \cdot (4 + 1) + 65 \cdot 2 = 5120 + 130 = 5250v.$$

При  $k = 10$  та наборі модулів  $P_1 = 7$ ,  $P_2 = 12$ ,  $P_3 = 13$  оцінки апаратної складності відомого та удосконаленого АЦП наступні:

$$A_1 = 1024 \cdot [3 + (4 \div 5) + 3] = 1024 \cdot (10 \div 11) = 10240 \div 11264v.$$

$$A_2 = 1024 \cdot (4 + 1) + 32 \cdot 2 = 5184v.$$

Отже, апаратна складність удосконаленого АЦП розрядністю 10 біт у порівнянні з відомим АЦП аналогічної розрядності при наборі модулів вихідного коду Хаара-Крестенсона ( $P_1 = 32$ ,  $P_2 = 33$ ) зменшується практично у 2 рази, а при наборі модулів ( $P_1 = 7$ ,  $P_2 = 12$ ,  $P_3 = 13$ ) – у 2,2 рази.

Швидкодія АЦП – прототипу оцінюється згідно виразу:

$$\tau_{АЦП_1} = \tau_{k_1} + \tau_{ЛЕ_1} + \tau_{ЛВ},$$

де  $\tau_{k_1} = 5$  - тривалість переключення однофазного компаратора;  $\tau_{ЛЕ_1} = 3\nu$  - тривалість переключення логічного елемента "Виключаюче АБО";  $\tau_{ЛВ} = 1\nu$  - тривалість переключення діодного вентиля.

Тобто, швидкодія АЦП – прототипу визначається сумарною затримкою сигналів:  $\tau_{АЦП_1} = (5 + 3 + 1)\nu = 9$  мікротактів.

Швидкодія удосконаленого АЦП оцінюється згідно виразу:

$$\tau_{АЦП_2} = \tau_{k_2} + \tau_{ЛЕ_2} + \tau_{ЛЕ_3},$$

де  $\tau_{k_2} = 2\nu$  - тривалість переключення парафазного компаратора;  $\tau_{ЛЕ_2} = 1\nu$  - тривалість переключення двовходового логічного елемента "І-НЕ";  $\tau_{ЛЕ_3} = 1\nu$  - тривалість переключення багатовходового логічного елемента "І-НЕ".

Тобто швидкодія удосконаленого АЦП визначається сумарною затримкою сигналів:

$$\tau_{АЦП_2} = (2 + 1 + 1)\nu = 4\nu \text{ (мікротакти)}.$$

При розрахунках часової складності компонентів АЦП враховано, що тривалість переключення парафазного компаратора у 2,5 рази менша у порівнянні з однофазним за рахунок позитивного тригерного зворотнього зв'язку між прямим та інверсним виходами [357].

Відповідно структурна та інформаційна складність удосконаленого АЦП визначається наступним чином:

$$k_c = 2^k (k_z + k_R + k_{PK} + k_{ЛЕ}) + (p_1 + p_2 + \dots + p_n) \cdot f_{ЛЕ_3} + k_{ЛЕ_3};$$

$$F = 2^k (f_R + f_{PK} + f_{ЛЕ}) + (p_1 + p_2 + \dots + p_n) \cdot f_{ЛЕ_3};$$

$$k_e = F/k_c,$$

Тобто, при  $k = 10$ :

$$k_c = 2^{10} (5 + 15 + 18,8 + 14,4) + 65 \cdot 20 + 195 = 49356,8 + 1300 + 195 = 55971,8;$$

$$F = 2^{10} (1 + 10 + 5) + 2 \cdot 5 = 1024 \cdot 16 + 10 = 16394;$$

$$k_e = \frac{16394}{55971,8} = 0,29.$$

Таким чином досягнуто підвищення швидкодії удосконаленого АЦП у 2 рази у порівнянні з відомим АЦП, який формує вихідні паралельні коди Хаара-Крестенсона.

На діаграмі (рис.6.6) показано порівняльні характеристики суттєвого зменшення структурної складності компонентів 10-бітного АЦП з матричним шифратором та АЦП удосконаленої структури у базисі Хаара-Крестенсона.

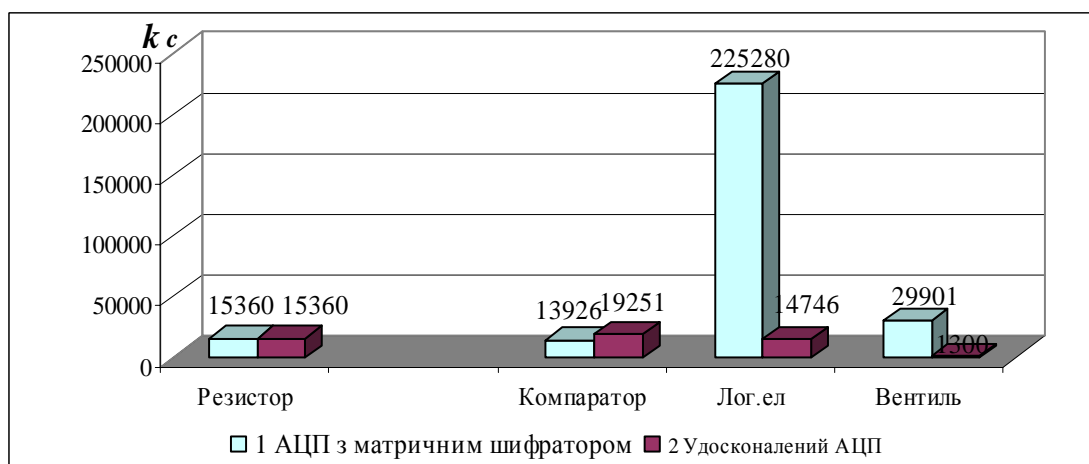


Рис.6.6 - Порівняльні характеристики структурної складності компонентів удосконаленого АЦП відносно АЦП з матричним шифратором.

На діаграмі (рис.6.7) показано порівняльні характеристики зменшення апаратної складності компонентів 10-бітного АЦП у базисі Хаара-Крестенсона з матричним шифратором та АЦП удосконаленої структури.

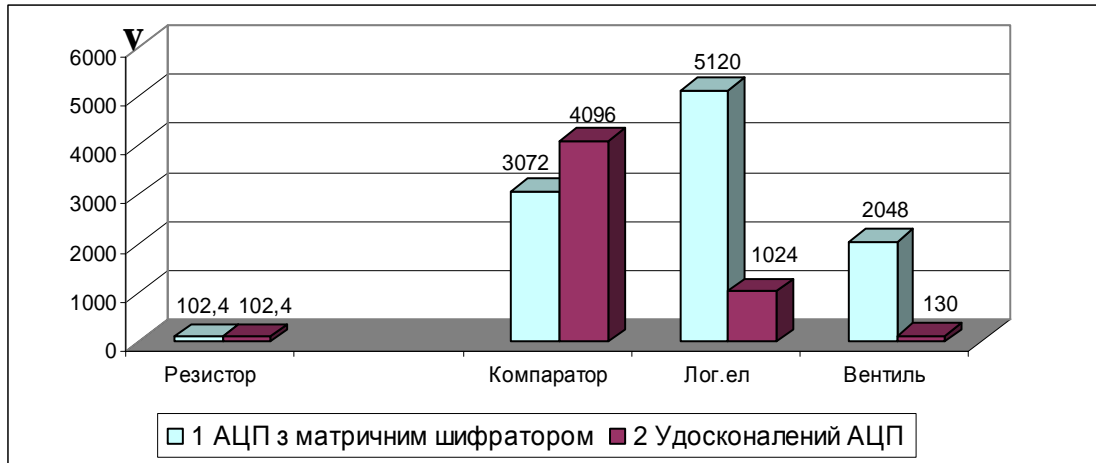


Рис.6.7 - Порівняльні характеристики апаратної складності компонентів удосконаленого АЦП відносно АЦП з матричним шифратором.

На рис.6.8 показано порівняльні характеристики підвищення швидкодії удосконаленого АЦП у порівнянні з відомими за рахунок зменшення затримки сигналів у їх структурах.

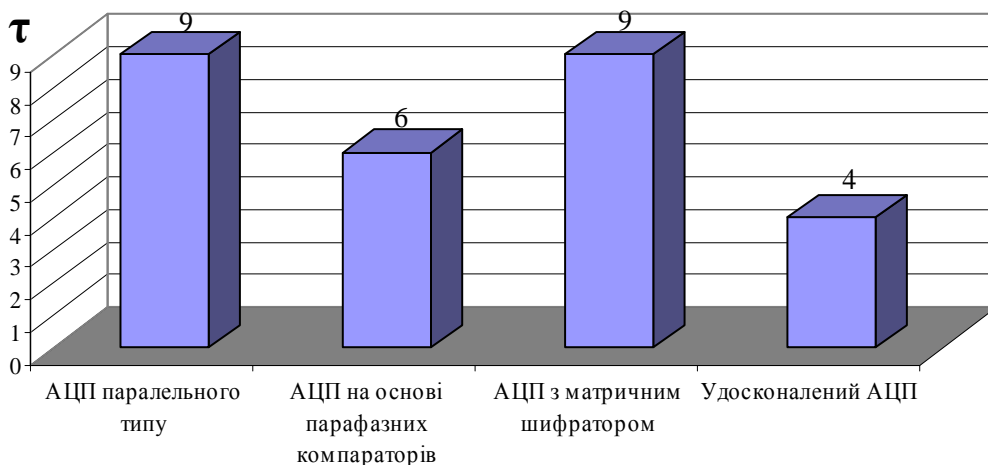


Рис.6.8 - Порівняльні характеристики підвищення швидкодії удосконаленого АЦП у порівнянні з відомими.

Таким чином в результаті запропонованого автором удосконалення структурного рішення швидкодіючого АЦП паралельного типу з вихідними кодами у базисі Хаара-Крестенсона, згідно патентів України №116176 та №116185 [190, 189], досягнуто покращення наступних його системних характеристик.



1. Структурна складність удосконаленого АЦП у порівнянні з відомим АЦП зменшена у

$$k_c = \frac{285039}{55971,8} = 5,1 \text{ разів.}$$

2 Інформаційно-структурна складність підвищена у

$$k_e = \frac{0,29}{0,047} = 6,2 \text{ разів.}$$

3. Апаратна складність удосконаленого АЦП при різних наборах модулів з вихідними кодами базису Хаара-Крестенсона у порівнянні з відомим АЦП відповідно зменшена у

$$A_1 = \frac{9216 \div 10240}{5250} = 1,76 \div 1,95 \text{ рази,}$$

$$A_2 = \frac{10240 \div 11264}{5152} = 1,99 \div 2,2 \text{ рази.}$$

4. Швидкодія підвищена у

$$\tau = \frac{9}{4} = 2,25 \text{ рази.}$$

Графіки змін системних характеристик розробленого АЦП у порівнянні з АЦП з матричним шифратором у залежності від розрядності вихідних кодів приведені на рис.6.9, 6.10.

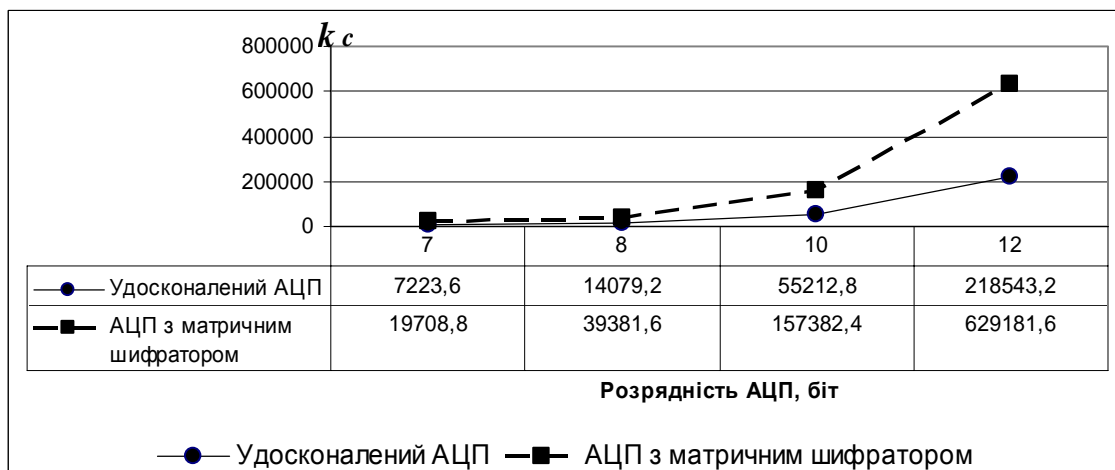


Рис.6.9 - Графік зміни структурної складності розробленого АЦП у порівнянні з АЦП з матричним шифратором.

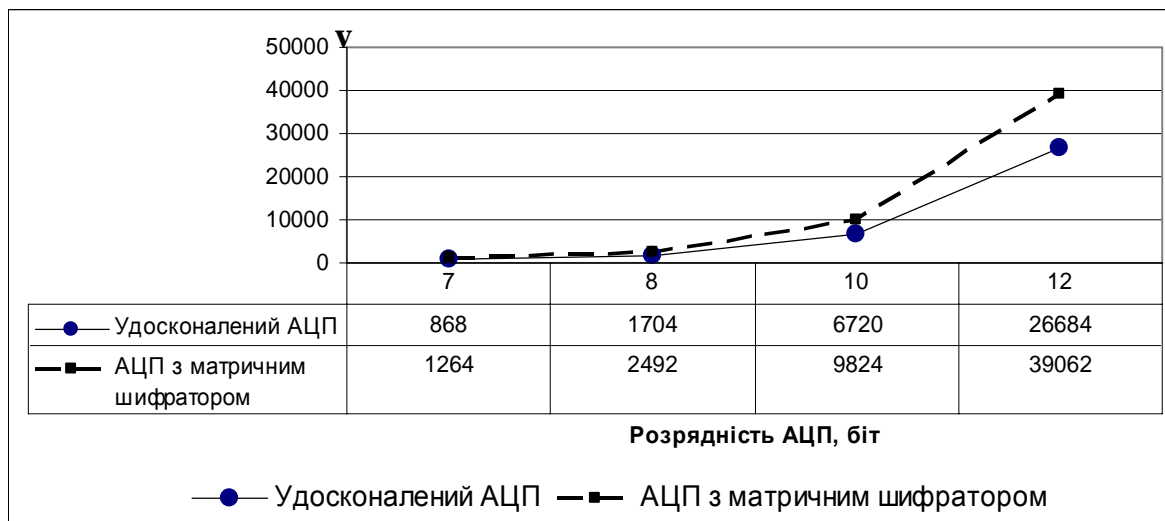


Рис.6.10 - Графік зміни апаратної складності розробленого АЦП у порівнянні з АЦП з матричним шифратором.

Згідно патенту України №116176 [190] автором запропоноване структурне та схемотехнічне рішення швидкодіючого АЦП паралельного типу з вихідними модульно-залишковими кодами в базисі Хаара-Крестенсона. Виключно висока швидкість таких АЦП, які виконують перетворення аналогових сигналів на інтервалі 4-х мікротактів, забезпечують можливість їх широкого застосування при вирішенні задач цифрового опрацювання сигналів, статистичного, кореляційного та спектрального аналізу, опрацювання та перетворення кольорових зображень, розпізнавання образів, цифрової голографії, томографії та ін.. При цьому застосування модульної арифметики кодів Хаара-Крестенсона дозволяє на 2-3 порядки підвищити швидкодію опрацювання цифрових даних [97, 160, 190]. У той же час, така структура АЦП у мікроелектронному виконанні приводить до збільшення розрядності вихідних кодів. Наприклад, для 10-бітного АЦП з вихідними двійковими кодами розрядність еквівалентного АЦП з вихідними кодами Хаара-Крестенсона при системі взаємно простих модулів ( $P_1 = 8, P_2 = 11, P_3 = 13$ ), добуток яких рівний  $8 \cdot 11 \cdot 13 = 1144 > 1024$ , складає  $8 + 11 + 13 = 32$  розряди, що дозволяє опрацьовувати цифрові дані 32-бітними стандартними мікроконтролерами.

6.1.2. Поліфункціональний АЦП з розширеними функціональними можливостями у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона.

Перспективним функціональним удосконаленням структури досліджуваного класу АЦП є розширення функціональних можливостей, що дозволяє паралельно з обчисленнями у залишкових класах виконувати обчислювальні операції, які реалізуються з великою алгоритмічною складністю у базисі Крестенсона. До таких операцій належать добування квадратного кореня, порівняння чисел, ділення та ін..

Запропонована у роботі [160] структура АЦП, який одночасно формує вихідні паралельні коди у двійковій системі числення базису Радемахера та системі числення залишкових класів базису Крестенсона, приведена на рис.6.11 [160].

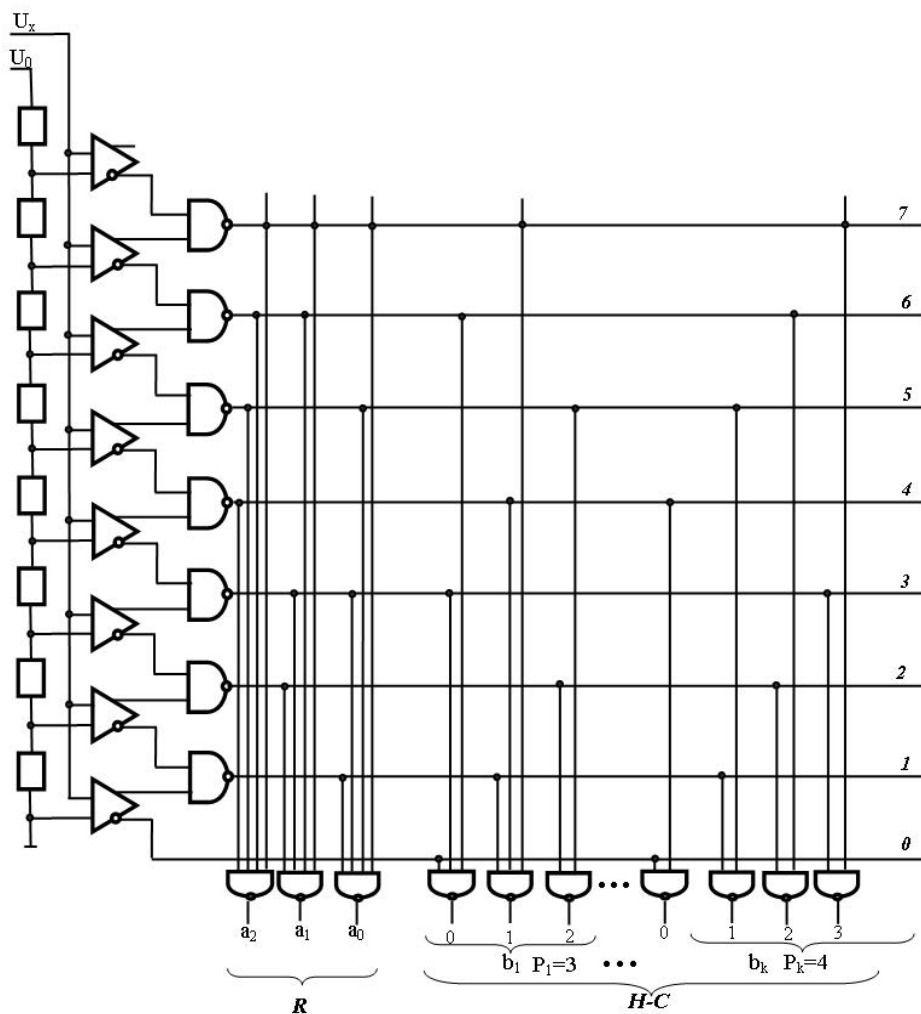


Рис.6.11 - Структура поліфункціонального АЦП паралельного типу з вихідними кодами у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона.

Синтез структури поліфункціонального паралельного АЦП у теоретико-числових базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона виконаний на основі формалізованих рішень формування паралельних кодів на виходах АЦП (рис.6.12) [160].

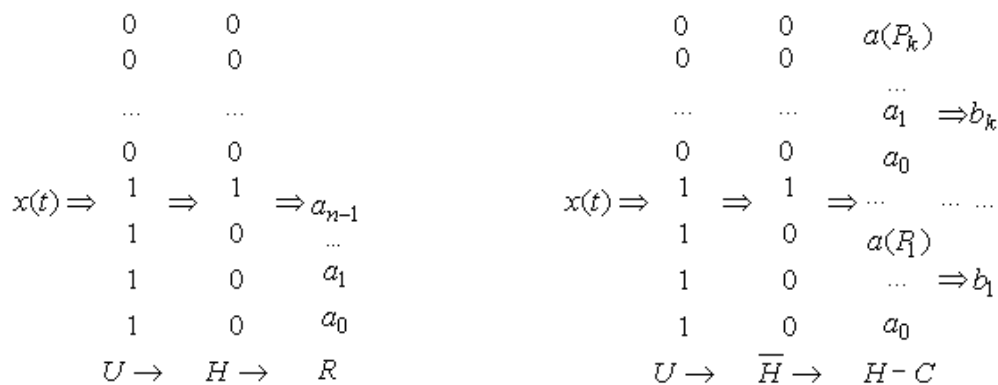


Рис.6.12 - Приклади формування вихідних кодів паралельних АЦП у кодових системах Радемахера та Хаара-Крестенсона.

Характеристики складності компонентів такого АЦП, згідно експертних оцінок, приведені в табл.6.2 [160].

Таблиця 6.2 - Вагові коефіцієнти складностей компонентів АЦП

Компонент АЦП	$A$	$\tau$	$F$	$k_c$
Комунікаційний зв'язок ( $k_z$ )	0,1	0	1	1
Компаратор парафазний ( $PK$ )	4	2	10	18,8
Логічний елемент "І-НЕ" 2-входовий ( $ЛЕ1$ )	1	1	5	14,4
Логічний елемент "І-НЕ" $n$ -входовий ( $ЛЕ2$ )	2	1	5	20
Резистор ( $p$ )	1	0	1	15

Результати розрахунку системних характеристик складності такого АЦП виконуються згідно виразів:

$$A_R = (A_{kz} + A_p + A_{PK} + A_{ЛЕ1}) \cdot 2^k + k \cdot A_{ЛЕ2};$$

$$A_{H-C} = (A_{kz} + A_p + A_{PK} + A_{ЛЕ1}) \cdot 2^k + \left( \sum_1^n P_i \right) \cdot A_{ЛЕ2}.$$

Тобто, при одночасному застосуванні двох паралельних АЦП з вихідними кодами у базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона, загальна апаратна складність визначається згідно виразу:

$A = 2 \cdot ((A_p + A_{PK} + A_{JE_1}) \cdot 2^k) + k \cdot A_{JE_2} + (\sum_1^n P_i) \cdot A_{JE_2}$ , що для АЦП при  $k = 10$ , складає:  $A = 2 \cdot (2^{10} \cdot (0,1 + 4 + 1)) + 10 \cdot 2 + 32 \cdot 2 = 10528V$ .

Системні характеристики запропонованого поліфункціонального АЦП, який одночасно формує вихідні коди у базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона відповідають виразам:

$$A = (A_p + A_{PK} + A_{JE_1}) \cdot 2^k + k \cdot A_{JE_2} + (\sum_1^n P_i) \cdot A_{JE_2},$$

$$\tau = \tau_{kz.} + \tau_p + \tau_{PK} + \tau_{JE_1} + \tau_{JE_2};$$

$$k_c = 2^n (k_{ckz} + k_{cp} + k_{cPK} + k_{cJE_1}) + k \cdot k_{cJE_2} + (p_1 + p_2 + \dots + p_n) \cdot k_{cJE_2} + k_z;$$

$$F = 2^k (f_R + f_{PK} + f_{JE}) + k \cdot f_{JE_2} + (p_1 + p_2 + \dots + p_n) \cdot f_{JE_2}$$

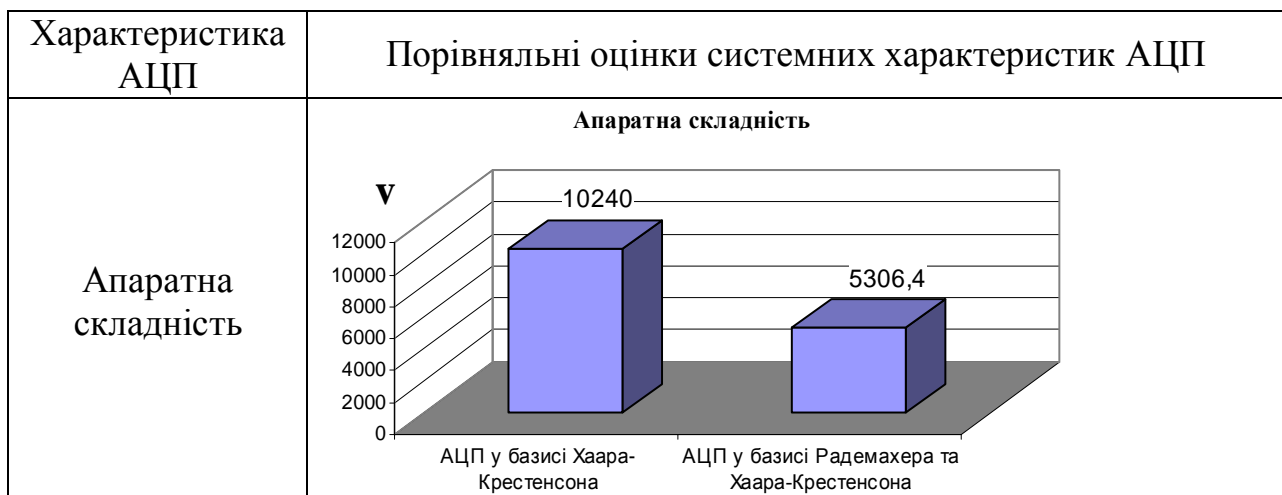
та становлять при  $k = 10$ :  $A = 2^{10} \cdot (0,1 + 4 + 1) + 10 \cdot 2 + 32 \cdot 2 = 5306 V$ ;

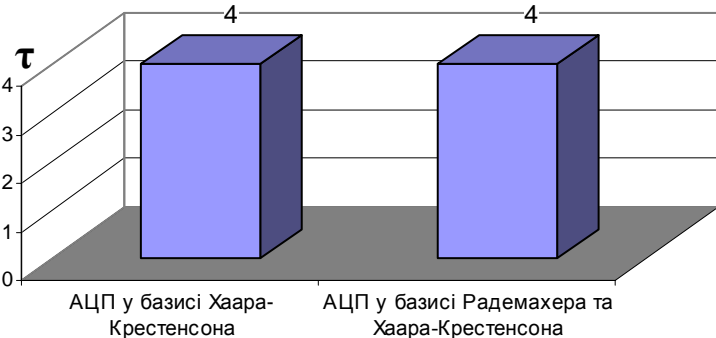
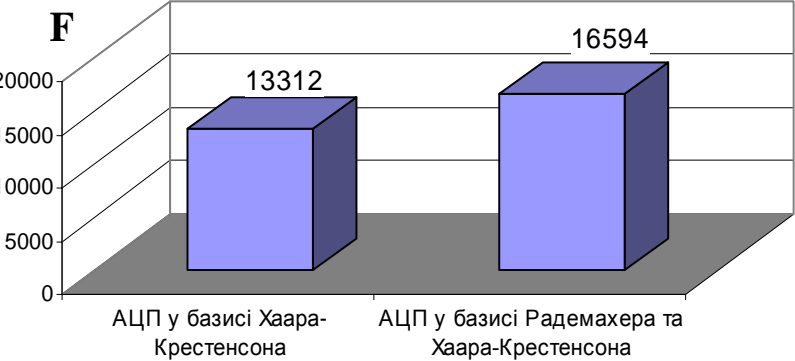
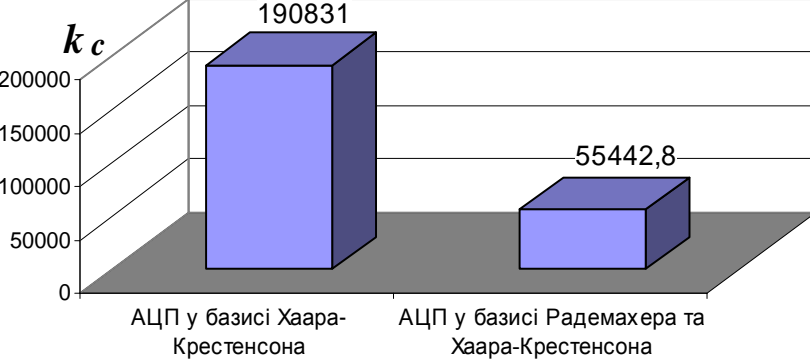
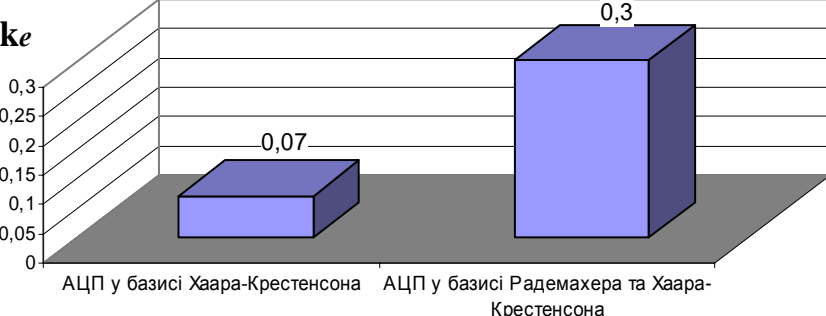
$$\tau = 2 + 1 + 1 = 4 \nu; k_c = 2^{10} (5 + 15 + 18,8 + 14,4) + 10 \cdot 20 + 32 \cdot 20 + 126 = 55442,8;$$

$$F = 2^{10} (1 + 10 + 5) + 10 \cdot 5 + 32 \cdot 5 = 16594; k_e = \frac{16594}{55442,8} = 0,3.$$

На діаграмах (табл.6.3) показані порівняльні характеристики структурної, апаратної, часової складності та ефективності структури АЦП у базисі Хаара-Крестенсона з матричним шифратором та АЦП з розширеними функціональними можливостями з вихідними кодами у базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона.

Таблиця 6.3 – Порівняльні оцінки системних характеристик АЦП



<p>Швидкодія</p>	<p style="text-align: center;"><b>Швидкодія</b></p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Метод</th> <th>Швидкодія (<math>\tau</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>АЦП у базисі Хаара-Крестенсона</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>	Метод	Швидкодія ( $\tau$ )	АЦП у базисі Хаара-Крестенсона	4	АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона	4
Метод	Швидкодія ( $\tau$ )						
АЦП у базисі Хаара-Крестенсона	4						
АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона	4						
<p>Функціональна складність</p>	<p style="text-align: center;"><b>Функціональна складність</b></p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Метод</th> <th>Функціональна складність (F)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>АЦП у базисі Хаара-Крестенсона</td> <td>13312</td> </tr> <tr> <td>АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона</td> <td>16594</td> </tr> </tbody> </table>	Метод	Функціональна складність (F)	АЦП у базисі Хаара-Крестенсона	13312	АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона	16594
Метод	Функціональна складність (F)						
АЦП у базисі Хаара-Крестенсона	13312						
АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона	16594						
<p>Структурна складність</p>	<p style="text-align: center;"><b>Структурна складність</b></p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Метод</th> <th>Структурна складність (<math>k_c</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>АЦП у базисі Хаара-Крестенсона</td> <td>190831</td> </tr> <tr> <td>АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона</td> <td>55442,8</td> </tr> </tbody> </table>	Метод	Структурна складність ( $k_c$ )	АЦП у базисі Хаара-Крестенсона	190831	АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона	55442,8
Метод	Структурна складність ( $k_c$ )						
АЦП у базисі Хаара-Крестенсона	190831						
АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона	55442,8						
<p>Ефективність структури</p>	<p style="text-align: center;"><b>Ефективність структури</b></p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Метод</th> <th>Ефективність структури (<math>k_e</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>АЦП у базисі Хаара-Крестенсона</td> <td>0,07</td> </tr> <tr> <td>АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона</td> <td>0,3</td> </tr> </tbody> </table>	Метод	Ефективність структури ( $k_e$ )	АЦП у базисі Хаара-Крестенсона	0,07	АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона	0,3
Метод	Ефективність структури ( $k_e$ )						
АЦП у базисі Хаара-Крестенсона	0,07						
АЦП у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона	0,3						

Викладені результати вдосконалення структури та системних характеристик АЦП паралельного типу з вихідними кодами у різних ТЧБ та поліфункціональними властивостями сумісності з іншими арифметико-логічними пристроями обчислювальної техніки відповідають реалізації нових

методів структуризації поліфункціональних даних, представлених у структурному відображенні запропонованої концепції.

6.2. Реалізація удосконалених структур швидкодіючих однорозрядних та багаторозрядних суматорів базису Радемахера.

Арифметична операція додавання існує практично у всіх алгоритмах опрацювання сигналів та обчислень. Ця операція та компоненти, які її реалізують є ваговим атрибутом, який суттєво може впливати на продуктивність, апаратну та структурну складність багаторозрядних обчислювальних пристроїв та їх компонентів.

Однорозрядні неповні та повні суматори є базовими компонентами при побудові арифметико-логічних пристроїв (АЛП) універсальних та спеціалізованих процесорів, персональних комп'ютерів та мікроконтролерів, а також співпроцесорів та прискорювачів обчислювальних операцій, багаторозрядних суматорів з прискореними переносами, матричних перемножувачів, процесорів сортування двійкових кодів, процесорів цифрового опрацювання багаторозрядних кодів при реалізації алгоритмів шифрування даних та інш. Кількість однорозрядних неповних та повних двійкових суматорів у структурах вказаних пристроїв може складати 3-6 порядків. Тому удосконалення системних характеристик двійкових суматорів згідно критеріїв максимального зменшення їх структурної, часової та апаратної складності є актуальною науково-прикладною задачею їх мікроелектронного синтезу на кристалах.

Результати розрахунку та дослідження системних характеристик запропонованих структур однорозрядних неповних та повних двійкових суматорів з досягнутими граничними мінімаксними характеристиками структурної, апаратної та часової складності приведені в додатку Н. Такі суматори у якості базових компонентів складних багаторозрядних обчислювальних структур дозволили значно спростити їх структурні рішення та покращити системні характеристики апаратної та часової складності.

### 6.3. Багаторозрядні комбінаційні суматори.

6.3.1. Багаторозрядний комбінаційний суматор пірамідального типу з парафазними інформаційними зв'язками.

Комбінаційні суматори пірамідального типу застосовуються у якості базових компонентів швидкодіючих арифметико-логічних пристроїв та процесорів опрацювання цифрових даних.

Відома структура комбінаційного багаторозрядного суматора (рис.6.13) [360] містить 6-ти розрядну вхідну шину ( $a_0, b_0, a_1, b_1, a_2, b_2$ ), виходи якої з'єднані з відповідними прямими входами пірамідальної структури, яка містить логічні елементи "Виключаюче АБО" та "І", виходи якої з'єднані з відповідними входами вихідної шини ( $S_0, S_1, S_2, S_3$ ).

Оцінка системних характеристик такого суматора здійснюється на основі розрахунку апаратних ( $A$ ), часових ( $\tau$ ), структурних ( $k_c$ ), функціональних ( $F$ ) та функціонально-структурних ( $k_e$ ) характеристик його компонентів (таблиця 6.4).

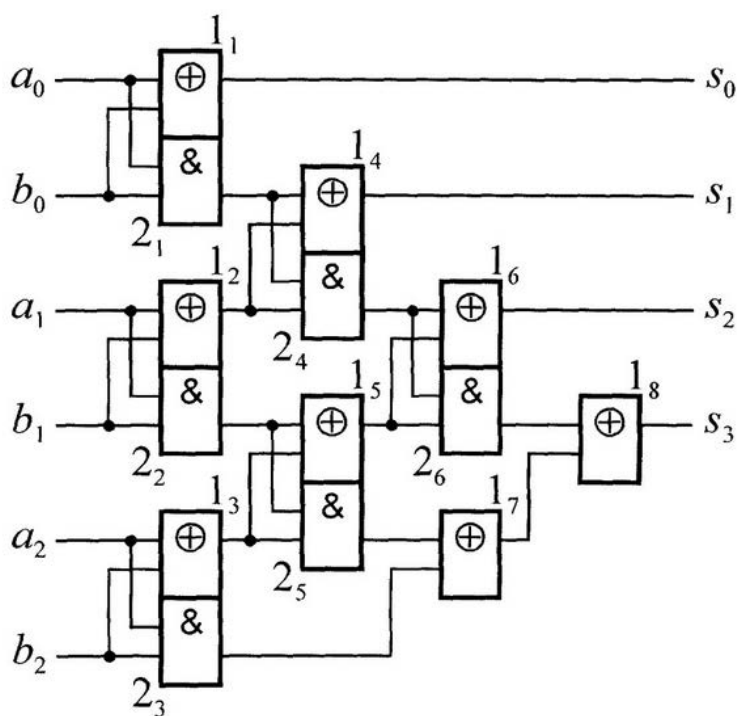


Рис.6.13 - Комбінаційний суматор, що містить елементи "Виключаюче АБО" (1) та "І" (2).



Таблиця 6.4 - Оцінки системних характеристик компонентів комбінаційного суматора при розрядності  $k = 4$ .

Компоненти структури	К-ть компонентів	Вхід	Вихід	$A, v$		$\tau, v$		$k_c$		$F$		$k_e$
				1 ел.	$\Sigma$	1 ел.	$\Sigma$	1 ел.	$\Sigma$	1 ел.	$\Sigma$	
"Виключаюче АБО"	12	2	1	$4 \div 5$	$48 \div 60$	3	18	128	1536	3	36	0,023
"І"	10	2	1	1	10	1	4	11,2	112	3	30	0,27
Сумарна оцінка		8	5		$58 \div 70$		18		1648		13	0,007

Недоліками відомого комбінаційного суматора є велика структурна та апаратна складність, обмежені функціональні можливості та низька швидкодія.

Практично, кожні два логічні елементи "Виключаюче АБО" та "І", пірамідальної структури такого суматора реалізують структуру та функції однорозрядного неповного двійкового суматора з прямими входами та прямими виходами сум, що формують сигнали прямих горизонтальних інформаційних зв'язків та переносу та формують відповідні прямі вертикальні інформаційні зв'язки пірамідальної структури комбінаційного суматора. Крім того ланцюжок послідовно з'єднаних входами та виходами логічних елементів "Виключаюче АБО" у старшому розряді пірамідальної структури такого суматора фактично виконує функції логічного елемента "АБО" для формування відповідного біта на виході старшого розряду вихідної шини пристрою, що ускладнює структуру такого суматора та знижує швидкодію при збільшенні розрядності комбінаційного суматора.

Обмежені функціональні можливості такого суматора обумовлені тим, що відомий суматор дозволяє виконувати додавання тільки трьохрозрядних двійкових чисел, а низька швидкодія такого суматора обумовлена тим, що пірамідальна структура містить логічні елементи "Виключаюче АБО" тільки з прямими входами та прямим виходом, що потребує застосування структурної реалізації логічних елементів "Виключаюче АБО" на основі не менше 3-х послідовно з'єднаних логічних елементів "НЕ", "І-НЕ" та "АБО-НЕ" (рис.6.1) [353].

На рис.6.14 зображена структурна схема запропонованої автором структури комбінаційного суматора (Патент 116601) [197], де: 1- вхідна  $2n$ -розрядна шина ( $a_0b_0, a_1b_1, a_2b_2, \dots, a_{n-1}b_{n-1}$ ); 1.1 – логічні елементи "НЕ"; 2- пірамідальна структура з парафазними входами, яка містить: наступні типи однорозрядних неповних суматорів: 2.1 – з парафазними входами і парафазними виходами суми та переносу (рис.Н.3б), 2.2 – з парафазним виходом переносу і прямим виходом суми (рис.Н.2б); 2.3 – з парафазним виходом суми та інверсним виходом переносу (рис.Н.3а); 2.4- з інверсним виходом переносу і прямим виходом суми (рис.Н.2а); 2.5 – інвертор; 3 – вихідна шина комбінаційного суматора ( $S_0, S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, S_n$ ).

Принцип роботи багаторозрядного комбінаційного суматора пірамідального типу з парафазними інформаційними зв'язками описаний в додатку М.

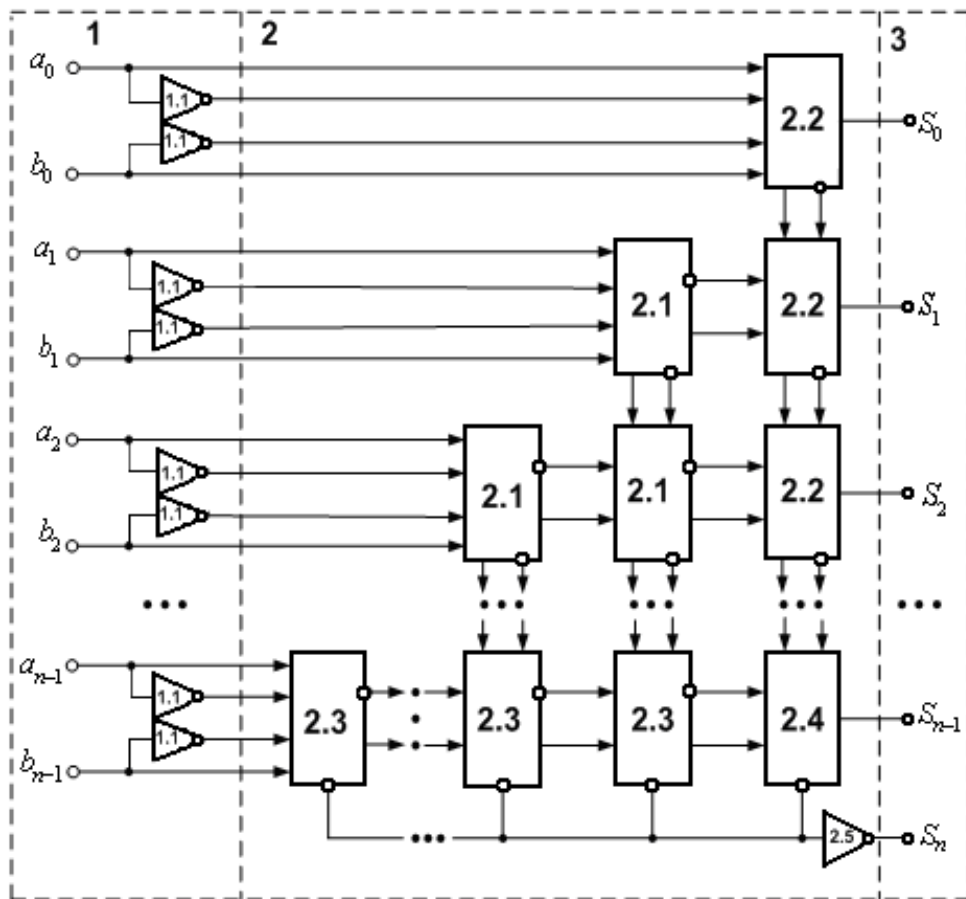


Рис.6.14 - Структурна схема багаторозрядного комбінаційного суматора.

Оцінка системних характеристик такого комбінаційного суматора (рис. 6.14) здійснюється на основі характеристик його компонентів (таблиця 6.5).

Таблиця 6.5 - Оцінки системних характеристик компонентів комбінаційного суматора при розрядності  $k = 4$ .

Компоненти структури	К-ть компонентів	Вхід	Вихід	$A, v$		$\tau, \upsilon$		$k_c$		$F$		$k_e$
				1 ел.	$\Sigma$	1 ел.	$\Sigma$	1 ел.	$\Sigma$	1 ел.	$\Sigma$	
Інвертор	9	1	1	1	9	1	1	14	126	2	18	0,14
Суматор 2.1	3	4	4	6	18	1	1	261	783	8	24	0,03
Суматор 2.2	3	4	3	4	12	1	1	194,4	583,2	7	21	0,9
Суматор 2.3	3	4	3	5	15	1	1	228	684	7	21	0,03
Суматор 2.4	1	4	2	3	3	1	1	150,8	150,8	6	6	0,8
Сумарна оцінка	19	8	5		57		6		2327		15	0,006

Таким чином, у результаті запропонованого удосконалення комбінаційного суматора, у порівнянні з відомим, досягнуто розширення функціональних можливостей комбінаційного суматора за рахунок здійснення додавання двох двійкових кодів з розрядністю  $n \geq 3$ , що показано на порівняльних діаграмах (рис.6.15-6.17).

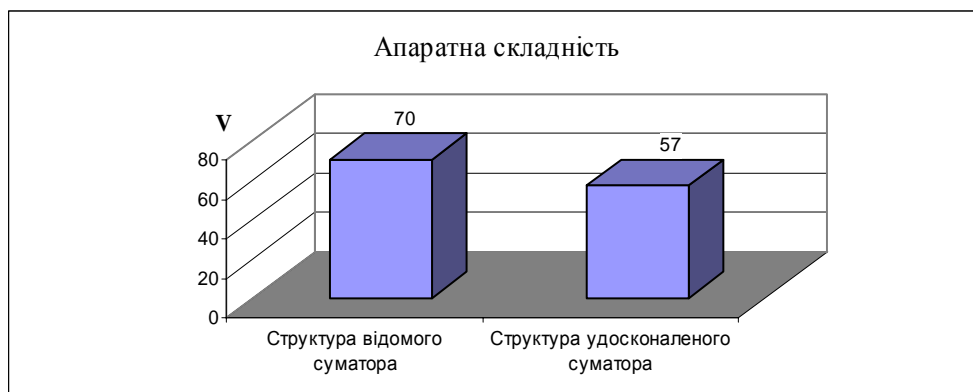


Рис.6.15 - Оцінка апаратної складності багаторозрядних комбінаційних суматорів пірамідального типу з парафазними інформаційними зв'язками.

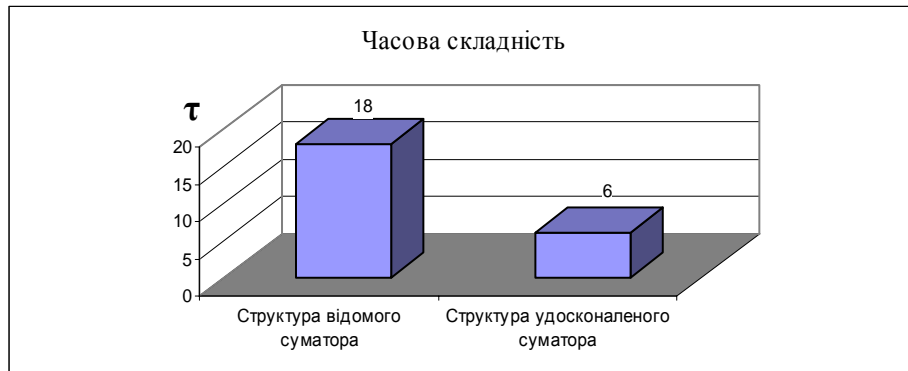


Рис.6.16 - Оцінка часової складності багаторозрядних комбінаційних суматорів пірамідального типу з парафазними інформаційними зв'язками.

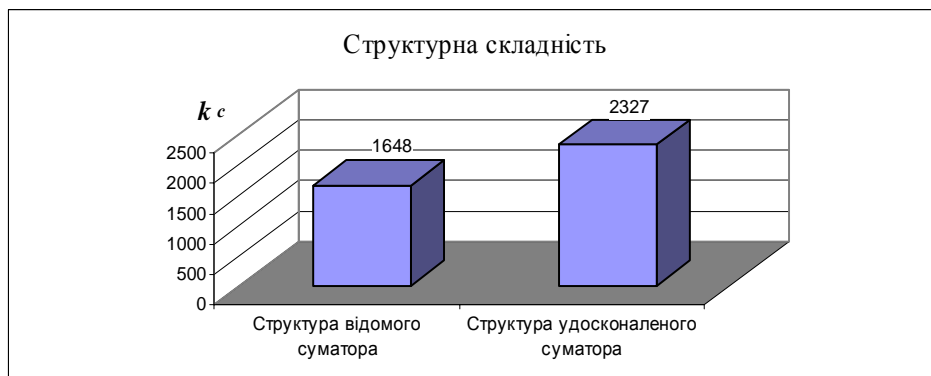


Рис.6.17 - Оцінка структурної складності багаторозрядних комбінаційних суматорів пірамідального типу з парафазними інформаційними зв'язками.

З діаграм видно, що при однаковій розрядності входів та виходів відомого та запропонованого суматора апаратна складність зменшилася у  $\frac{70}{57} = 1,23$  рази, часова складність зменшилася у  $\frac{18}{6} = 3$  рази при зростанні структурної складності у  $\frac{2327}{1648} = 1,4$  рази.

6.3.2. Багаторозрядний комбінаційний суматор пірамідального типу з однофазними інформаційними зв'язками.

На рис.6.18 зображена структурна схема запропонованого автором комбінаційного суматора (Патент 115751) [196], де 1- вхідна  $2n$ -розрядна шина  $(a_0b_0, a_1b_1, a_2b_2, \dots, a_{n-1}b_{n-1})$ ; 2- пірамідальна структура, яка містить: наступні типи однорозрядних неповних суматорів: 2.1 – з прямими входами і прямими виходами суми та переносу (рис.Н.4а); 2.2 – з прямими входами, прямими

виходами суми та інверсним виходом переносу (рис.Н.4б); 2.3 – інвертор; 3 – вихідна шина комбінаційного суматора ( $S_0, S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, S_n$ ).

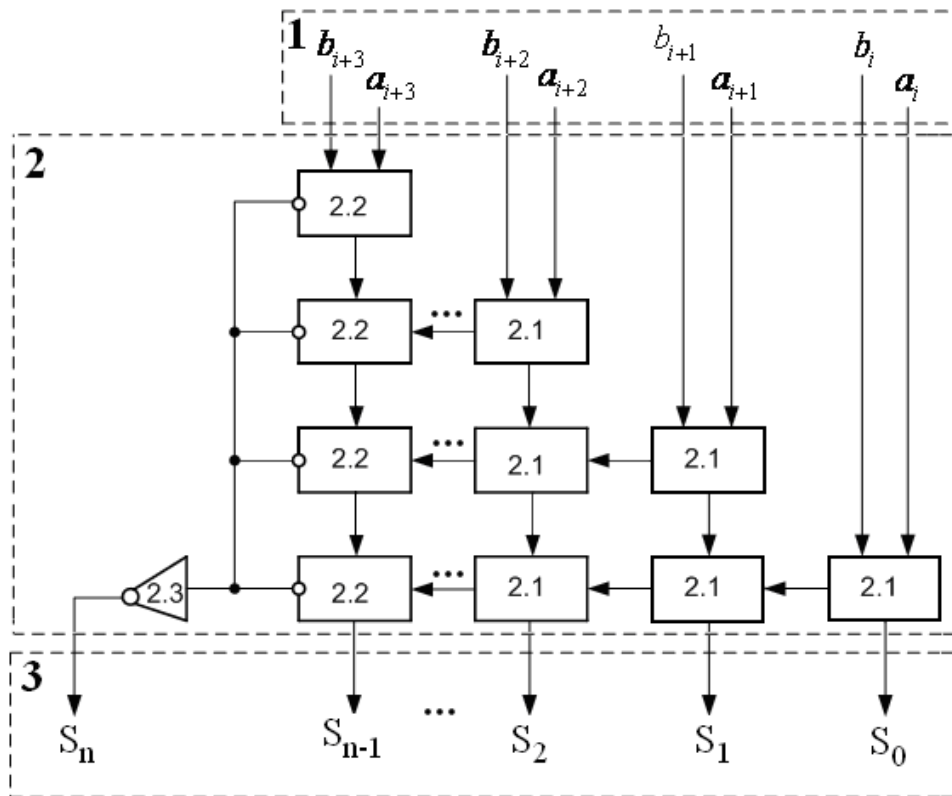


Рис.6.18 - Структурна схема комбінаційного суматора.

Принцип роботи багаторозрядного комбінаційного суматора пірамідального типу з однофазними інформаційними зв'язками описаний в додатку М

Оцінка системних характеристик удосконаленої структури багаторозрядного комбінаційного суматора (рис.6.18) здійснюється на основі розрахунку системних характеристик його компонентів (табл.6.6).

Таблиця 6.6 - Оцінки системних характеристик компонентів комбінаційного суматора при розрядності  $k = 4$ .

Компоненти структури	К-ть компонентів	Вхід	Вихід	$A, v$		$\tau, v$		$k_c$		$F$		$k_e$
				1 ел.	$\Sigma$	1 ел.	$\Sigma$	1 ел.	$\Sigma$	1 ел.	$\Sigma$	
				Суматор 2.1	6	2	2	3	18	2	1	
Суматор 2.2	4	2	2	3	12	2	1	120,4	481,6	4	16	0,03
Інвертор 2.3	1	1	1	1	1	1	1	14	14	2	2	0,14
Сумарна оцінка	11	8	5		31		5	249,6	1228,8		13	0,01

Таким чином, у результаті запропоновано удосконалення комбінаційного суматора, у порівнянні з відомою структурою на основі парафазних компонентів (рис.6.14), досягнуто зменшення апаратної складності запропонованого комбінаційного суматора у  $\frac{57}{31} = 1,8$  разів, зменшення структурної складності у  $\frac{2327}{1228,8} = 1,9$  разів.

Графіки зміни оцінок апаратної та структурної складностей запропонованих комбінаційних суматорів у залежності від розрядності вихідних кодів у порівнянні з відомим суматором на логічних елементах "Виключаюче АБО" показані на рис.6.19, 6.20.

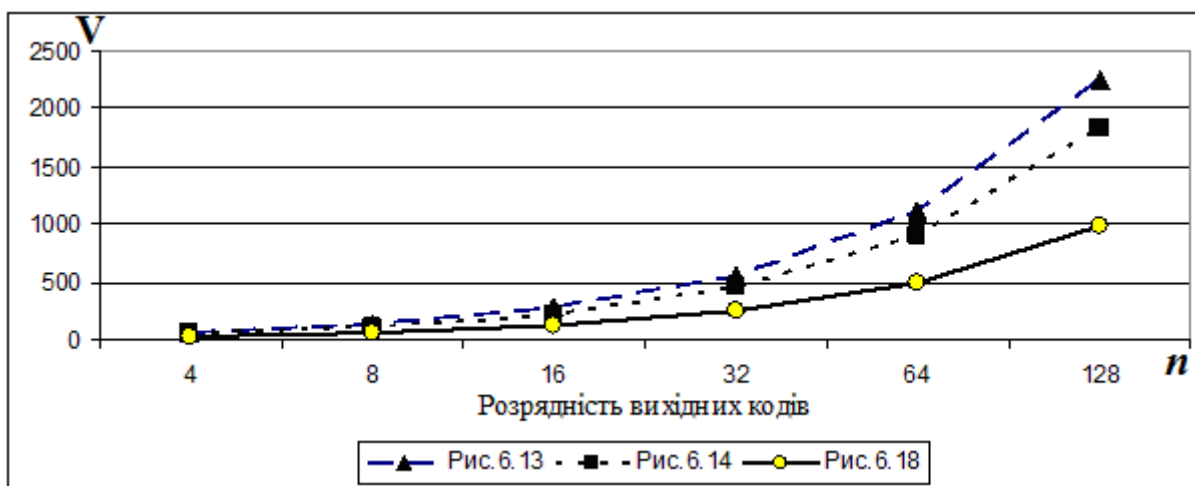


Рис.6.19 - Порівняльні характеристики зміни апаратної складності комбінаційних суматорів у залежності від розрядності вихідних кодів.

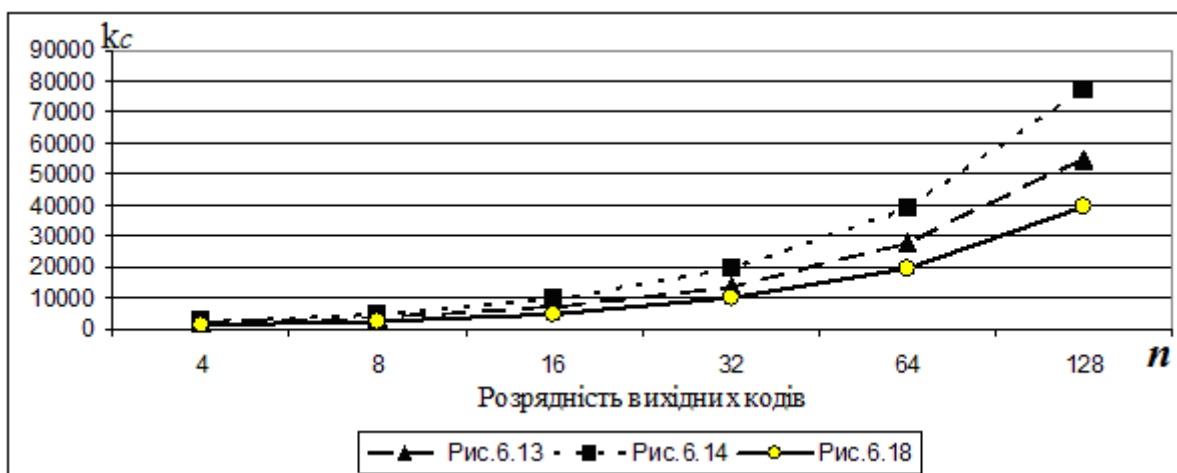


Рис.6.20 - Порівняльні характеристики оцінок структурної складності комбінаційних суматорів у залежності від розрядності вихідних кодів.

Таким чином при застосуванні даного класу багаторозрядних двійкових суматорів у якості базових компонентів багаторозрядних суматорів з прискореними переносами (Патент 117572) [187] та структурних компонентів високопродуктивних спецпроцесорів опрацювання великорозрядних чисел у задачах розпізнавання образів та шифрування потоків інформаційних даних практично досягається зменшення апаратної складності на 56%, структурної – на 25,5%, підвищення швидкодії на 72,3%.

### 6.3.3. Багаторозрядний суматор з прискореним переносом

Багаторозрядні суматори з прискореними переносами застосовуються для підвищення швидкодії процесорів, які опрацьовують великорозрядні числа (512-2048 біт) у задачах шифрування інформаційних потоків даних, а також у багаторозрядних співпроцесорах – прискорювачах операцій множення за структурами Брауна, Дадда, Бута та ін., піднесення до квадрату, порівняння двійкових чисел та реалізації операцій визначення залишків по модулю [33. 44 361-364].

Відомий суматор з прискореним переносом (рис.6.21) [365] містить 4-розрядний суматор у першому модулі, два 4-розрядні суматори, що працюють паралельно та мультиплексор у кожному наступному модулі та вихідну шину ( $S_n - S_0$ ).

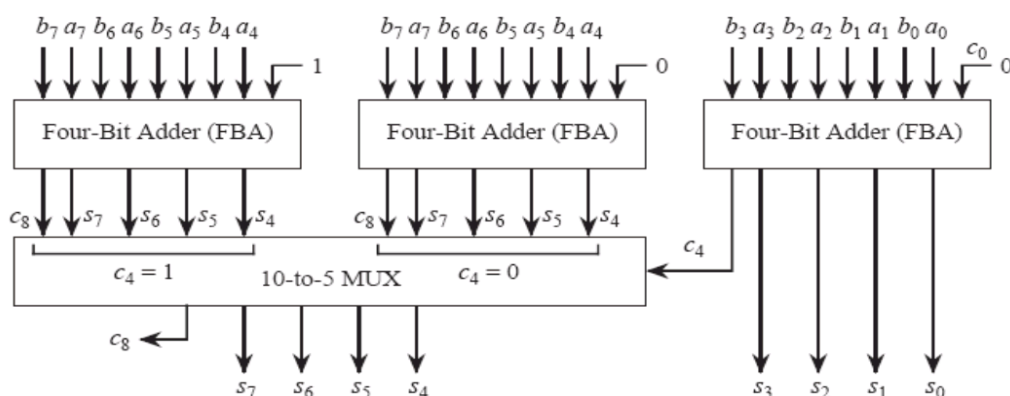


Рис.6.21 - Схема суматора з прискореним переносом.

Вихід наскрізного переносу першого модуля ( $C_4$ ) комутує виходи двох суматорів у кожному наступному модулі, в якому перший суматор виконує

операцію додавання з нульовим входом переносу, а другий – з одиничним входом переносу. У залежності від вихідного значення переносу ( $C_4$ ) на виході мультиплектора формується код отриманої суми суматора з нульовим або одиничним входами переносу.

Недоліком такого пристрою є велика структурна складність та низька швидкодія. Велика структурна складність обумовлена великою апаратною складністю двох багаторозрядних комбінаційних суматорів у кожному модулі, починаючи з другого та наявністю у кожному мультиплексорі двох інверторів.

Оцінка системних характеристик суматора з прискореним переносом (рис.6.21) здійснюється на основі характеристик його компонентів (табл. 6.7).

Таблиця 6.7 - Оцінки системних характеристик суматора з прискореним переносом при 4-розрядних розмежованих модулях.

Компоненти структури	Входи модулів	Виходи модулів	$k_c$	$A, v$	$\tau, \upsilon$	$F$	$k_e$
Суматор першого модуля	9	5	1796	44	8	14	0,008
Суматори наступних модулів	18	10	3592	88	8	28	0,008
Мультиплексор	9	5	505,8	24	3	14	0,03

Загальні оцінки системних характеристик відомого суматора наступні:

$$k_c = k_{c\Sigma 1} + (n - 1) \cdot (2k_{c\Sigma} + k_{cM}) = 1796 + 4098 \cdot (n - 1);$$

$$A = A_{\Sigma} + (n - 1) \cdot (2A_{\Sigma} + A_M); F = n \cdot (2m + 1) + n + 1; \tau = (n - 1) \cdot 3 + 9.$$

При  $n = 16, 32, 64, 128$  отримаємо наступні оцінки системних характеристик такого класу суматорів:

$$A = 1724, 3516, 7100, 14268 \text{ вентилів}; \tau = 54, 102, 198, 390 \text{ мікротактів};$$

$$k_c = 63266, 128834, 259970, 522242 \text{ одиниць.}$$

Розроблена структура удосконаленого багаторозрядного суматора з прискореним переносом (Патент 117572) для 4-розрядних розмежованих модулів ілюструється рис.6.22 [187].



Суматор з прискореним переносом містить: 1 – вхідна  $2n$ -розрядну шина; 2 –  $n/m$ ,  $m$ -розрядних суматорів; 3 –  $m$ -розрядний інкрементний суматор (рис.6.24); 4 –  $m+1$ -розрядний мультиплексор з парафазними керуючими входами (рис.6.23); 5 – вихідна  $n+1$ -розрядна шина.

Принцип роботи суматора з прискореним переносом описаний в додатку М.

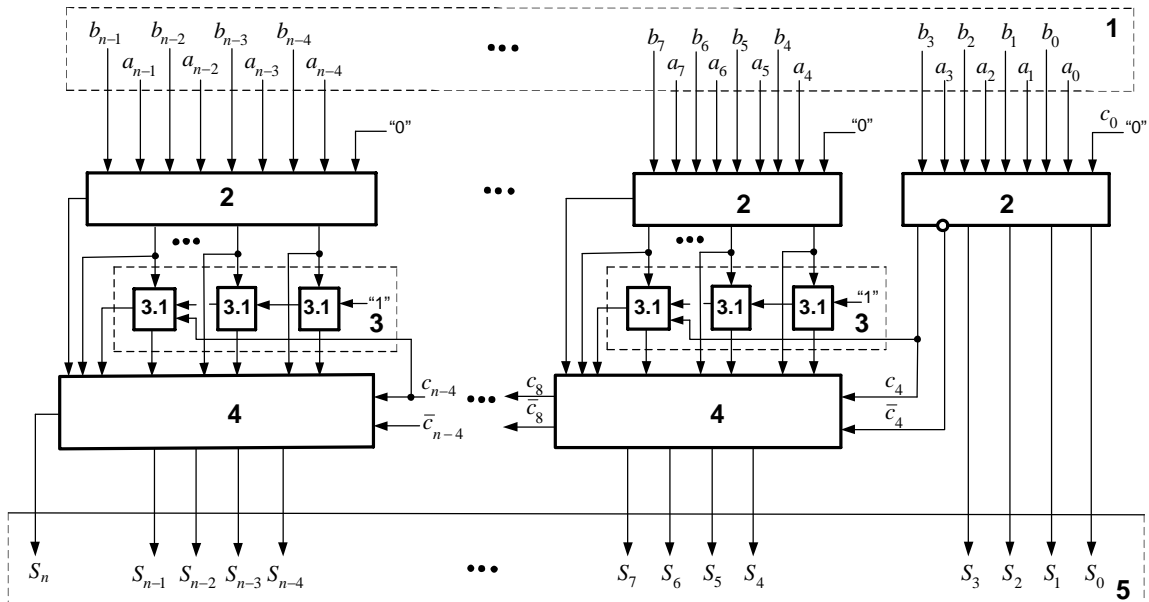


Рис.6.22 - Структура суматора з прискореним переносом.

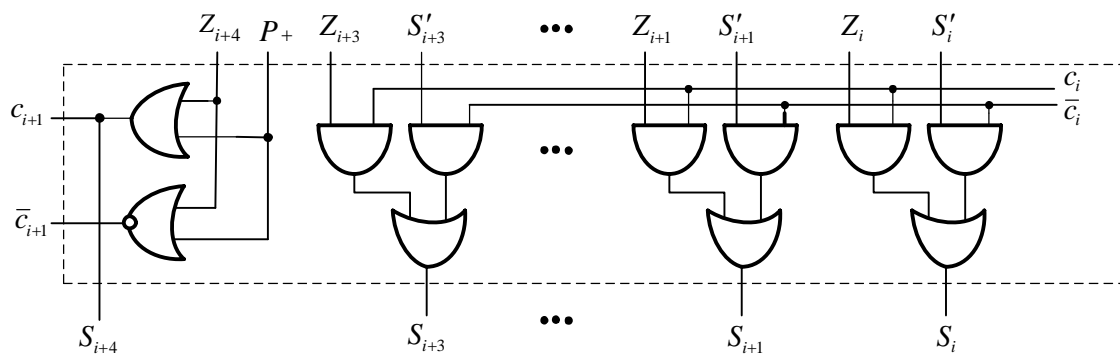


Рис.6.23 - Структура мультиплексора.

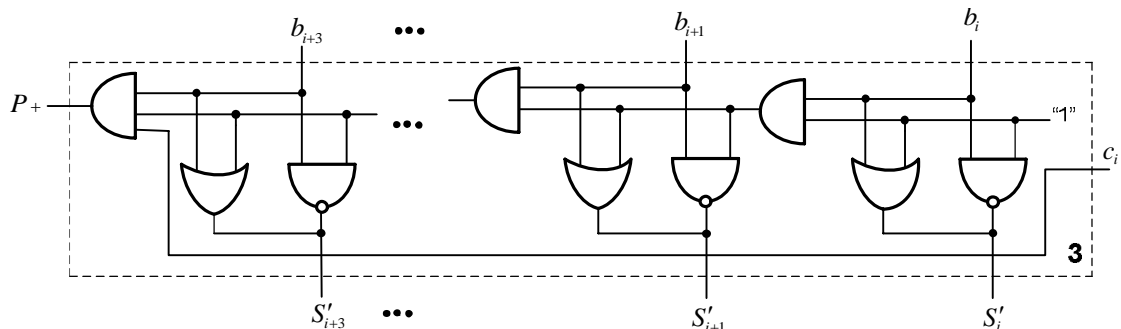


Рис.6.24 - Структура інкрементного суматора.

Оцінка системних характеристик суматора з прискореним переносом з 4-розрядними модульними суматорами (рис.6.22) здійснюється на основі характеристик його компонентів (табл.6.8).

Таблиця 6.8 - Оцінки системних характеристик суматора з прискореним переносом.

Компоненти структури	Вхід	Вихід	$k_c$	$A, v$	$\tau, v$	$F$	$k_e$
Модульний 4-розрядний суматор ( $m = 4$ )	9	6	1228,8	31	4	15	
$m$ -розрядний інкрементний суматор	6	5	460,8	12	4	11	
$m + 1$ -розрядний мультиплексор парафазними керуючими входами	12	6	505,8	14	1	18	

Таким чином, системні характеристики запропонованого удосконаленого  $n$ -розрядного суматора з прискореними переносами з 4-розрядними модульними суматорами розраховуються згідно виразів:  
 $k_c = n \cdot k_{cMM} + (n - 1) \cdot (k_{cII} + k_{cM})$ ;  $A = n \cdot A_{MC} + (n - 1) \cdot (A_{IC} + A_M)$ ;  $\tau = n + 4$ ;  
 $F = n \cdot (2m + 1) + n + 1$ .

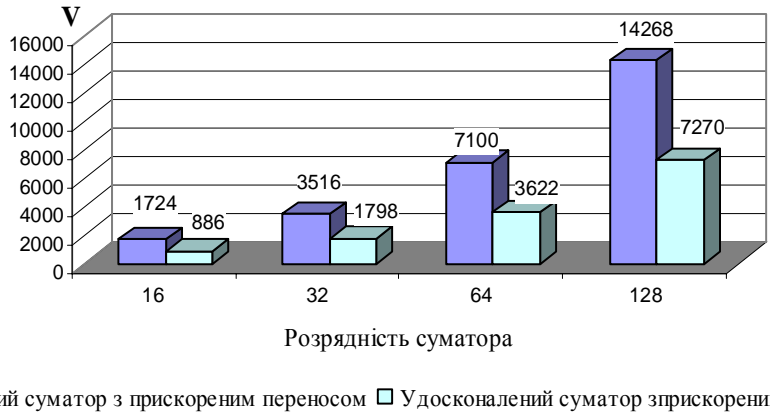
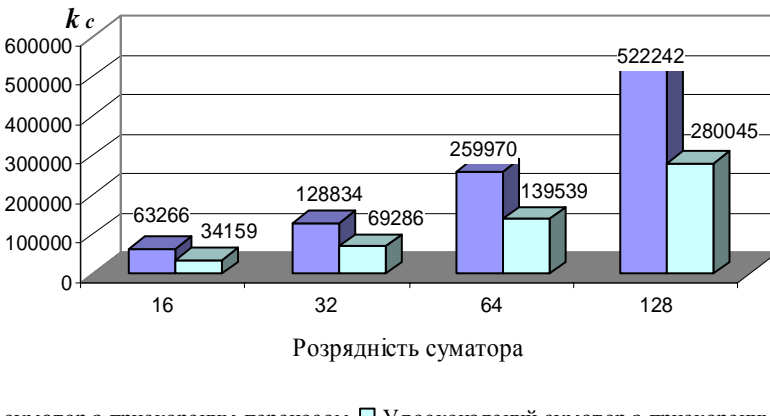
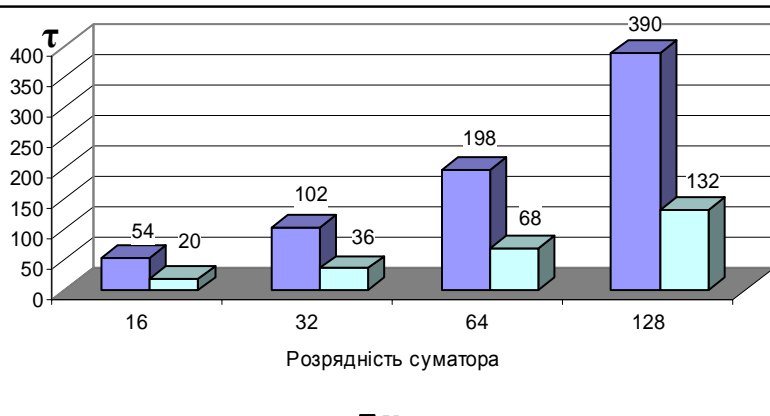
Таким чином загальна кількісна оцінка системних характеристик такого суматора при  $n = 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024$  наступна (табл.6.9).

Таблиця 6.9 - Кількісна оцінка системних характеристик багаторозрядного суматора з прискореним переносом при різній розрядності вихідних кодів

Характеристика	Розрядність вихідних кодів						
	16	32	64	128	256	512	1024
$k_c$	34159,8	69286,2	139539	280044,6	561055,8	1123078,2	2247123
$A$	886	1798	3622	7270	14566	29158	58342
$\tau$	20	36	68	132	260	516	1028
$F$	188	361	641	1281	2561	5121	10241

Порівняльні діаграми системних характеристик удосконаленого та відомого суматора з прискореним переносом приведені в таблиці 6.10.

Таблиця 6.10 - Порівняльні діаграми системних характеристик удосконаленого та відомого суматора з прискореним переносом.

Характеристика	Діаграма															
Апаратна складність	 <p>Bar chart showing hardware complexity (V) on the y-axis (0 to 16000) versus bit width (Розрядність суматора) on the x-axis (16, 32, 64, 128). The legend indicates two series: 'Відомий суматор з прискореним переносом' (blue bars) and 'Удосконалений суматор з прискореним переносом' (cyan bars). Data values are: 16-bit (1724 vs 886), 32-bit (3516 vs 1798), 64-bit (7100 vs 3622), 128-bit (14268 vs 7270).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Розрядність суматора</th> <th>Відомий суматор з прискореним переносом</th> <th>Удосконалений суматор з прискореним переносом</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>16</td> <td>1724</td> <td>886</td> </tr> <tr> <td>32</td> <td>3516</td> <td>1798</td> </tr> <tr> <td>64</td> <td>7100</td> <td>3622</td> </tr> <tr> <td>128</td> <td>14268</td> <td>7270</td> </tr> </tbody> </table>	Розрядність суматора	Відомий суматор з прискореним переносом	Удосконалений суматор з прискореним переносом	16	1724	886	32	3516	1798	64	7100	3622	128	14268	7270
Розрядність суматора	Відомий суматор з прискореним переносом	Удосконалений суматор з прискореним переносом														
16	1724	886														
32	3516	1798														
64	7100	3622														
128	14268	7270														
Структурна складність	 <p>Bar chart showing structural complexity (k c) on the y-axis (0 to 600000) versus bit width (Розрядність суматора) on the x-axis (16, 32, 64, 128). The legend indicates two series: 'Відомий суматор з прискореним переносом' (blue bars) and 'Удосконалений суматор з прискореним переносом' (cyan bars). Data values are: 16-bit (63266 vs 34159), 32-bit (128834 vs 69286), 64-bit (259970 vs 139539), 128-bit (522242 vs 280045).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Розрядність суматора</th> <th>Відомий суматор з прискореним переносом</th> <th>Удосконалений суматор з прискореним переносом</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>16</td> <td>63266</td> <td>34159</td> </tr> <tr> <td>32</td> <td>128834</td> <td>69286</td> </tr> <tr> <td>64</td> <td>259970</td> <td>139539</td> </tr> <tr> <td>128</td> <td>522242</td> <td>280045</td> </tr> </tbody> </table>	Розрядність суматора	Відомий суматор з прискореним переносом	Удосконалений суматор з прискореним переносом	16	63266	34159	32	128834	69286	64	259970	139539	128	522242	280045
Розрядність суматора	Відомий суматор з прискореним переносом	Удосконалений суматор з прискореним переносом														
16	63266	34159														
32	128834	69286														
64	259970	139539														
128	522242	280045														
Часова складність	 <p>Bar chart showing time complexity (tau) on the y-axis (0 to 400) versus bit width (Розрядність суматора) on the x-axis (16, 32, 64, 128). The legend indicates two series: 'Відомий суматор з прискореним переносом' (blue bars) and 'Удосконалений суматор з прискореним переносом' (cyan bars). Data values are: 16-bit (54 vs 20), 32-bit (102 vs 36), 64-bit (198 vs 68), 128-bit (390 vs 132).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Розрядність суматора</th> <th>Відомий суматор з прискореним переносом</th> <th>Удосконалений суматор з прискореним переносом</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>16</td> <td>54</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>32</td> <td>102</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td>64</td> <td>198</td> <td>68</td> </tr> <tr> <td>128</td> <td>390</td> <td>132</td> </tr> </tbody> </table>	Розрядність суматора	Відомий суматор з прискореним переносом	Удосконалений суматор з прискореним переносом	16	54	20	32	102	36	64	198	68	128	390	132
Розрядність суматора	Відомий суматор з прискореним переносом	Удосконалений суматор з прискореним переносом														
16	54	20														
32	102	36														
64	198	68														
128	390	132														

У результаті запропонованого структурного рішення схемотехнічної реалізації багаторозрядного двійкового суматора з прискореними переносами при  $n = 128$  отримано наступне покращення системних характеристик:

- структурна складність зменшена у  $\frac{522242}{280044,6} = 1,86$  разів;
- апаратна складність зменшена у  $\frac{14268}{7270} = 1,96$  разів;
- швидкодія підвищилася у  $\frac{390}{132} = 2,95$  рази.

6.3.4. Структура та системні характеристики пристрою визначення Хеммінгової віддалі у кодах базису Радемахера.

Визначення модульних різниць, їх квадратів та інтегральних оцінок, які представляють характеристики різних об'єктів широко застосовуються при побудові обчислювальних засобів систем розпізнавання образів [371-373]. В якості ідентифікованих образів можуть виступати різні структури об'єктів: відбитки пальців, обличчя людей, географічні об'єкти, алфавітно-цифрові символи, акустичні та відеосигнали та ін. Найвагомим критерієм таких систем є максимальне підвищення швидкодії реалізації визначення різницево-модульної, квадратичної та інтегральної функцій згідно лінійної та квадратичної Евклідової відстані [161, 201, 374].

Автором запропоновано пристрій визначення Хеммінгової віддалі (патент 127093) [192] між двома аналоговими сигналами, який реалізує визначення накопиченого усередненого значення суми модульних різниць оцифрованих аналогових сигналів, що відповідає оцінці Хеммінгової віддалі між ними згідно виразу:

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

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

Такий пристрій визначення Хеммінгової віддалі може бути використаний у якості компонента цифрових процесорів розпізнавання образів.

Удосконалення пристрою полягає в тому, що вхідні аналогові сигнали у 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 розрядно-позиційні коди Хаара, дешифруються у відповідні: прямий двійковий код більшого з них, та доповнюючий код меншого з них, які додаються у швидкодіючому багаторозрядному накопичувальному суматорі.

На рис.6.25 та рис.6.26 [192] представлена функціональна схема пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами, який містить компоненти та реалізує наступні обчислювальні операції: 1 – синхронізатор; 2, 4 – входи аналогових сигналів; 3 – перша група компараторів, які у кожному каналі з'єднані з входами логічних елементів "АБО" (8), виходи яких забезпечують формування на виходах  $y_i$  паралельного інверсного коду Хаара більшого з двох вхідних аналогових сигналів; 5 – друга група компараторів, з'єднаних у кожному каналі з входами логічних елементів "І" (9), які забезпечують формування на виходах  $x_i$  паралельного інверсного коду Хаара меншого з двох вхідних аналогових сигналів.

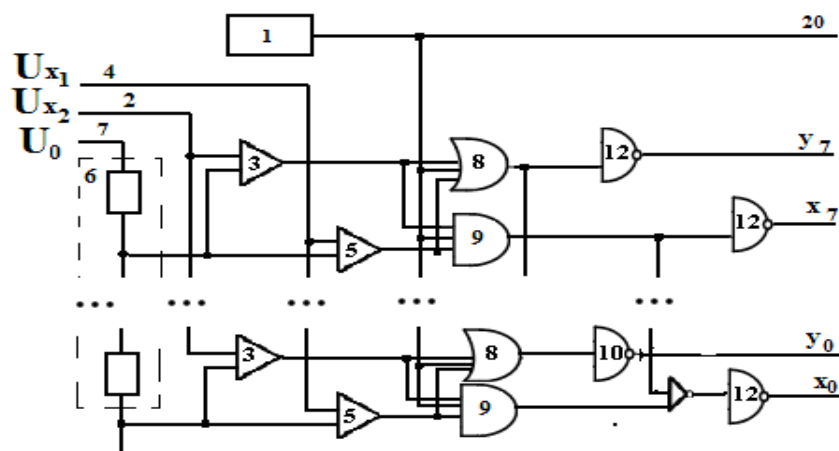


Рис.6.25 - Структурна схема пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами.

Отримані паралельні коди Хаара  $y$  та  $x$  дешифруються логічними елементами "І-НЕ" (14) у відповідний прямий паралельний двійковий код більшого з двох сигналів та інверсний код меншого з двох сигналів. У багаторозрядному двійковому суматорі (15), на один з входів якого подана логічна "1" (16) реалізується додавання прямого та доповнюючого коду

цифрових значень  $x_i$  та  $y_i$ , а сформований двійковий код модульної різниці на його виходах інтегрується у накопичуючому суматорі (17), виходами якого є паралельний двійковий код інтегральної оцінки Хеммінгової віддалі між сигналами.

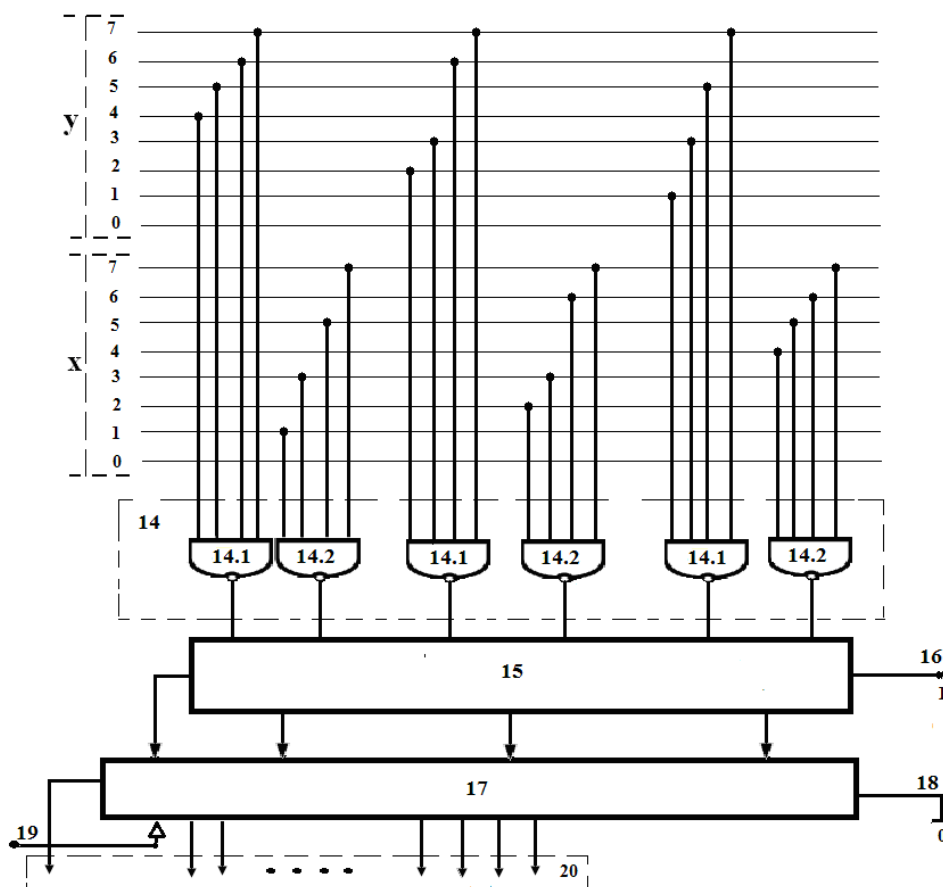


Рис.6.26 - Структурна схема пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами.

Принцип роботи пристрою визначення Хеммінгової віддалі у кодах базису Радемахера описаний у додатку М.

Розрахунок структурної складності такого пристрою відбувається з врахуванням наступних компонентів: АЦП ( $k_{сАЦ}$ ), логічного модуля ( $k_{сЛЛ}$ ), комбінаційного суматора ( $k_{сКΣ}$ ), структурна складність яких розраховується на основі схемотехнічної реалізації (рис.Н.11) [181], накопичуючого суматора ( $k_{сНΣ}$ ).

Загальна оцінка структурної складності такого пристрою визначається згідно виразу:

$$k_{c1} = k_{cAAЦ} + k_{cЛЛ} + k_{cKΣ} + k_{cHΣ}$$

де  $k_{cAAЦ} = 2^k \cdot k_{ci} = 2^k \cdot (k_{cR} + 2k_{cK} + k_{cAAB} + k_{cI} + 2k_{cI-HE1} + 2k_{cHH} + k_{cZ})$ ;  
 $k_{cЛЛ} = 2k \cdot k_{cI-HE2}$ ;  $k_{cKΣ} = k \cdot k_{cOΣ}$  ;  $k_{cHΣ} = 20 \cdot (k_{cOΣ} + k_{cT})$ ,

де  $k_{ci}$  - структурна складність  $i$ -го компонента АЦП,  $k_{cI-HE1}$  - структурна складність двовходового логічного елемента "I-HE",  $k_{cI-HE2}$  - структурна складність багатходового логічного елемента "I-HE",  $k_{cOΣ}$  - структурна складність однорозрядного суматора,  $k_{cT}$  - структурна складність тригера.

Таким чином, при  $k = 8$ ,  $n = 256$ :

$$k_{cAAЦ} = 2^k \cdot k_{ci} = 2^8 \cdot (15 + 2 \cdot 13,6 + 11,6 + 11,2 + 2 \cdot 14,4 + 2 \cdot 11,6 + 28) =$$

$$= 256 \cdot (15 + 27,2 + 11,6 + 11,2 + 28,8 + 23,2 + 28) = 37120,$$

$$k_{cЛЛ} = 2k \cdot k_{cI-HE2} = 2 \cdot 8 \cdot 28 = 448,$$

$$k_{cKΣ} = k \cdot k_{cOΣ} = 8 \cdot 756 = 6048,$$

$$k_{cHΣ} = 20 \cdot (k_{cOΣ} + k_{cT}) = 20 \cdot (756 + 40) = 15920.$$

Отже,  $k_{c1} = k_{cAAЦ} + k_{cKΣ} + k_{cHΣ} = 37120 + 448 + 6048 + 15920 = 59536$ .

Отже, при  $k = 8$  отримаємо:  $\tau_1 = 2 + 4 \cdot 1 + 8 \cdot 2 + 2 \cdot 8 \cdot 4 = 86 \nu$  (мікротактів).

Така затримка сигналів досягається внаслідок застосування структур однорозрядних повних суматорів з гранично мінімальною затримкою сигналів переносів 1 мікротакт (рис.Н.9, Н.11).

Запропонована структура пристрою дозволила реалізувати визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами з затримкою сигналів 86 мікротактів, представлених 8-ми бітними двійковими кодами та об'ємом вибірки 256. У порівнянні з багатоканальним пристроєм визначення модульної кореляційної функції [374], запропонований пристрій дозволяє підвищити швидкодію у 14 разів та зменшити структурну складність на 1-2 порядки.

Функціональним обмеженням такого пристрою відсутність можливості визначення Хеммінгової віддалі згідно квадратичної Евклідової відстані.

## 6.4. Багаторозрядні перемножувачі у різних ТЧБ.

### 6.4.1. Перемножувач унітарних кодів у базисі Хаара-Крестенсона.

Перемножувачі унітарних кодів широко застосовуються для паралельного цифрового опрацювання кодів RGB-пікселів відеокамер [366-368]. У стандартних відеокамерах у залежності від їх призначення загальна кількість реєстрованих RGB-пікселів може складати  $2^{20} - 2^{30}$ , наприклад кольорове зображення -  $512 \times 512$  ( $8 + 8 + 8 = 24$ ) біт/піксель; CCIR TV -  $720 \times 576 \times 30$  ( $8 + 8 + 8 = 24$ ) біт/піксель; HDTV -  $1280 \times 720 \times 60$  ( $8 + 8 + 8 = 24$ ) біт/піксель [369]. Тому зменшення структурної складності та підвищення швидкодії таких компонентів цифрових відеозасобів є актуальною проблемою.

Недоліком відомого перемножувача [370] є низька швидкодія, яка обумовлена тим, що даний пристрій містить двійковий лічильник та двійковий накопичуючий суматор, при чому, швидкодіюча реалізація двійкового синхронного лічильника з вхідними логічними елементами прискорення переносів та реалізація накопичувача на основі повних однорозрядних двійкових суматорів, які містять від 4 до 6 послідовно включених логічних елементів, характеризується низькою швидкодією та значною структурною складністю, що обмежує можливість реалізації їх великої кількості у мікроелектронному кристалі матриці пікселів цифрової відеокамери [366-368].

Автором запропоноване удосконалення структури унітарного перемножувача [179] (Патент 107811), який здійснює операції перемноження у базисі Хаара-Крестенсона та дозволяє на 1 порядок підвищити його швидкодію у порівнянні з відомим пристроєм, а також забезпечити більш високу регулярність структури за рахунок застосування матрично-модульних компонентів на елементах "I-HE".

На рис.6.27 [179] показана удосконалена структурна схема пристрою, де 1, 3 –вхідні шини унітарних кодів; 2, 4 –модульні лічильники Джонсона на D-тригерах; 5 –матриці модульного перемноження; 6 – шифратор, який перетворює коди Хаара-Крестенсона у двійкові коди базису Радемахера.



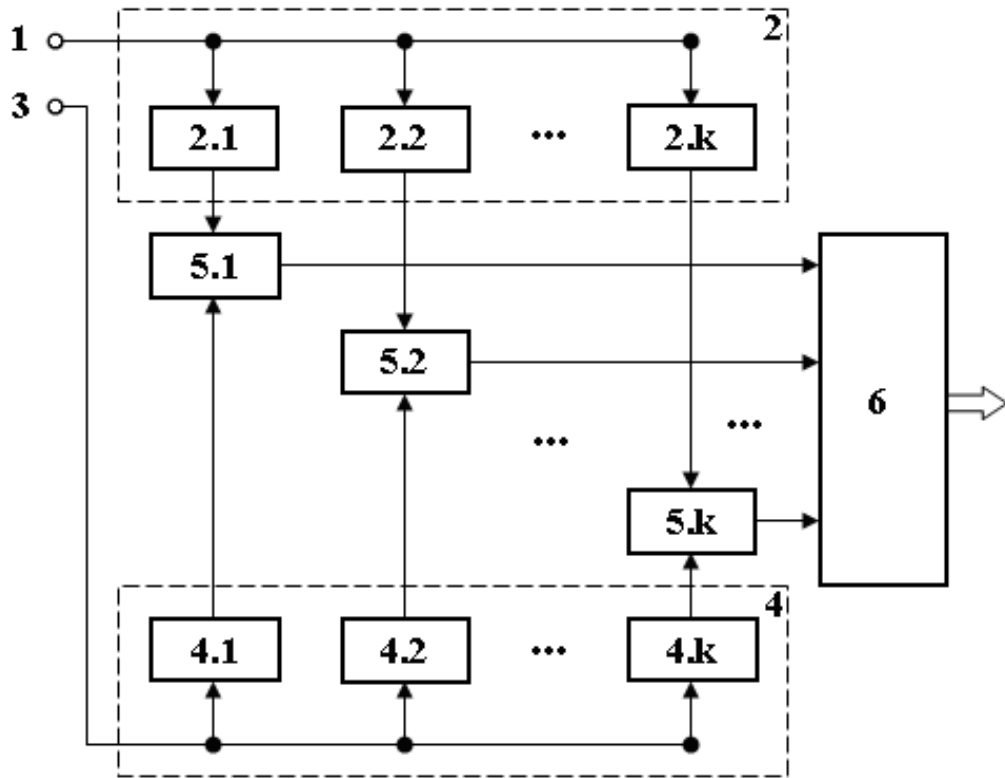


Рис.6.27– Структурна схема числоімпульсного множильного пристрою у базисі Хаара-Крестенсона.

Принцип роботи перемножувача унітарних кодів у базисі Хаара-Крестенсона приведено в додатку М.

На рис.6.28 [179] (Патент 107811) показана структурна схема та приклад реалізації матриці модульного перемноження при  $P = 7$  у базисі Хаара-Крестенсона.

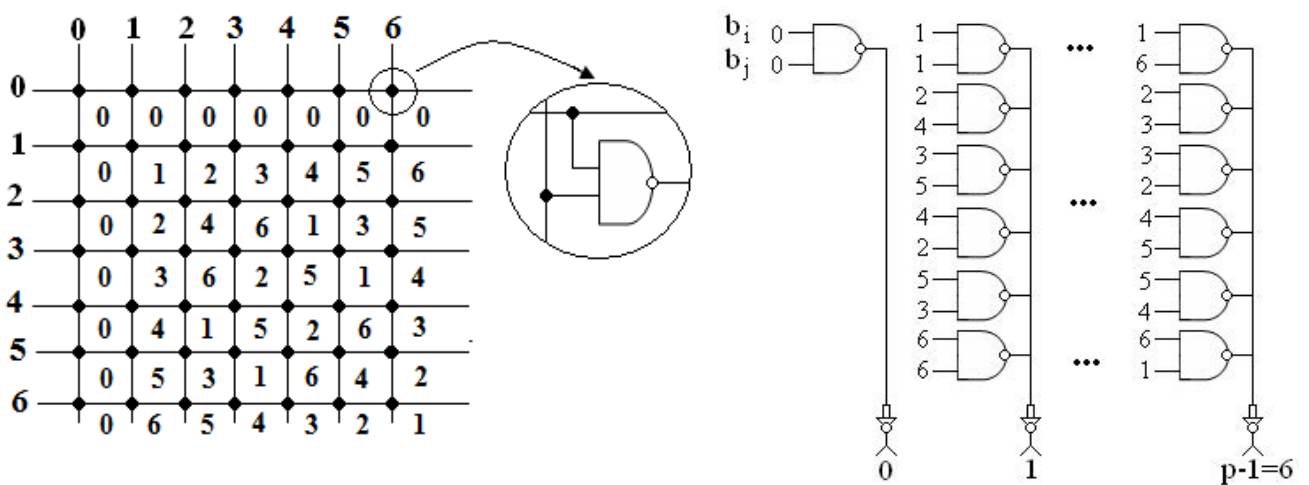


Рис.6.28 - Структурна схема та приклад реалізації матриці модульного перемноження

Структурна складність множильного пристрою визначається сумарною оцінкою складностей лічильника на D-тригерах ( $k_{cЛ}$ ), матриці модульного множення ( $k_{cМП}$ ) та шифратора ( $k_{cШ}$ ) згідно виразу:

$$k_c = k \cdot (2k \cdot k_{cЛ} + k_{cМП}) + k_{cШ}.$$

При  $k = 8$  та наборі модулів:  $P_1 = 5$ ,  $P_2 = 7$ ,  $P_3 = 8$  структурна складність компонентів становитиме:

$$k_{cЛ} = (2 \cdot \sum_{i=1}^k (P_1 + P_2 + \dots + P_k)) \cdot k_{cТ} = 2 \cdot (5 + 7 + 8) \cdot 30 = 1200;$$

$$k_{cМП} = k \cdot (P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_k^2) \cdot k_{cЛ-HE} + \sum_{i=1}^k (P_1 + P_2 + \dots + P_k) \cdot k_{cHH} =$$

$$= 8 \cdot (5 + 7 + 8) \cdot 14,4 + (5 + 7 + 8) \cdot 14,8 = 2304 + 296 = 2600$$

$$k_{cШ} = 2^k (4 \div 5) + 2^k (\sum_{i=1}^n P_i) = 2^8 \cdot (4 \div 5) + 2^8 \cdot (5 + 7 + 8) = 256 \cdot (4 \div 5) + 256 \cdot 20 =$$

$$= 1024 \div 1280 + 5120 = 6144 \div 6400.$$

Таким чином сумарна оцінка структурної складності множильного пристрою становить:

$$k_c = 8 \cdot (2 \cdot 8 \cdot 1200 + 2600) + 6144 = 180544 \text{ одиниць.}$$

Розрахунок системи взаємнопростих модулів  $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k$  для числоімпульсного множильного пристрою при  $k = 8$  виконується виходячи з умови, що добуток модулів  $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k$  повинен перевищувати числове значення  $2^{16}$ . Цій умові відповідає наступний набір модулів системи залишкових класів базису Крестенсона  $P_1 = 7$ ,  $P_2 = 8$ ,  $P_3 = 9$ ,  $P_4 = 11$ ,  $P_5 = 13$ ;  $7 \cdot 8 \cdot 9 \cdot 11 \cdot 13 = 72072 > 2^{16} = 65536$ . Таким чином на виходах матричних модульних перемножувачів, після завершення процесу множення, формується код Хаара-Крестенсона  $d_1, d_2, \dots, d_5$ , який дешифрується у 16-розрядний двійковий код базису Радемахера.

Приклад: Нехай перемножуються числа  $X = 100$ ,  $Y = 200$ ;  $X \cdot Y = 20000$ .

Числа  $X$  та  $Y$  представляються у базисі Хаара-Крестенсона наступним кодом:

$$\begin{array}{l}
 X=100 \begin{cases}
 \text{res } 100(\text{mod } 7)=a_1=2 = 0010000 \\
 \text{res } 100(\text{mod } 8)=a_2=4 = 00001000 \\
 \text{res } 100(\text{mod } 9)=a_3=1 = 010000000 \\
 \text{res } 100(\text{mod } 11)=a_4=1=01000000000 \\
 \text{res } 100(\text{mod } 13)=a_5=9=0000000001000
 \end{cases}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 Y=200 \begin{cases}
 \text{res } 200(\text{mod } 7)=b_1=4 = 0000100 \\
 \text{res } 200(\text{mod } 8)=b_2=0 = 00000000 \\
 \text{res } 200(\text{mod } 9)=b_3=2 = 001000000 \\
 \text{res } 200(\text{mod } 11)=b_4=2=00100000000 \\
 \text{res } 200(\text{mod } 13)=b_5=5=0000010000000
 \end{cases}
 \end{array}$$

Сформовані таким чином коди поступають на входи  $i$ -тих матричних модульних перемножувачів, на виходах яких формується код Хаара-Крестенсона результатів перемноження  $d_1, d_2, \dots, d_k$  згідно виразу:  $(a_i \cdot b_i) \text{ mod } P_i = d_i$ .

$$\begin{array}{r}
 P_i \quad 7 \quad 8 \quad 9 \quad 11 \quad 13 \\
 a_i = \quad (2 \quad 4 \quad 1 \quad 1 \quad 9) \\
 b_i = \quad (4 \quad 0 \quad 2 \quad 2 \quad 5) \\
 \hline
 d_i = \quad (1 \quad 0 \quad 2 \quad 2 \quad 6),
 \end{array}$$

що відповідає дешифрованому значенню 20000 у двійковій системі числення базису Радемахера 100111000100000.

$$\begin{array}{l}
 d=20000 \begin{cases}
 \text{res } 20000(\text{mod } 7)=a_1 = 1 \\
 \text{res } 20000(\text{mod } 8)=a_2 = 0 \\
 \text{res } 20000(\text{mod } 9)=a_3 = 2 \\
 \text{res } 20000(\text{mod } 11)=a_4=2 \\
 \text{res } 20000(\text{mod } 13)=a_5=6
 \end{cases}
 \end{array}$$

З метою спрощення структури шифратора (6), його слід реалізувати по двокаскадній схемі: в першому каскаді коди Хаара-Крестенсона по кожному модулю перетворюються в двійкові коди Радемахера, які в другому каскаді перетворюються в позиційний код двійкової системи числення. Тобто 48-мибітний код Хаара-Крестенсона дешифрується у 18-тибітний код Радемахера-Крестенсона та 16-тибітний код Радемахера. При цьому в шифраторі (6) затримка сигналів складає  $4\nu$  і загальна швидкодія пристрою складає  $6 + 2 = 8\nu$ .

Перемножувач унітарних кодів у базисі Хаара-Крестенсона характеризується підвищеною на 1 порядок швидкодією по відношенню до відомого пристрою, а також більш високою регулярністю структури за рахунок реалізації модульних лічильників на регістрах зсуву, та матричних модульних перемножувачів на елементах "I-HE".

6.4.2. Структура та системні характеристики швидкодіючого різницево-модульного квадратора у кодах Хаара-Крестенсона.

Реалізація процесора визначення Хеммінгової віддалі згідно квадратичної Евклідової відстані потребує застосування операції піднесення до квадрату кодів модульних різниць аналогових сигналів, що потребує застосування матричних перемножувачів та приводить до суттєвого зниження швидкодії, зростання апаратної та структурної складності такого класу процесорів у базисі Радемахера. Тому автором запропонована структурна схема різницево-модульного квадратора [180, 375], який є компонентом пристрою визначення Хеммінгової віддалі і реалізується у кодах базису Хаара-Крестенсона.

Такий різницево-модульний квадратор застосовується в якості швидкодіючого компонента при вирішенні задач статистичного аналізу та реалізації високопродуктивних компонентів спецпроцесорів визначення Хеммінгової віддалі згідно квадратичної оцінки Евклідової відстані  $Z = (x_i - y_i)^2$ .

Структура високопродуктивного спецпроцесора, яка запропонована автором, містить 2 АЦП паралельного типу з вихідними кодами у базисі Хаара-Крестенсона, реалізована шляхом застосування модульної арифметики СЗК та кодових матриць Хаара-Крестенсона (рис.6.29) [180, 375].

Різницево-модульний квадратор (рис.6.29) містить: АЦП паралельного типу (1) з відповідними вихідними кодами Хаара-Крестенсона  $x_i$  та  $y_i$  ( $x_i = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_k)$ ,  $y_i = (b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_k)$ ;  $a_i = \text{res}x_i(\text{mod } P_i)$ ,  $b_i = \text{res}y_i(\text{mod } P_i)$ ;  $i \in \overline{1, k}$ ,  $k$  - кількість модулів кодів Хаара-Крестенсона), шину синхронізації  $S_x$  (2), яка формує сигнали запису кодів  $x_i$  та  $y_i$  у регістрі

пам'яті на D-тригерах (3), матриці визначення модульних різниць по кожному  $P_i$  модулю (4), модульні квадратори у базисі Хаара-Крестенсона (5), вихідну шину (6).

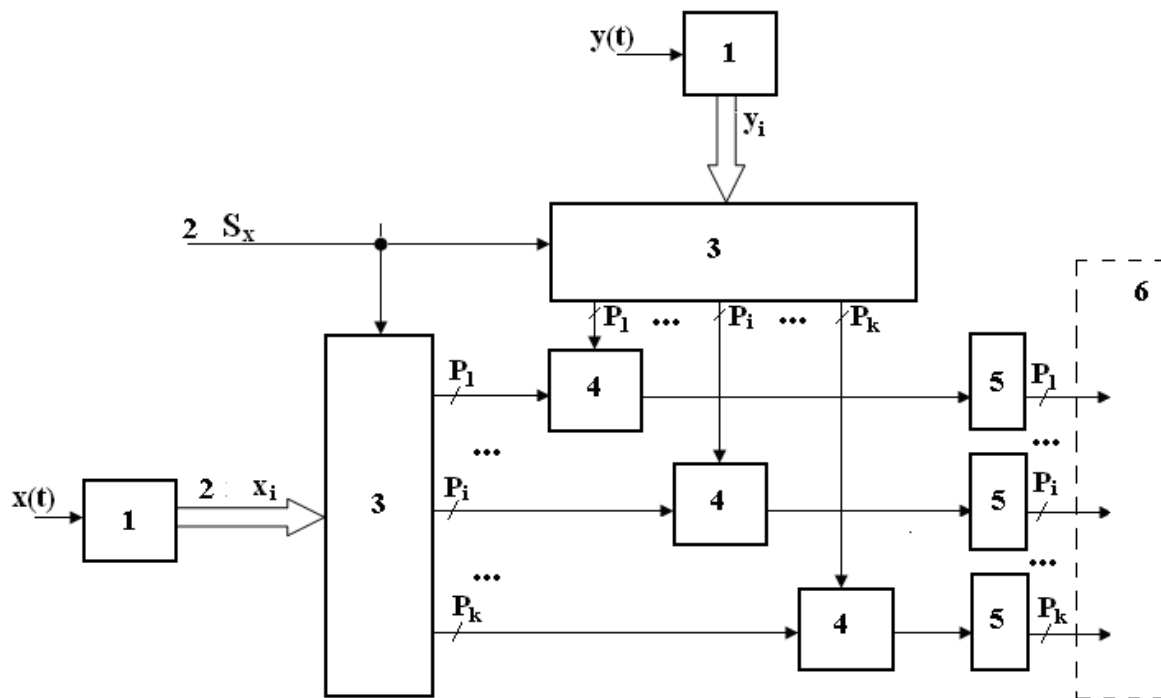


Рис.6.29- Структурна схема різницево-модульного квадратора.

Принцип роботи швидкодіючого різницево-модульного квадратора у кодах Хаара-Крестенсона приведено у додатку М

На рис.6.30 показаний приклад реалізації та структура з'єднання вентилів входів та виходів різницево-модульної матриці на логічних елементах "І-НЕ" ( $P=7$ ).

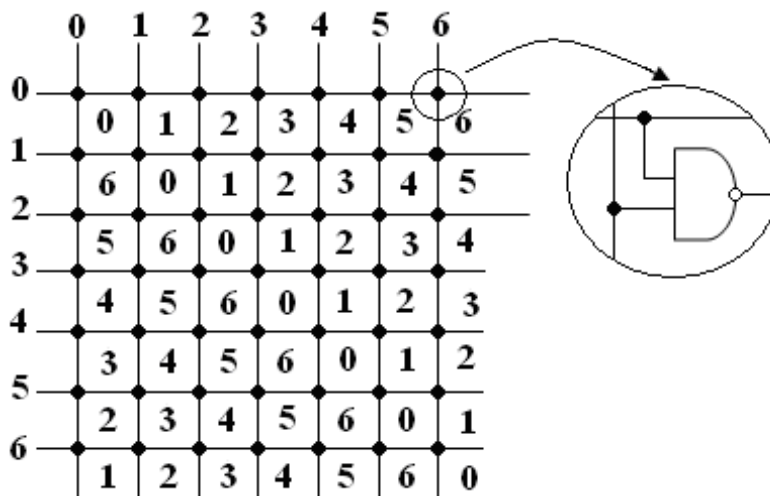


Рис.6.30- Різницево-модульна матриця на елементах "І-НЕ".

На рис.6.31 показана структурна реалізація формування коду квадрату модульної різниці  $((a_i - b_i)^2 \bmod P_i)$  у базисі Хаара-Крестенсона на логічних елементах "І-НЕ" ( $P = 7$ ).

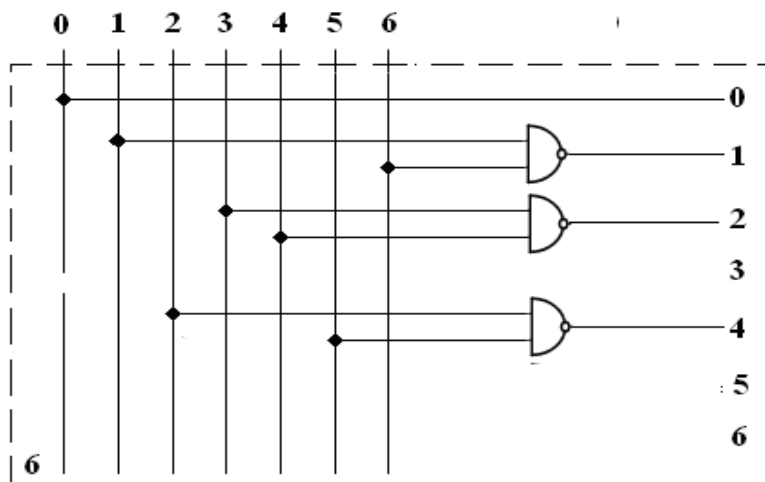


Рис.6.31 - Реалізації формування коду квадрату модульної різниці  $((a_i - b_i)^2 \bmod P_i)$  у базисі Хаара-Крестенсона.

Згідно з властивостями системи числення залишкових класів для однозначного представлення квадрату різниці двох чисел  $(x_i - y_i)^2$  повинна виконуватися умова: добуток  $P_0$  взаємнопростих 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 кількості модулів  $P_i$ ,  $k = 4$  і максимальних значеннях квадратів  $N$ , розрахунки для різних  $N$  показано в таблиці 6.11.

Особливістю роботи пристрою є незалежність формування прямого коду квадрату на виходах модулів квадраторів (5), незалежно від того прями чи інвертовані коди по модулю формуються на виходах різницево-модульних матриць (4).

Таблиця 6.11 – Приклад максимальних значень квадратів  $N$ .

		$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$n$	$N^2$	$P_0$
N	15	2	3	5	11	9	225	330
n	4	1	2	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			

Наприклад: необхідно визначити квадрат різниці між двома числами, які можуть бути представлені у діапазоні:  $0 \leq x_i \leq 127$ ,  $0 \leq y_i \leq 127$ , максимальне значення квадрату їх різниць рівне  $127^2 = 16129$ .

Представимо за дані числа  $x_i = 101$ ,  $y_i = 65$ , у базисах Радемахера-Крестенсона (R-C) та Хаара-Крестенсона (H-C) у системі числення залишкових класів з набором модулів:  $P_1 = 4$ ,  $P_2 = 5$ ,  $P_3 = 7$ ,  $P_4 = 9$ ,  $P_5 = 13$ . Добуток модулів рівний  $4 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 13 = 16380 > 16129$ . У кодах Радемахера-Крестенсона задані числа становитимуть:  $x_i = 101_{10} = (1 \ 1 \ 3 \ 2 \ 10)_{(4,5,7,9,13)}$ ,  $y_i = 65_{10} = (1 \ 0 \ 2 \ 2 \ 0)_{(4,5,7,9,13)}$ . Виконаємо віднімання заданих чисел в системі залишкових класів і піднесення до квадрату отриманих різниць:

$P_i$	4	5	7	9	13		$P_i$	4	5	7	9	13
$x_i$	1	1	3	2	10		$y_i$	1	0	2	2	0
$y_i$	1	0	2	2	0		$x_i$	1	1	3	2	10
$x_i - y_i$	0	1	1	0	10		$y_i - x_i$	0	4	6	0	3
	0	1	1	0	10			0	4	6	0	3
$ x_i - y_i ^2$	0	1	1	0	9		$ y_i - x_i ^2$	0	1	1	0	9

Тобто отримані результати кодів квадратів, які рівні між собою. В кодах Хаара-Крестенсона по кожному модулю  $P_i$  дані операції виконуються на різницево-модульних матрицях (4) та логічних модулях квадраторів (5). У

результаті отримується наступний код Хаара-Крестенсона: 01109, що рівне числу 1296.

Така властивість квадратів кодів Хаара-Крестенсона дозволяє спростити реалізацію двох послідовно з'єднаних компонентів спецпроцесора Хаара-Крестенсона шляхом безпосереднього використання вихідних прямих та доповнюючих кодів різницево-модульних матриць (4) та заміни логічних елементів "АБО" відповідними логічними елементами "І-НЕ" на основі модульних квадраторів (5).

Загальна затримка сигналів у розробленому спецпроцесорі визначення квадратів модульних різниць між двома вхідними аналоговими сигналами, незалежно від розрядності вхідних чисел, складає 8 мікротактів.

Структурна складність розробленого спецпроцесора розраховується згідно виразу:

$$k_{c2} = k_{cAAЦ} + 2 \cdot k_{cP} + k \cdot k_{cM} + k \cdot k_{cK},$$

$$\text{де } k_{cAAЦ} = 2^k \cdot (k_{cK} + k_{cI-HE1}) + \sum_{i=1}^k (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \cdot k_{cI-HE1},$$

$$k_{cP} = \sum_{i=1}^k P_i \cdot k_{cT}; \quad k_{cM} = \sum_{i=1}^k (P_i)^2 \cdot k_{cI-HE}; \quad k_{cK} = \sum_{i=1}^k \frac{P_i}{2} \cdot k_{cI-HE},$$

де  $k_{cP}$  - структурна складність регістра на D-тригерах;  $k_{cM}$  - структурна складність різницево-модульної матриці;  $k_{\hat{n}\hat{E}}$  - структурна складність модулів квадраторів.

Таким чином, при  $k = 8$ , де

$$\begin{aligned} k_{cAAЦ} &= 2^k \cdot (k_{cK} + k_{cI-HE1}) + \sum_{i=1}^k (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \cdot k_{cI-HE1} = \\ &= 2^8 \cdot (144 + 14,4) + (5 + 7 + 8) \cdot 14,4 = 40838; \end{aligned}$$

$$k_{cP} = \sum_{i=1}^k P_i \cdot k_{cT} = (5 + 7 + 8) \cdot 30 = 600;$$

$$k_{cM} = \sum_{i=1}^k (P_i)^2 \cdot k_{cI-HE} = (5 + 7 + 8)^2 \cdot 14,4 = 5760;$$



$$k_{cK} = \sum_{i=1}^k \frac{P_i}{2} \cdot k_{cI-HE} = \frac{5+7+8}{2} \cdot 14,4 = 144.$$

Отже,

$$k_{c2} = k_{cAAЦ} + 2 \cdot k_{cP} + k \cdot k_{cM} + k \cdot k_{cK} = 40838 + 2 \cdot 600 + 8 \cdot 5760 + 8 \cdot 144 = 89270.$$

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

Запропонована структура різницево-модульного квадратора, у порівнянні з відповідним компонентом у пристрої визначення Хеммінгової віддалі [192, 201], дозволила підвищити швидкодію обчислень модульних різниць квадратів більше, ніж на 1 порядок (додаток М).

При діапазоні кодування вхідних чисел  $N = 255$ , що відповідає кількості рівнів квантування окремих кольорів RGB-пікселів, запропонований пристрій дозволяє реалізувати визначення Хеммінгової віддалі між пікселями кожного з кольорів зображень. При накопиченні кодів отриманих окремих різницевих квадратів, згідно матриці пікселів відео зображення, реалізується можливість розпізнавання двох зображень на основі інтегральної оцінки Хеммінгової віддалі у квадратичному Евклідовому просторі.

#### 6.4.3. Матричний перемножувач.

Відомий матричний перемножувач Брауна з горизонтальним та вертикальним розповсюдженням переносу [43, 389] (рис.6.32). Біти часткових добутків виду  $(a_i \cdot b_j)$  формуються за допомогою елементів "І". Для сумування часткових добутків застосовуються два види однорозрядних суматорів із збереженням переносу: напівсуматори (НС) і повні суматори (СМ).

При застосуванні класичних схем неповного та повного однорозрядних двійкових суматорів час затримки вихідного переносу неповного суматора складає 1 мікротакт, а повного 2-5 мікротактів, а час формування суми складає 3 мікротакти для неповного суматора і 6 мікротактів для повного суматора [377].

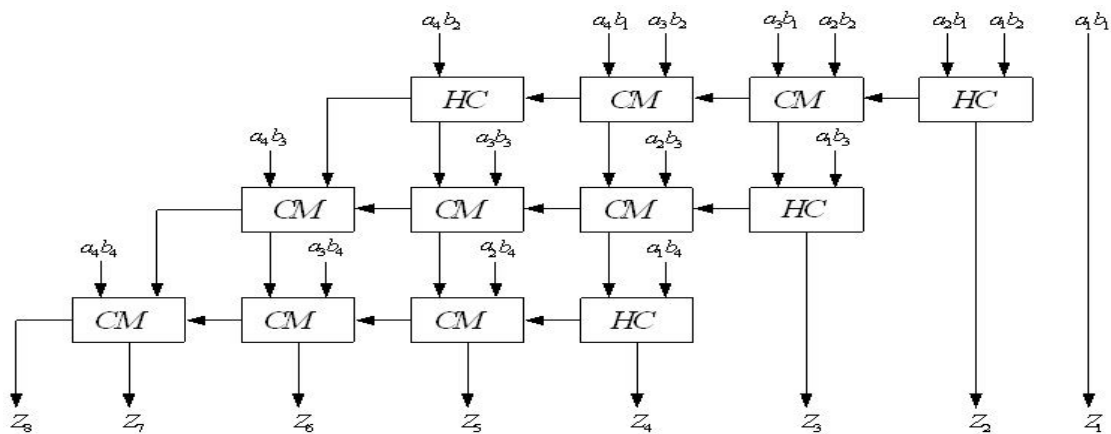


Рис.6.32 - Структура матричного перемножувача Брауна 4x4 з горизонтальним розповсюдженням переносу.

Оцінка часової складності матричного перемножувача (рис.6.32) розраховується з врахуванням горизонтальних затримок сигналів наскрізних переносів та вертикальних затримок сигналів при формуванні бітів суми. Тобто системні характеристики часової складності відомих однорозрядних двійкових суматорів (рис.Н.12) з горизонтальними (+) і вертикальними (s) інформаційними зв'язками відповідно складають:

$$\tau_{МП} = 2\tau_{НС} + (3n - 6) \cdot \tau_{ПС} = 2 \cdot 3 + (3 \cdot 4 - 6) \cdot 6 = 42 \nu.$$

Оцінка апаратної складності матричного перемножувача (рис.6.32) розраховується з врахуванням кількості логічних елементів, які містять однорозрядні двійкові суматори, становить:

$$A_{МП} = n \cdot A_{НС} + (n^2 - 2n) \cdot A_{ПС} = 4 \cdot 5 + (4^2 - 2 \cdot 4) \cdot 11 = 108 V.$$

Оцінка структурної складності матричного перемножувача (рис.6.32) становить  $S_{МП} = 1026$  одиниць.

Недоліком матричного перемножувача Брауна є обмежені функціональні можливості та низька швидкодія, яка обумовлена тим, що базовий компонент матриці однорозрядних суматорів не містить парафазних входів та виходів, що потребує не менше 2 ÷ 3 мікротакти часової затримки сигналів переносів і не дозволяє, у принципі, реалізувати відповідні вертикальні та горизонтальні переноси між виходами та входами однорозрядних суматорів з часовою затримкою 1 мікротакт.

Запропонована у [377] структура матричного перемножувача багаторозрядних двійкових чисел на основі парафазних однорозрядних суматорів, представлена на рис.6.33.

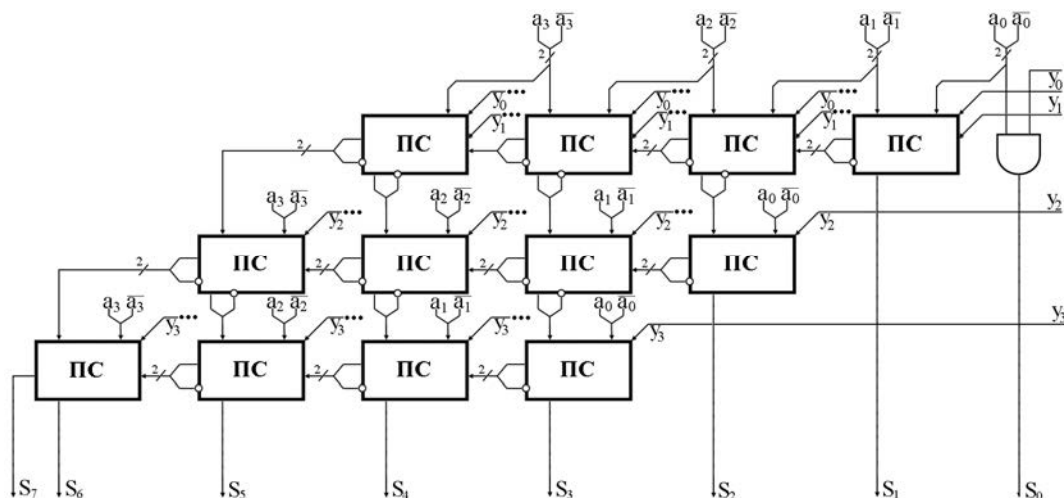


Рис.6.33 - Структура матричного перемножувача на основі комутованих парафазних однорозрядних суматорів.

Дана структура матричного перемножувача містить матрицю однорозрядних повних суматорів з парафазними входами та виходами, що дозволило реалізувати інформаційні переноси між суматорами з гранично мінімальною затримкою сигналів на 1 мікротакт, а крім того підвищити регулярність структури матриці суматорів, що спрощує проектування та нарощення розрядності утилітів таких багаторозрядних пристроїв на реконфігурованих програмних кристалах ПЛІС.

Недоліком такого матричного перемножувача є велика структурна складність, яка обумовлена тим, що матриця однорозрядних суматорів пристрою містить структурно складні повні однорозрядні суматори з парафазними входами та виходами [181], що приводить до значної кількості інформаційних зв'язків між утилітами мікроелектронного кристала матричного перемножувача.

Іншим недоліком такого перемножувача є застосування у його структурі апаратно складних повних однорозрядних суматорів з парафазними входами та виходами, які містять 20 – логічних елементів [181].

Крім того, недоліком такого матричного перемножувача є обмежені функціональні можливості, які обумовлені тим, що його структура не містить вхідного та вихідного регістрів пам'яті, що не дозволяє використовувати його у якості компонента розпаралеленого синхронізованого формування та зчитування цифрових добутоків двійкових чисел, наприклад, у цифрових кореляторах, цифрових фільтрах та процесорах шифрування даних з глибоким розпаралеленням обчислювальних операцій.

Матричний перемножувач (рис.6.34) [376], який характеризується розширеними функціональними можливостями шляхом введення вхідного та вихідного регістрів пам'яті, містить вхідну шину двійкових кодів перемножуваних чисел  $X$  та  $Y$  (1), вхідний регістр пам'яті на D-тригерах з парафазними виходами (2), перемножувальну матрицю на основі однорозрядних повних двійкових суматорів з парафазними входами та виходами (4), вихідний регістр пам'яті з парафазними виходами добутоків перемножуваних чисел (5) та входи синхронізації запису даних (3, 6) у регістри пам'яті.

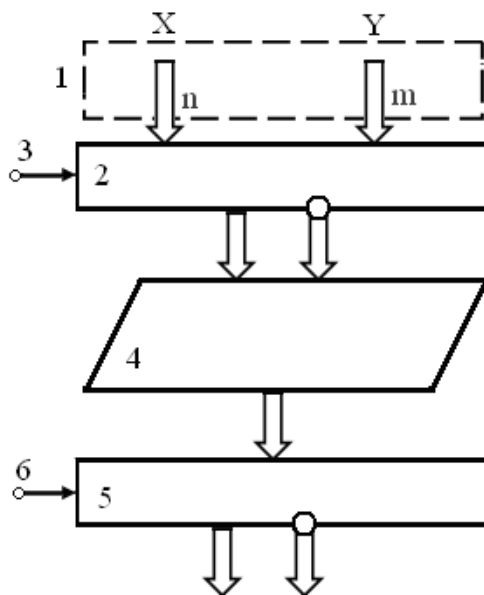


Рис.6.34 – Структурна схема матричного перемножувача.

Зменшення структурної та апаратної складності, розширення функціональних можливостей матричних перемножувачів без зменшення швидкодії здійснено у запропонованому матричному перемножувачі шляхом

застосування у матриці суматорів пристрою однорозрядних неповних та повних суматорів з прямими входами та виходами сум та інверсними виходами наскрізних переносів.

На рис.6.35 показана структурна схема запропонованого удосконаленого матричного перемножувача, який містить 1 – вхідну шину двійкових кодів перемножуваних чисел; 2 - перший регістр пам'яті; 3 - перший синхронізуючий вхід пристрою; 4 – матрицю однорозрядних суматорів на основі удосконаленого однорозрядного неповного суматора (рис.6.37а), однорозрядного повного суматора з прямим входом та інверсним виходом переносів (рис. 6.37б), повного однорозрядного суматора з інверсними входами та виходом переносу (рис. 6.37в) (Патент 124563) [175], повного однорозрядного суматора з інверсним входом переносу та прямим виходом переносу (рис. 6.37г); 5 – другий регістр пам'яті; 6 – другий синхронізуючий вхід пристрою.

Принцип роботи матричного перемножувача приведено в додатку М

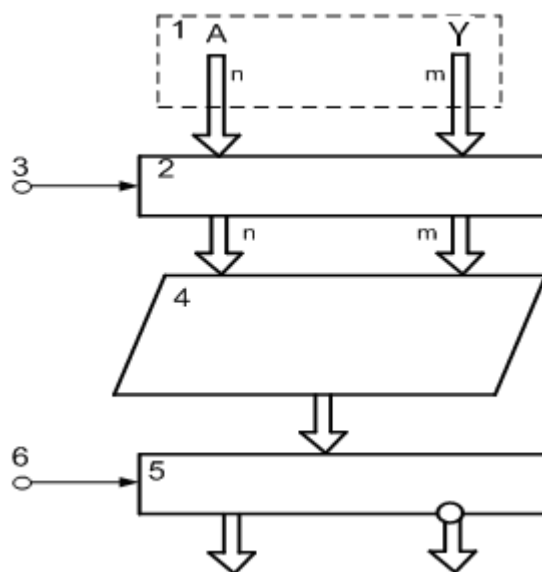


Рис.6.35 - Структурна схема запропонованого матричного перемножувача.

На рис.6.36 приведена структурна схема матриці суматорів пристрою.

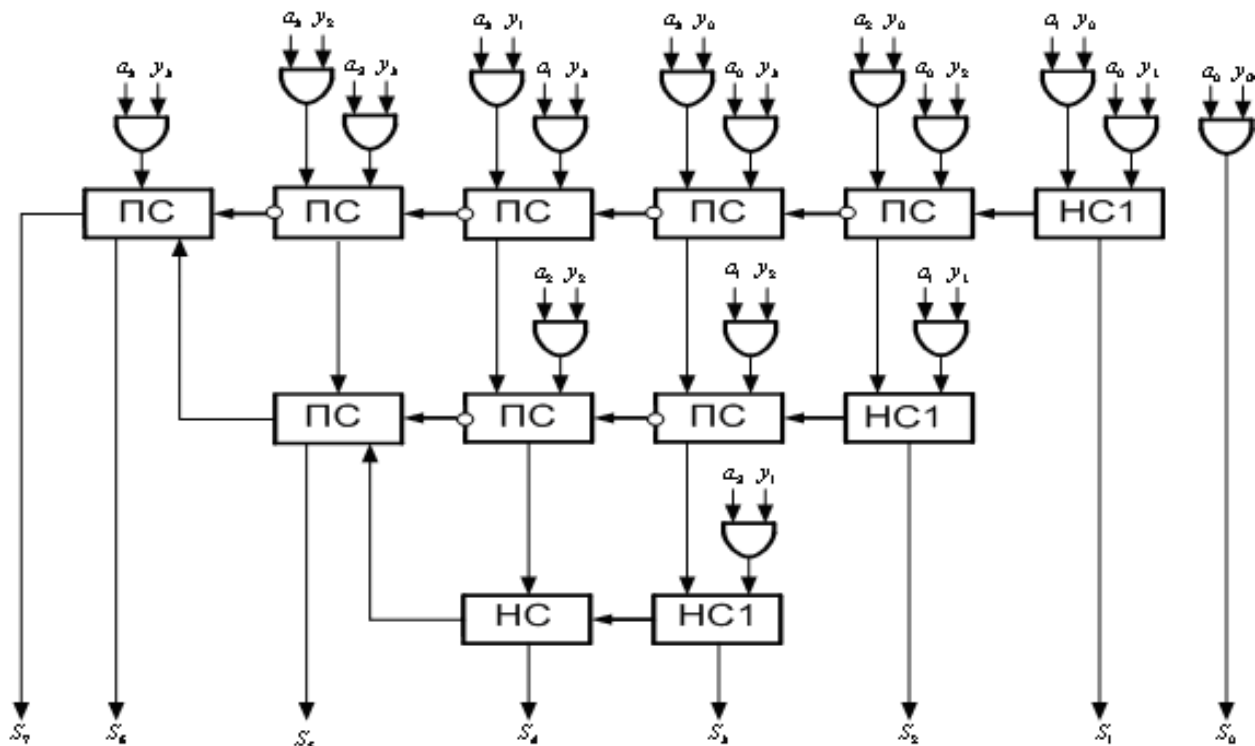
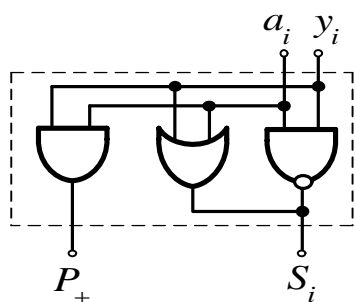
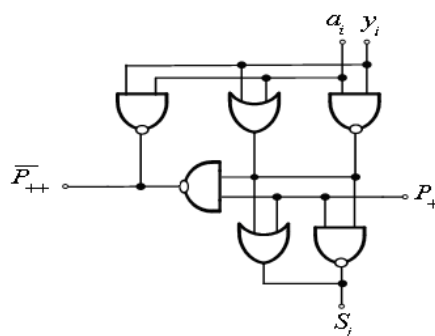


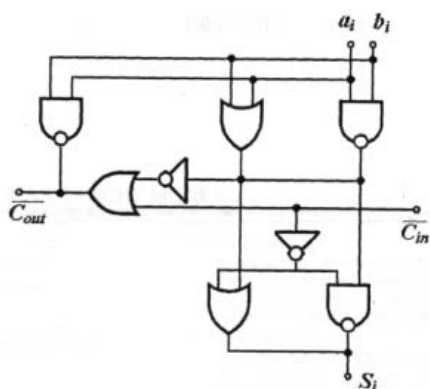
Рис.6.36 - Структурна схема матриці суматорів.



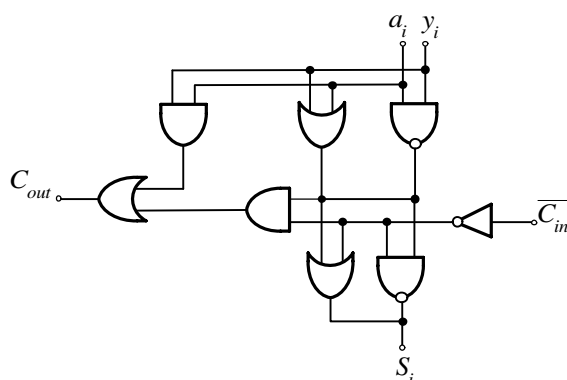
а) Неповний однорозрядний суматор з прямими входами і виходами



б) Повний однорозрядний суматор з прямими входами та інверсним виходом



в) Повний однорозрядний суматор з інверсними входами та виходом переносу



г) Повний однорозрядний суматор з інверсним входом переносу та прямим виходом переносу

Рис.6.37 – Компоненти перемножуваної матриці.

На рис.6.38 показано граф формування пар бітів  $a_{ij}$  на входах логічних елементів "І".

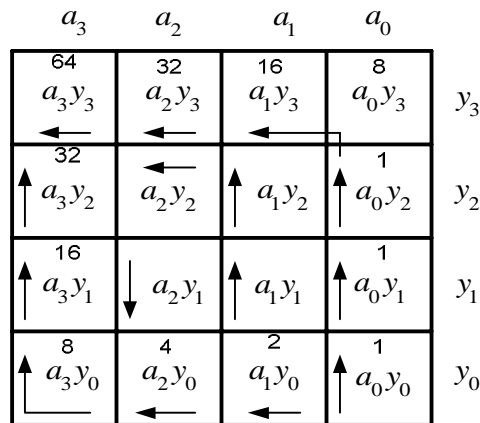


Рис.6.38 - Граф формування пар бітів  $a_i y_j$  на входи логічних елементів "І".

У результаті введення у структуру пристрою однорозрядних повних та неповних суматорів з інверсними виходами та входами переносів забезпечується висока швидкість багаторозрядного матричного перемножувача із затримкою сигналів у горизонтальних інформаційних зв'язках на 1 мікротакт.

Оцінка структурної складності відомого пристрою розраховується згідно виразу:

$$k_{cП1} = 4n \cdot k_{c1} + k_{c2},$$

де,  $k_{c1}$  - структурна складність тригерів;  $k_{c2}$  - структурна складність матриці суматорів,  $n$  - розрядність суматора, де

$$k_{c2} = (n^2 - n) \cdot (k_{cПC} + k_{cZB} + k_{cZ3}) + 4n \cdot k_{cш} + k_{cЛЕ},$$

де  $k_{cПC}$  - структурна складність повного однорозрядного суматора з парафазними входами і виходами;  $k_{cЛЕ}$  - структурна складність логічного елемента "І";  $k_{cZ3}$  - структурна складність зовнішніх інформаційних зв'язків,  $k_{cш}$  - структурна складність вхідної та вихідної шин.

$$\begin{aligned} k_{cП1} &= 4n \cdot k_{c1} + ((n^2 - n) \cdot (k_{cПШ} + k_{cZ3}) + 4n \cdot k_{cш} + k_{cЛЛ}) = \\ &= 4n \cdot 30 + ((n^2 - n) \cdot (1057,4 + 12) + 4 \cdot n + 11,2). \end{aligned}$$

Структурна складність удосконаленого матричного перемножувача визначається згідно виразу:

$$k_{c\Pi 2} = 4n \cdot k_{c1} + k_{c2},$$

де

$$k_{c2} = ((n^2 - 2n) \cdot (k_{c\Pi C} + k_{cz3}) + n \cdot (k_{cHC} + k_{cz3})) + 4n \cdot k_{cui} + n^2 \cdot (k_{cЛЛ} + k_{cz3}) =$$

$$= ((n^2 - 2n) \cdot (175 + 4) + n \cdot (115,2 + 4)) + 4n + n^2 \cdot (11,2 + 3),$$

де  $k_{cHC}$  - структурна складність напівсуматорів;  $k_{c\Pi C}$  - структурна складність повних суматорів.

$$k_{c\Pi 2} = 4n \cdot k_{c1} + ((n^2 - 2n) \cdot (k_{c\Pi C} + k_{cz3}) + n \cdot (k_{cHC} + k_{cz3})) + 4n \cdot k_{cui} + n^2 \cdot (k_{cЛЛ} + k_{cz3}) =$$

$$= 4n \cdot 30 + ((n^2 - 2n) \cdot (175 + 4) + n \cdot (115,2 + 4)) + 4n + n^2 \cdot (11,2 + 3).$$

В результаті проведених досліджень отримано порівняльну діаграму структурної складності удосконаленого матричного перемножувача відносно відомого [376] у залежності від розрядності перемножуваних двійкових чисел (4-128) (рис.6.39).

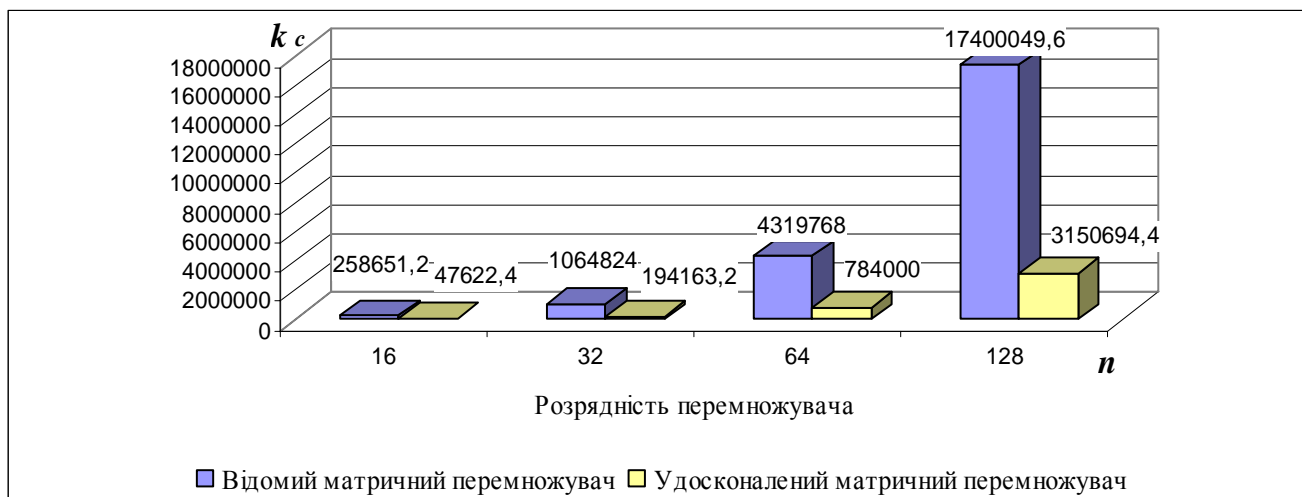


Рис.6.39 – Порівняльна діаграма структурної складності матричних перемножувачів

Таким чином, удосконалення структурної складності розробленого матричного перемножувача відносно відомого відображено на рис.6.40.



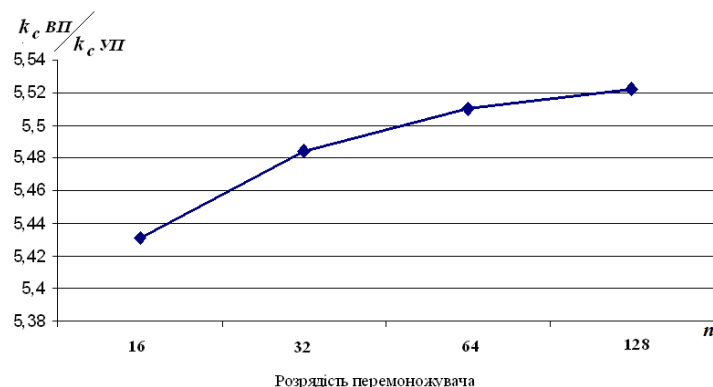


Рис.6.40 – Відношення кількісної оцінки структурної складності удосконаленого перемножувача до відомого.

Швидкодія матричного перемножувача, структура якого показана на рис.6.35 визначається затримкою сигналів у тригерах вхідного та вихідного регістрів пам'яті ( $2\upsilon$  - мікротакти) та затримкою сигналів у перемножувальній матриці ( $(2n - 1) \cdot \tau_{ПС}$ ), ( $\tau_{ПС} = 2\upsilon$ ). Тобто, затримка сигналів у регістрах пам'яті не залежить від розрядності перемножуваних чисел і складає 2 мікротакти, а затримка сигналів у перемножувальній матриці визначається згідно виразу  $((2n - 1) \cdot \tau_{ПС})$ . Тобто при розрядності перемножувача у діапазоні (128 ÷ 2048біт) відповідно змінюється часова складність матриці перемножування у діапазоні  $((2 \cdot (128 \div 2048) - 1) \cdot 2 = 510 \div 8190)$  510 ÷ 8190  $\upsilon$ .

Діаграма залежності швидкодії матричного перемножувача від розрядності перемножуваних чисел приведена на рис.6.41.

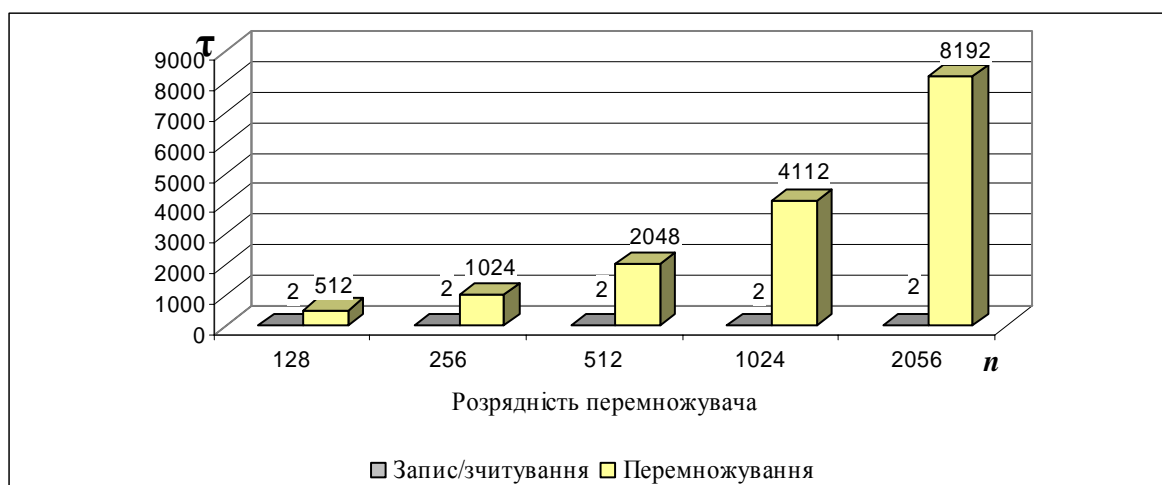


Рис.6.41 - Графік зміни часової складності перемножувача в залежності від розрядності перемножуваних двійкових чисел.

#### 6.4.4 Поточковий перемножувач.

Перемножувачі двійкових чисел є важливими компонентами арифметико-логічних пристроїв універсальних та спеціалізованих процесорів. При значній розрядності множників 32-512 біт такі перемножувачі застосовуються в універсальних комп'ютерах у якості швидкодіючих співпроцесорів. У сучасній обчислювальній техніці найширше застосування отримали матричні перемножувачі з паралельним вводом та виводом даних, що суттєво знижує ефективність їх використання у якості поточкових перемножувачів, які є базовими компонентами мультитядерних та систолічних процесорів [43, 358]. Особливо негативно цей недолік проявляється при опрацюванні багаторозрядних двійкових кодів (1024÷4096 біт) процесорами шифрування даних. Крім того є практично недоцільним реалізація чіпів перемножувачів з вказаним числом виводів. Перспективним напрямком вирішення цієї проблеми є створення поточкових перемножувачів з високим рівнем розпаралелення обчислювальних операцій та біт-орієнтованою організацією вводу та виводу даних. Наявність великої кількості вхідно-виходів ( $4n$ ) у таких багаторозрядних перемножувачах приводить до значного збільшення структурної складності їх вхідних та вихідних шин. Це приводить до відповідного зростання габаритів чіпів, збільшення кількості зовнішніх клем приєднань та зв'язків між кристалом та вихідними клемами з'єднань.

Запропоновано новий поточковий алгоритм виконання операції множення і структура поточкового перемножувача [208], яка показана на рис.6.42.

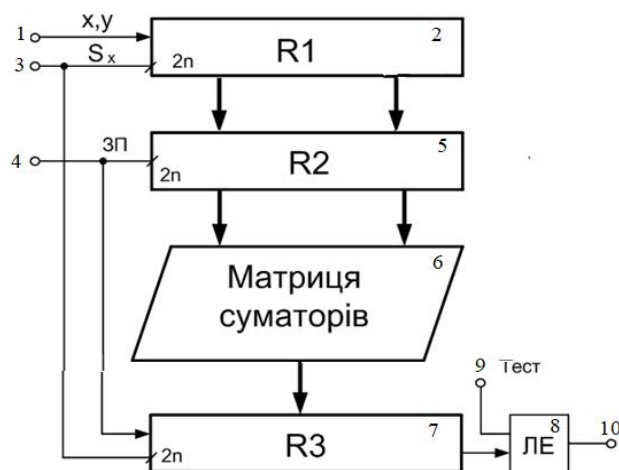


Рис.6.42 - Структура поточкового перемножувача двійкових чисел

Принцип роботи потокового перемножувача детально описаний у додатку М та полягає у розпаралеленні процесів запису, перемноження та зчитування даних. При цьому затримка сигналів у вхідному та вихідному регістрах пам'яті пристрою  $((2n \cdot \tau_T) \cdot \tau_T)$ ,  $\tau_T = 2$ . Тобто при зміні розрядності потокового перемножувача у діапазоні (128 ÷ 2048біт), часова затримка сигналів у регістрах вводу-виводу відповідно складає  $(2 \cdot (128 \div 2048) \cdot 2 = 512 \div 8192)$  512 ÷ 8192 нс, що показано на рис.6.43.

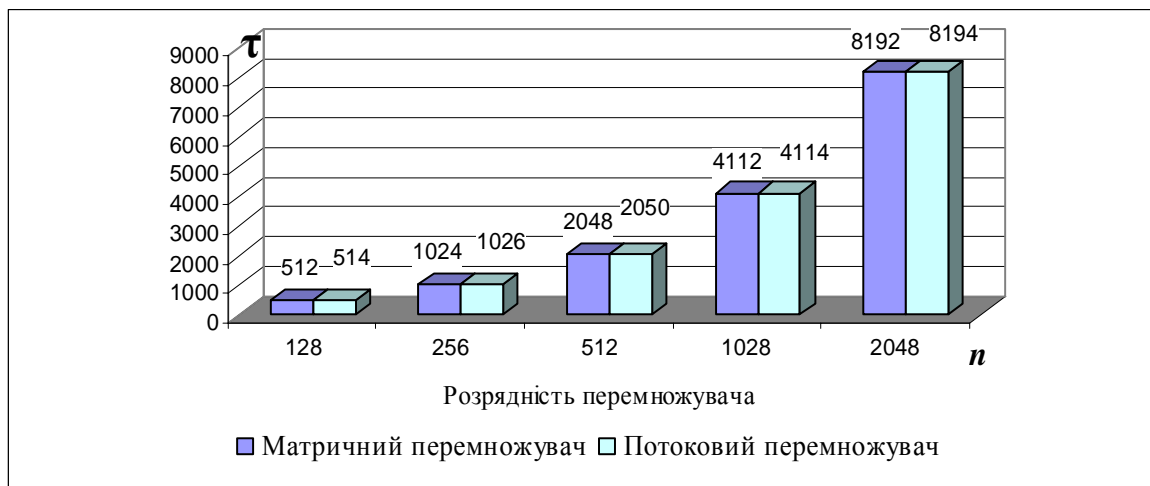


Рис.6.43 - Порівняльна діаграма часової затримки сигналів у матричному та запропонованому потоковому перемножувачах.

Представлені на діаграмі результати порівняння матричного та потокового перемножувача показують, що затримка сигналів у потоковому перемножувачі на 3 мікротакти (з врахуванням затримки сигналів на 1 мікротакт у вихідному логічному елементі "Виключаюче АБО") перевищує затримку сигналів відомого матричного перемножувача, не залежно від розрядності перемножуваних двійкових чисел.

Структурна складність потокового перемножувача визначається згідно виразу:

$$k_{c\text{III}} = 6n \cdot k_{c1} + k_{c2} + k_{c3},$$

де  $k_{c2}$  - структурна складність матриці перемноження,

$$\begin{aligned} k_{c2} &= ((n^2 - 2n) \cdot (k_{c\text{ПС}} + k_{c\text{ЗЗ}}) + n \cdot (k_{c\text{НС}} + k_{c\text{ЗЗ}})) + 4n \cdot k_{c\text{ш}} + n^2 \cdot (k_{c\text{ЛЛ}} + k_{c\text{ЗЗ}}) = \\ &= ((n^2 - 2n) \cdot (175 + 4) + n \cdot (115,2 + 4)) + 4n + n^2 \cdot (11,2 + 3), \end{aligned}$$

де  $k_{c_{HC}}$  - структурна складність напівсуматорів;  $k_{c_{PC}}$  - структурна складність повних суматорів;

$k_{c_3}$  - структурна складність логічного елемента "Виключаюче АБО".

$$k_{c_{III}} = 6n \cdot k_{c1} + ((n^2 - 2n) \cdot (k_{c_{PC}} + k_{c_3}) + n \cdot (k_{c_{HC}} + k_{c_3})) + 4n \cdot k_{c_{ци}} + n^2 \cdot (k_{c_{ЛЛ}} + k_{c_3}) =$$

$$= 6n \cdot 30 + ((n^2 - 2n) \cdot (175 + 4) + n \cdot (115,2 + 4)) + 4n + n^2 \cdot (11,2 + 3) + 68.$$

В результаті проведених досліджень отримано порівняльну діаграму структурної складності потокового перемножувача у залежності від розрядності перемножуваних чисел (128-2048) (рис.6.44).

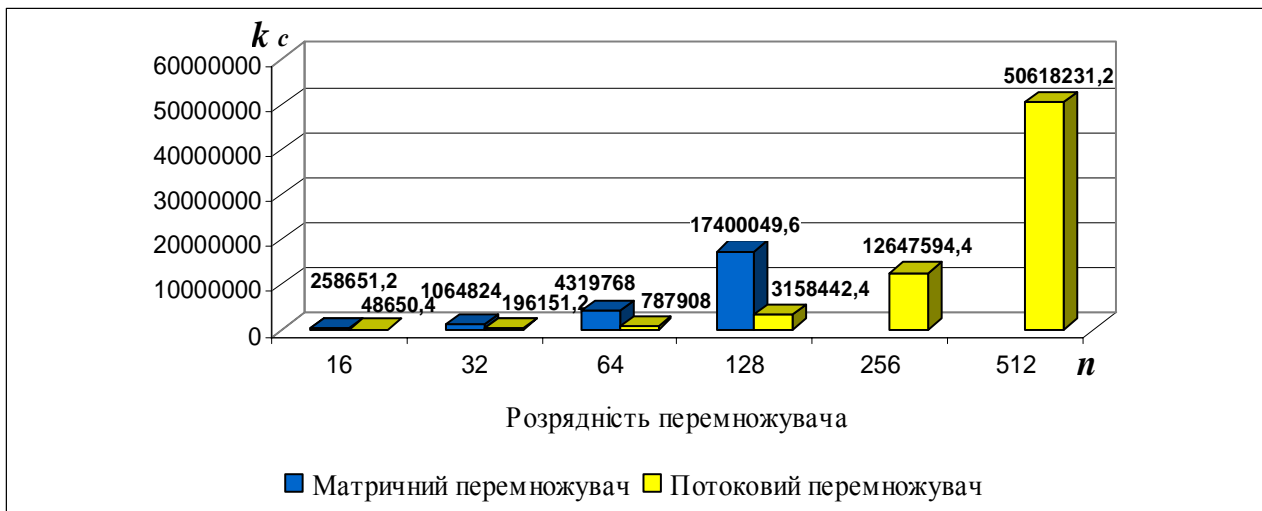


Рис.6.44 - Діаграма зміни структурної складності потокового перемножувача в залежності від розрядності перемножуваних двійкових чисел

У запропонованому потоковому перемножувачі досягнута гранично мінімальна структурна складність вхідної та вихідної шин. Тобто структурна складність цього компонента потокового перемножувача зменшена у  $4n/2$  разів, що при розрядності вхідних чисел 512, 1024, 2048 згідно критерію Квайна складає 1024, 2048 та 4096 разів.

У загальному випадку зменшення структурної складності вхідно-виходів мікроелектронних чіпів потокового перемножувача у порівнянні з матричним перемножувачем складає  $4n/5$ , тобто при розрядності вхідних чисел 512, 1024, 2048 згідно критерію Квайна складає 409,6, 819,2, 1638,4 разів

Внаслідок застосування у запропонованому потоковому перемножувачі удосконалених структур однорозрядних неповних та повних суматорів на основі логічного елемента "Виключаюче І" з максимальною апаратною складністю 8 вентилів, у порівнянні з відомими структурами, досягнуто зменшення у 2,5 рази апаратної складності перемножуваної матриці, яка містить однорозрядні суматори з парафазними входами та виходами (20 вентилів).

Крім того, розроблений поточковий перемножувач характеризується розширеними поліфункціональними можливостями, оскільки дозволяє виконувати діагностування правильності операції множення шляхом порівняння вихідних кодів добутків з заданим кодом добутку двох відомих багаторозрядних перемножуваних чисел. Шифрування та криптозахист вихідних кодів потокового перемножувача реалізується шляхом модульного біт-орієнтованого додавання вихідних кодів добутків з  $2^n$ -розрядною псевдовипадковою послідовністю, яка поступає на другий вхід вихідного логічного елемента "Виключаюче АБО".

В частковому випадку, коли два перемножувані двійкові числа однакові, пристрій реалізує операцію піднесення до квадрату, а коли одне з чисел рівне 1 – на виході формується крипто захищений код іншого числа.

Розроблені поточкові перемножувачі з біт-орієнтованим вводом та виводом цифрових даних можуть бути ефективно застосовані у якості швидкодіючих малогабаритних кристалів у структурах процесорів криптозахисту потоків даних та інших алгоритмах опрацювання двійкових чисел з розрядністю 1024-2048 біт.

## 6.5. Процесор обчислення ймовірнісної ентропії

У розділі 2.7 приведені теоретичні основи та методи ентропійного опрацювання інформаційних потоків згідно різних оцінок міри ентропії. Серед оцінок міри ентропії, приведених в таблиці 2.8, найбільш широке застосування в

інформаційних системах отримали оцінки мір ентропії Р.Хартлі, К.Шеннона, Я.Николайчука, які розраховуються згідно виразів (табл.2.10, п.1, 4, 11) [284]:

$$H = n \cdot \log_2 S; \quad H = -k \sum_{j=0}^{S-1} p_j \log p_j;$$

$$I_x = n \cdot \hat{E} \left[ \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \times \sum_{j=1}^m (D_x^2 - R_{xx}^2(j)) \right].$$

Розрахунок ентропійних характеристик потоків даних виконується алгоритмічно-програмним шляхом на універсальних процесорах. Недоліком такої реалізації обчислення ентропії є низька швидкодія, яка обумовлена необхідністю розрахунку та накопичення ймовірнісних характеристик випадкових повідомлень, які реалізуються згідно послідовних алгоритмів.

В РКС реального часу обчислення ентропії повинно виконуватися з високою швидкістю, що визначає актуальність розробки та створення відповідних спецпроцесорів визначення ентропії.

Відоме структурне рішення спецпроцесора визначення ентропії, на основі оцінки К.Шеннона [378], структура якого приведена на рис.6.45.

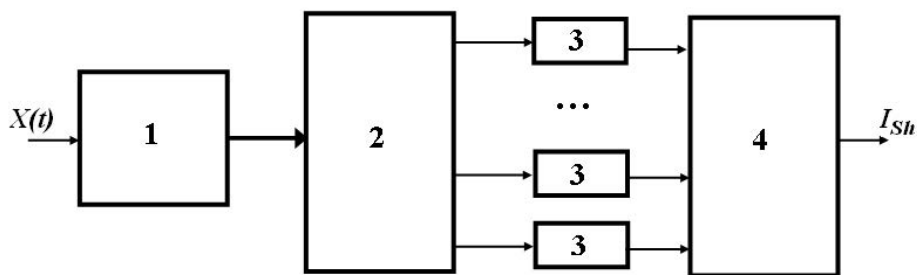


Рис.6.45 - Структура спецпроцесора визначення ймовірнісної ентропії.

Пристрій визначення ймовірнісних повідомлень (рис.6.45) містить АЦП (1), вхід якого є входом пристрою, цифровий комутатор (2), у кожному каналі лічильний модуль (3), структура якого показана на рис.6.46, вхід якого з'єднаний через комутатор з виходом АЦП, а вихід з'єднаний з відповідним входом пірамідального суматора (4), вихід якого є виходом пристрою.

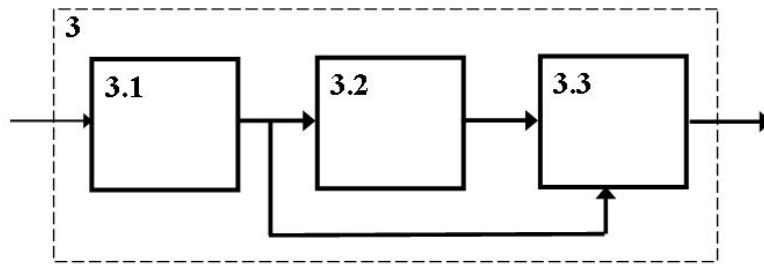


Рис.6.46 - Структура лічильного модуля.

Лічильний модуль (3) (рис.6.45) містить двійковий лічильник на Т-тригерах (3.1), ПЗП (3.2) та перемножувальну матрицю (3.3).

Недоліком такого пристрою є нерегулярність структури, велика апаратна складність та низька швидкодія, які обумовлені тим, що пристрій містить АЦП, який формує k-розрядні вихідні паралельні двійкові коди цифрових значень вхідного сигналу, багатоканальний комутатор, який розподіляє на входи відповідних лічильних модулів імпульси, що відповідають цифровим значенням ймовірнісних подій, які логарифмуються і перемножуються у компонентах (3.2 і 3.3) лічильного модуля (3), вихідні коди яких додаються у пірамідальному суматорі (4).

Низька швидкодія такого пристрою також обумовлена наявністю в АЦП перетворювача-шифратора та регістра пам'яті на D-тригерах вихідного двійкового коду (рис.Р.2).

Запропоноване автором в роботі [195] (Патент 121046) підвищення швидкодії та регулярності структури пристрою визначення ентропії, зменшення апаратної складності шляхом застосування компонента АЦП паралельного типу з вихідним кодом Хаара (рис.6.5).

На рис.6.47 показана структурна схема запропонованого удосконаленого пристрою визначення ентропії [195], який містить: 1 – АЦП; 2 – інформаційний вхід пристрою, 1.1 – група взірцевих резисторів, 1.2 – компаратори з парафазними виходами, 1.3 – логічні елементи "І-НЕ", 3 – лічильники, 4 – синхронізатор; 5 – шифратори, 6 – пірамідальний суматор, 7 - вихід пристрою.

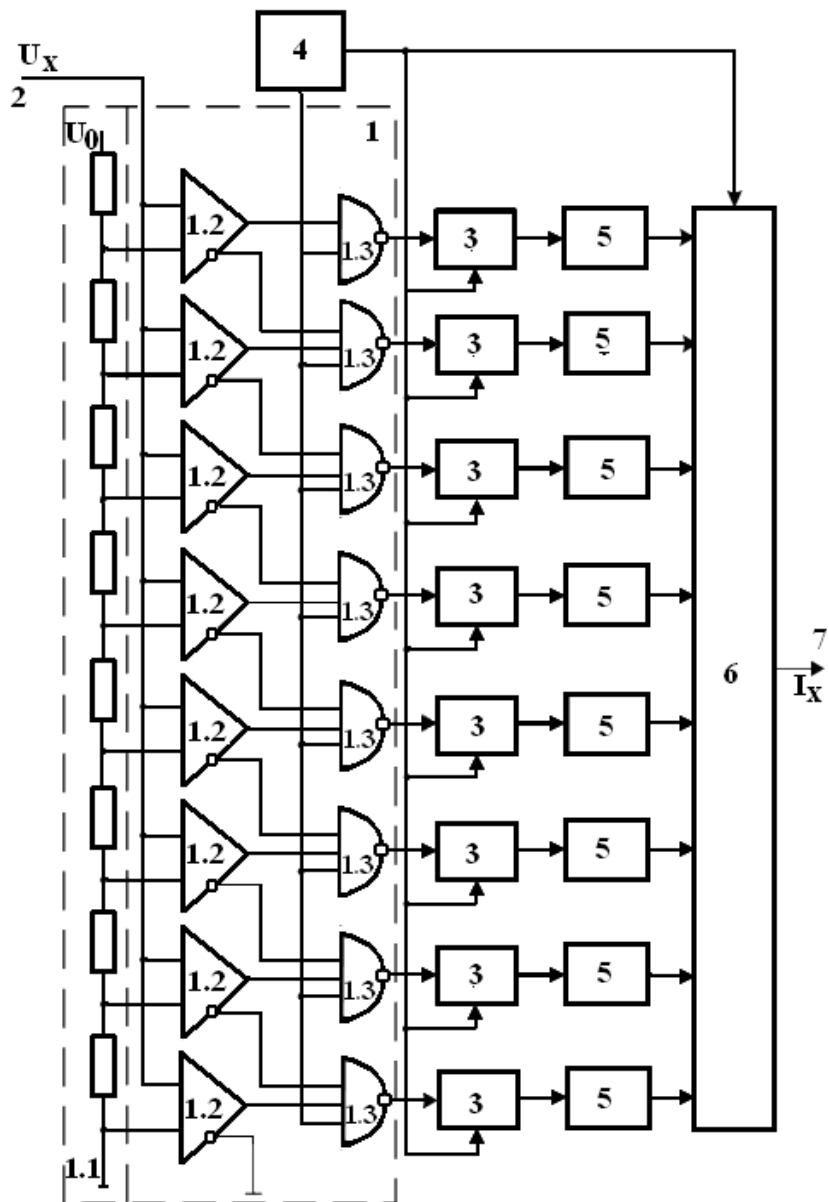


Рис.6.47 - Структурна схема удосконаленого пристрою визначення ентропії.

Принцип роботи пристрою обчислення ймовірнісної ентропії описаний у додатку М.

Розрахунки системних характеристик відомого та запропонованого пристрою визначення ентропії приведені в додатку О.

На основі проведених розрахунків побудовані порівняльні діаграми системних характеристик відомого та запропонованого пристрою визначення ентропії (рис.6.48-6.50).



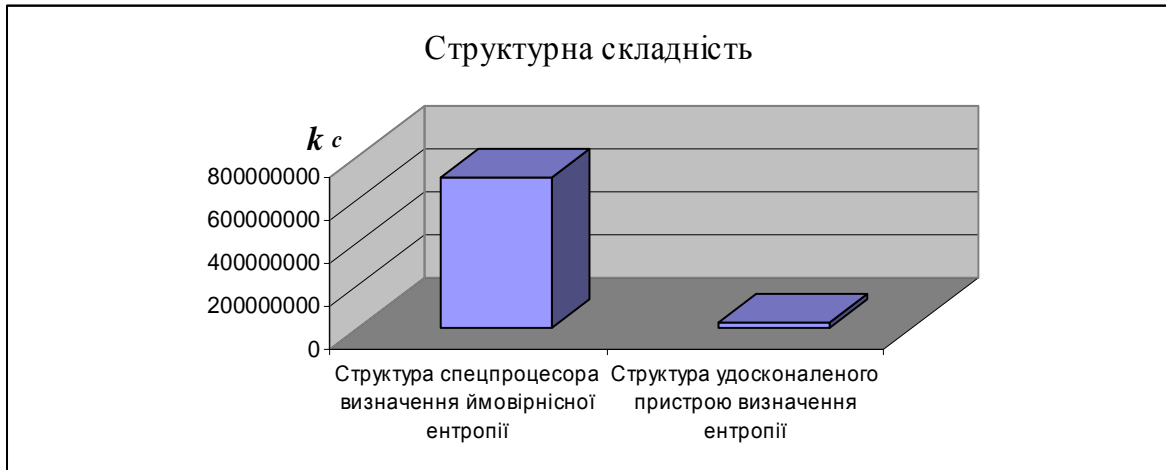


Рис.6.48 - Порівняльна діаграма структурної складності відомого та запропонованого пристрою визначення ентропії.

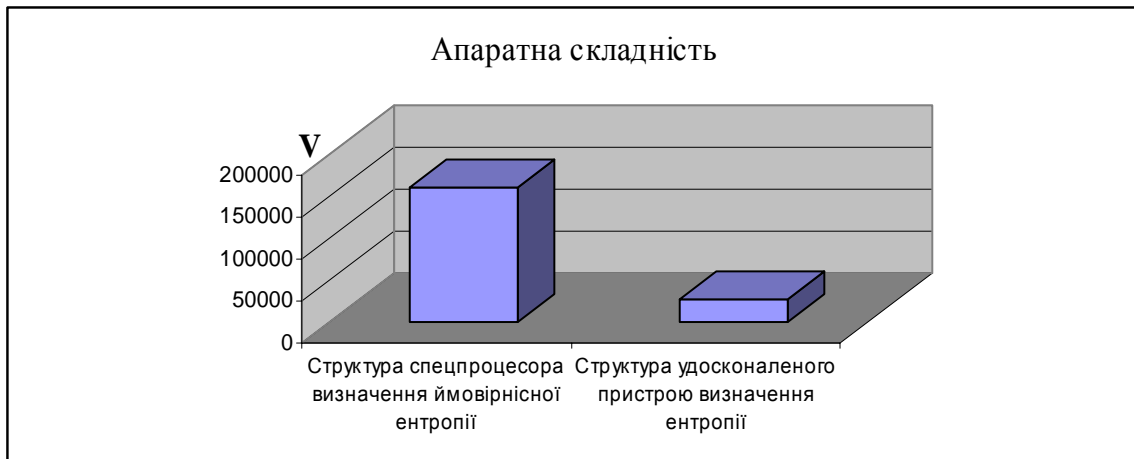


Рис.6.49 - Порівняльна діаграма апаратної складності відомого та запропонованого пристрою визначення ентропії.

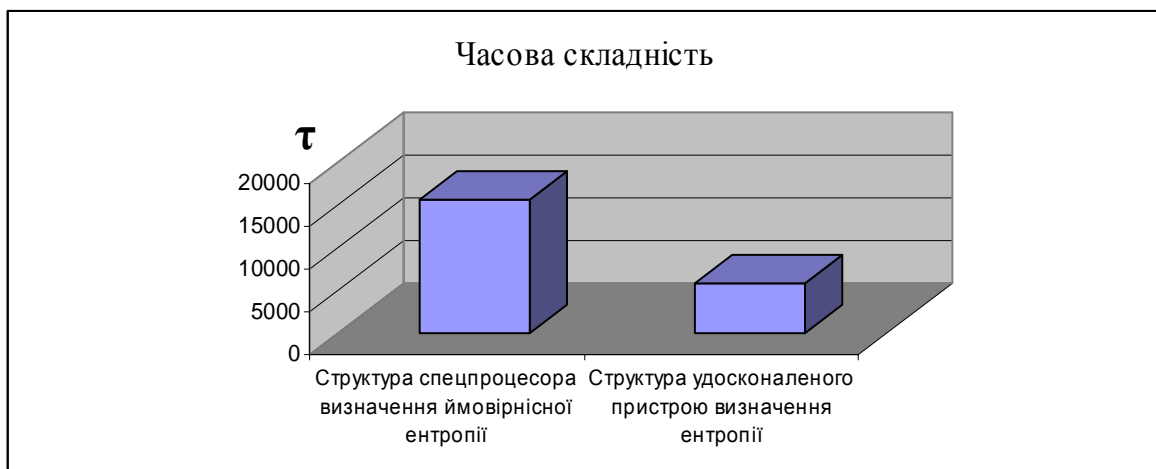


Рис.6.50 - Порівняльна діаграма швидкодії відомого та запропонованого пристрою визначення ентропії.

Запропоноване удосконалення структури спецпроцесора визначення ймовірнісної ентропії у порівнянні з відомим пристроєм дозволило досягнути зменшення структурної складності у 31,86 рази, апаратної складності - у 5,78 разів, підвищити швидкодію у 2,65 рази.

Вилучення зі структури пристрою комутатора дозволило підвищити регулярність структури пристрою і спростити топологію його мікроелектронної реалізації на кристалі.

6.6. Удосконалення структур протоколів обміну даними в мережах низових рівнів кіберфізичних систем.

Удосконалення програмно-апаратних засобів і методів структуризації та ефективного кодування даних у дистрибутивних комп'ютерних системах є актуальною проблемою, пов'язаною з вирішенням комплексу науково-прикладних задач у теорії структуризації даних. Найбільш пріоритетними задачами у названих системах є підвищення ефективності кодування даних сенсорних вимірювань шляхом зменшення їх надлишковості. Удосконалення структурної організації фреймів протоколів обміну даними потребує підвищення інформаційної надійності їх кадрової та структурної синхронізації [379, 380]. Високі та жорсткі вимоги надійної кадрової синхронізації фреймів даних відносяться до продукційних моделей моніторингу станів об'єктів контролю та управління у процесі діалогу "оператор-комп'ютеризована система" [164, 380].

Дослідження системних характеристик протоколів обміну даними у просторово розподілених моніторингових системах демонструє ряд їх функціональних обмежень та структурних недоліків:

1. Застосування одного АЦП з декларованою розрядністю 16 і 24 біти є надлишковим для широкого класу технологічних процесів у багатьох галузях промисловості, об'єкти яких оснащені переважно сенсорами класів точності  $0,05 \div 0,5$ . Табличні та трендові відображення вимірювальних даних з точністю

$2^{16}$  недоступне для якісного аналізу у реальному часі операторами промислових установок.

2. Якщо клас точності сенсорів не перевищує  $8 \div 12$  біт, то цифрове опрацювання вимірювальних даних у діапазоні  $2^{16} \div 2^{24}$  біт буде значно спотворене завадами та похибками з амплітудами  $6 \div 9$  біт.

3. Стандартні протоколи обміну даними, які застосовуються в комп'ютерних мережах типу: Ethernet, Token Ring, FDDI, HDLC, PPP, Frame Relay, HP-IL [382, 383].

Особливістю фреймів найбільш поширених протоколів обміну даними [380, 384] є можливість виникнення кодової комбінації флага (01111110) у середині його структури, що приводить до збоїв та неправильної синхронізації кадрів. Застосування операції "біт-стафлінг", яка реалізує вставку "0" після кожних п'яти одичних бітів у структурі фрейму, вирішує цю проблему шляхом вилучення таких вставок процесором на приймальній стороні каналу зв'язку. Така структурна організація кадрів протоколів класу HDLC приводить до випадкових змін довжини пакетів даних, що стає джерелом додаткових помилок, які можуть виникати при вставках та стираннях бітів під дією завад у каналах зв'язку.

Тому актуальною проблемою є удосконалення методів кодування потоків вимірювальних даних за умови зменшення їх надлишковості при телепортації та системного узгодження з вимогами структурної організації та синхронізації кадрів протоколів обміну даними.

Систематизація структур каналів і фізичних рівнів кадрів наведена в табл.6.12 [206, 207], де використовуються наступні позначення: PA (преамбула), SD (Start Delimiter), FC (контроль кадру), DA (адреса призначення), AC (контролю доступу), SA (адреса джерела), PDU (блок пакетних даних), FCS (послідовність перевірки кадру), CRC (перевірка циклічної надмірності), ED/FS (кінцевий обмежувач / Статус кадру), FT (тип кадру) і F (флаг).

Таблиця 6.12 - Структури фреймів найбільш поширених протоколів обміну даними [206, 207]

Протокол	Структура фрейму (Bits)									
Ethernet		<b>PA</b>	<b>SD</b>	<b>DA</b>	<b>SA</b>	<b>FT</b>	<b>PDU</b>	<b>FCS</b>		
		56	8	48	48	16	512-32K	32		
Token Ring		<b>SD</b>	<b>AC</b>	<b>FC</b>	<b>DA</b>	<b>SA</b>	<b>PDU</b>	<b>CRC</b>	<b>ED</b>	<b>FS</b>
		8	8	8	48	48	up to 18,2Kx8	32	8	8
FDDI		<b>PA</b>	<b>SD</b>	<b>FC</b>	<b>DA</b>	<b>SA</b>	<b>PDU</b>	<b>FCS</b>	<b>ED/FS</b>	
		16	8	8	48	48	up to 4478x8	32	16	
HDLC	<b>F</b>	<b>Address</b>	<b>FC</b>	<b>Information</b>				<b>FCS</b>	<b>F</b>	
	8	8	8 or 16	Variable length, 0 or more x8				16 or 32	8	
PPP	<b>F</b>	<b>Address</b>	<b>FC</b>	<b>Protocol</b>	<b>Information</b>				<b>FCS</b>	<b>F</b>
	8	8	8	8 or 16	Variable length, 0 or more x8				16 or 32	8
Frame Relay		<b>F</b>	<b>Address</b>	<b>Information</b>			<b>FCS</b>	<b>F</b>		
		8	8 -16	Variable length,			16	8		

Перспективним підходом до вирішення означеної проблеми є ефективне застосування теорії структуризації поліфункціональних даних [97, 381].

Згідно теоретичних основ та методології організації вимірювань на низових рівнях комп'ютеризованих дистрибутивних систем моніторингу технологічних процесів [64, 66, 385] діапазони змін амплітуди аналогових сигналів сенсорів стандартизовані на міжнародному рівні. Діапазони надлишкових кодів, які виникають при двійковому кодуванні стандартних діапазонів змін сигналів на виходах сенсорів певного класу точності, показані в табл.6.13 [64, 66, 97, 206, 207, 385].

Відомо, що амплітуди аналогових сигналів сенсорів стандартизовані у діапазонах [64, 66, 385]: 0 ÷ 5 мА, 5 ÷ 20 мА, 0 ÷ 1В, 1 ÷ 10В, 0 ÷ 2кГц та ін.

Таблиця 6.13 - Діапазони надлишковості двійкових кодів у відповідності до класів точності.

Клас точності сенсорів	Амплітуди аналогових сигналів	Границі двійкових кодів на виходах АЦП	Розрядність кодів АЦП, біт	Діапазон надлишкових двійкових кодів
1.0	0 ÷ 100	0 ÷ 128	7	101 ÷ 127
0.5	0 ÷ 200	0 ÷ 256	8	201 ÷ 255
0.2	0 ÷ 500	0 ÷ 512	9	501 ÷ 511
0.1	0 ÷ 1000	0 ÷ 1024	10	1001 ÷ 1023
0.05	0 ÷ 2000	0 ÷ 2048	11	2001 ÷ 2047
0.025	0 ÷ 4000	0 ÷ 4096	12	4001 ÷ 4095
0.005	0 ÷ 6000	0 ÷ 65536	16	16001 ÷ 5535

Для діапазонів змін амплітуд сигналів сенсорів (1; 2; 5; 10; 20)В у промисловості відповідно застосовуються АЦП з розрядністю (7-8, 8-12, 12-16, 16-24) біт. Основними фірмами – виробниками АЦП є: Texas Instruments, Analog Devices та ін. [386, 387].

Аналіз табл.6.12 показує, що цифрові 7-бітні вимірювальні дані у діапазоні 0 ÷ 99 одиниць представляються двійковими кодами у діапазоні (0000000 ÷ 1100011), а коди (1100111 ÷ 1111111) є надлишковими і можуть бути застосовані у якості регістрових та службових кодів у протоколах обміну даними.

В табл.6.14 [64, 66, 97, 206, 207, 385] приведені границі змін інформаційних та надлишкових двійкових кодів відповідно до класу точності сенсорів.

Таблиця 6.14 - Границі змін інформаційних та надлишкових двійкових кодів відповідно до класу точності сенсорів

Клас точності сенсорів	Амплітуди аналогових сигналів	Границі інформаційних двійкових кодів	Границі надлишкових двійкових кодів
1.0	0 ÷ 100	0000000 ÷ 1100011	1100111 ÷ 1111111
0.5	0 ÷ 200	00000000 ÷ 11000111	11001001 ÷ 11111111
0.025	0 ÷ 4000	000000000000 ÷ 1111100111	111110100001 ÷ 111111111111

В табл.6.15 та 6.16 [64, 66, 97, 206, 207, 385] представлені приклади реєстрових пар непарних та парних 7-бітних реєстрових та службових кодів  $R_i$ .

Таблиця 6.15 - Непарні реєстрові коди

Біти	Коди телеметрії		Реєстрові коди фреймів протоколів						
	0 ÷ 99		103	107	111	115	119	123	127
$a_6$	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$a_5$	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$a_4$	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$a_3$	0	... 0	0	1	1	0	0	1	1
$a_2$	0	0	1	0	1	0	1	0	1
$a_1$	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$a_0$	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблиця 6.16 - Парні реєстрові коди

Біти	Коди телеметрії		Реєстрові коди фреймів протоколів						
	0 ÷ 99		100	102	104	106	108	110	126
$a_6$	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$a_5$	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$a_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$a_3$	0	... 0	0	1	0	1	1	1	1
$a_2$	0	0	1	0	1	0	1	1	1
$a_1$	0	1	0	1	1	1	0	1	1
$a_0$	0	1	0	1	0	0	0	0	0

В табл.6.17-6.20 [206, 207] показані приклади формування структурно удосконалених кадрів протоколу HDLC на основі застосування досліджених надлишкових двійкових кодів у вигляді кодів флага та реєстрових кодів структурних компонентів даного протоколу з 7-ми, 8-ми, 6-ти та 4-х бітовими розрядностями фреймів.

Таблиця 6.17 - Структура 7-бітного фрейму протоколу HDLC

Флаг	R1	A1	R2	A2	R3	Y	R4	PDU	R5	CRC	Флаг
1 1	1		1		1		1		1		1 1
1 1	1		1		1		1		1		1 1
1 1	0		0		0	·	1	...	1	·	1 1
1 1	0	...	1	...	1	·	0	...	0	·	1 1
1 1	1		0		1	·	0	...	1	·	1 1
1 1	1		1		1		1		0		1 1
0 0	1		1		1		1		0		0 0

Таблиця 6.18 - Структура 8-бітного фрейму протоколу HDLC

Флаг	R1	A1	R2	A2	R3	Y	R4	PDU	R5	CRC	Флаг
1 0	1		1		1		1		1		1 0
1 1	1		1		1		1		1		1 1
1 1	0		0		0	.	1	...	1	.	1 1
1 1	0		1		1	.	0	...	1	.	1 1
1 1	1	...	0	...	1	.	0	...	0	.	1 1
1 1	1		1		1		1		1		1 1
1 1	1		1		1		1		1		1 1
1 0	1		1		1		1		1		1 0

Таблиця 6.19- Структура 6-бітного фрейму протоколу HDLC

Флаг	R1	A1	R2	A2	R3	Y	R4	PDU	R5	CRC	Флаг
1 1	1 1		1 0		1 0		1 0		1 0		1 1
1 1	1 1		1 1		1 1	.	1 1	...	1 1	.	1 1
1 1	1 1		1 1	"..."	1 1	.	1 1	...	1 0	.	1 1
1 1	1 1	...	1 1	"..."	1 1	.	1 0	...	1 1	.	1 1
1 1	1 1		1 1		1 0		1 1		1 1		1 1
0 0	0 1		1 0		1 1		1 1		1 1		0 0

Таблиця 6.20 - Структура 4-бітного фрейму протоколу HDLC

Флаг	R1	A1	R2	A2	R3	Y	R4	PDU	R5	CRC	Флаг
1 1 0	1 1 0		1 1 0		1 1 0	.	1 1 0	...	1 1 1	.	1 1 1
1 0 0	1 0 0		1 0 0	"..."	1 0 0	.	1 0 1	...	1 1 1	.	1 0 1
1 1 0	1 1 0	...	1 1 1	"..."	1 1 1	.	1 1 0	...	1 0 1	.	1 1 1
1 0 0	1 1 1		1 1 0		1 1 1		1 1 0		1 1 1		1 1 0

При кодуванні даних згідно запропонованого структурного удосконалення фреймів необхідно враховувати біт-орієнтовану розрядність у компонентах структури фреймів A1, A2, Y, CRC, а також відповідні таблиці алфавітно-цифрових даних, згідно міжнародного стандарту ASCII, з розміром регістрів, орієнтованих на діапазони  $0 \div 99$ ,  $0 \div 199$ ,  $0 \div 999$  та  $0 \div 3999$ . Наприклад, при розрядності адрес абонентів A1, A2 32 біти у структурах протоколів (табл.6.17-6.20) відповідно повинні задовольнятися умови у протоколах:

$$- 7 \text{ біт} - 7 \cdot 5 = 35 \text{ біт};$$

$$- 8 \text{ біт} - 8 \cdot 5 = 40 \text{ біт};$$

$$- 2 \cdot 6 \text{ біт} - 6 \cdot 6 = 36 \text{ біт};$$

$$- 3 \cdot 4 \text{ біт} - 9 \cdot 4 = 36 \text{ біт}.$$

Відповідне забезпечення необхідної розрядності інших компонентів у запропонованих протоколах повинно здійснюватися аналогічним способом.

Очевидно, що деякі найбільш ефективні структури протоколів обміну даними на основі запропонованої інформаційної технології можуть бути захищені відповідними національними чи міжнародними стандартами.

Перевагою такого методу структуризації та кодування фреймів протоколів обміну даними еквівалентне структурі кадрів HDLC є відсутність застосування операції "біт-стаффінгу". Таке рішення ліквідує випадкові зміни кількості бітів у пакетах даних, які телепортуються у комп'ютерних мережах.

Запропоноване зменшення розрядності фреймів протоколів дозволяє застосувати у каналах зв'язку ансамблі з меншою кількістю маніпульованих сигналів, що підвищує заводо захищеність телепортованих даних. А також поліфункціонально спростити задачу телепортації без додаткових перетворень 4-бітових кодів алфавітно-цифрових даних, які формуються двома 4-бітовими кодами на виході синтезованих клавіатур [163, 388]. Сучасні програмні засоби дозволяють легко забезпечити сумісність запропонованих структур протоколів з діючими стандартними протоколами у комп'ютерних мережах шляхом трансформації їх структур. Підвищення надійності розпізнавання та ідентифікації відхилень станів об'єктів від норми на низових рівнях просторово розподілених інформаційно-вимірювальних систем в умовах дії інтенсивних промислових завод досягається більш жорсткою структуризацією компонентів фреймів, які супроводжуються регістровими кодами.

6.7. Розробка та оцінка структурної складності малогабаритної синтезованої клавіатури введення алфавітно-цифрових даних.

В сучасних інфокомунікаційних системах використовуються ПК та спеціалізовані мобільні пристрої вводу алфавітно-цифрових даних. Недоліком таких пристроїв є велика надлишковість кількості клавіш, яка приводить до значних габаритів пристрою введення даних, або низька швидкодія введення, обумовлена необхідністю багаторазового натискання регістрових клавіш;



складна реалізація програмного пристрою, який змінює функції клавіш в реєстровому режимі, що потребує високого професійного досвіду операторів при вводі алфавітно-цифрових даних.

Тому актуальною задачею є розробка нових методів та відповідних засобів цифрового введення даних на основі принципів синтезування символів, що дозволяє суттєво зменшити кількість функціональних клавіш, габарити клавіатури та відповідно підвищити швидкодію вводу даних та надійність пристроїв даного класу.

Розробка малогабаритної багатфункціональної клавіатури введення алфавітно-цифрових даних та оцінка її структурної складності приведені в додатку П.

#### 6.8. Результати мікроелектронної реалізації та синтезу СПП на ПЛІС.

Реалізація розроблених спецпроцесорів, які є базовими компонентами складних програмно-апаратних засобів кіберфізичних систем у мікроелектронному виконанні на основі ПЛІС приведені у додатку Р.

#### Висновки до шостого розділу

Розроблені теорія, моделі, методи та засоби лягли в основу побудови ефективних програмно-апаратних засобів формування, перетворення, передавання, опрацювання, зберігання, відображення та використання структуризованих ПФД. Практична цінність отриманих результатів полягає у наступному:

- розроблені та реалізовані у мікроелектронному виконанні структурні рішення елементів та функціональних компонентів складних РКС та кіберфізичних систем наступних типів:

- 1) швидкодіючий АЦП паралельного типу з вихідними кодами в базисі Хаара-Крестенсона, еквівалентний 10-ти бітному АЦП базису Радемахера, який у порівнянні з відомою структурою АЦП з

матричним шифратором з вихідними кодами Хаара-Крестенсона характеризується зменшенням структурної складності у 5,1 разів, інформаційно-структурної – у 6,2 рази, зменшенням апаратної складності при різних наборах модулів - у 2 рази та підвищенням швидкодії - у 2,25 рази. АЦП такого класу характеризуються зростанням розрядності вихідних кодів базису Хаара-Крестенсона практично у 3 рази у порівнянні з розрядністю двійкових кодів базису Радемахера. Вказана особливість компенсується підвищенням на 2-3 порядки швидкодії опрацювання цифрових даних згідно модульної арифметики системи залишкових класів у порівнянні з швидкістю арифметики двійкової системи числення базису Радемахера;

- 2) швидкодіючий мультибазисний АЦП паралельного типу на основі парафазних компараторів з розширеними функціональними можливостями та вихідними кодами у базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона, у якому при розрядності вихідних кодів 10 біт, досягнуто зменшення апаратної складності, у порівнянні з відомими АЦП аналогічної розрядності, при наборі модулів вихідного коду Хаара-Крестенсона ( $P_1 = 32$ ,  $P_2 = 33$ ) у 14 разів, а при наборі модулів ( $P_1 = 7$ ,  $P_2 = 12$ ,  $P_3 = 13$ ) – у 8 разів. Запропоноване застосування парафазних компараторів у структурі АЦП дозволило структурно складні логічні елементи "Виключаюче АБО" (XOR), які містять не менше 3÷5 логічних елементів з 2÷3 послідовно з'єднаних логічних елементів "І-НЕ", "АБО", "І" у кожному з  $2^k$  квантів пристрою, замінити логічними елементами "І-НЕ" з затримкою сигналів 1 мікротакт, що дозволило зменшити структурну складність та підвищити його швидкістю, у порівнянні з аналогами, у 2 рази зі зменшенням часової затримки сигналів до 4 мікротактів;
- 3) удосконалені структури однорозрядних неповних двійкових суматорів з однофазними та парафазними вхідними та вихідними сигналами, які, у порівнянні з відомими класичними структурами, характеризуються

зменшеною структурною складністю у 2-7 разів. Спрощений однорозрядний неповний суматор на основі застосування логічного елемента "Виключаюче І", з прямими інформаційними входами, прямим виходом суми та інверсним виходом переносу, з гранично мінімальними характеристиками структурної складності 120,4 одиниць, апаратною складністю 3 логічних елементи та гранично мінімальною затримкою сигналів 1 мікротакт, що дозволило застосувати його у якості компонента багаторозрядних двійкових суматорів на основі повних однорозрядних суматорів з інверсними переносами;

- 4) однорозрядні повні суматори з парафазними комутованими входами та парафазними виходами призначені у якості компонентів швидкодіючих матричних перемножувачів, які у порівнянні з відомими однорозрядними повними суматорами характеризуються гранично максимальною швидкодією з затримкою сигналів переносів та сум на 1 мікротакт, що дозволило підвищити швидкодію квадраторів, матричних та потокових перемножувачів у 2 рази;
- 5) однорозрядний повний двійковий суматор з прямими інформаційними входами, прямим виходом суми з затримкою сигналів 2 мікротакти та інверсними входами та виходами переносів із затримкою сигналів 1 мікротакт, який у порівнянні з відомими структурами суматорів даного класу дозволили зменшити структурну складність: з одним комутуючим входом та парафазними вхідно-виходами – у 6,7 разів; з двома комутуючими входами та парафазними вхідно-виходами – у 7,8 разів; з класичним однорозрядним суматором з прямими входами та виходами – у 2,25 разів; з удосконаленим суматором на основі логічних елементів "Виключаюче І" з прямими входами та виходами – у 0,9 разів, що дозволило розширити клас компонентів процесорів кіберфізичних систем з гранично мінімальними системними характеристиками;
- б) швидкодіючі багаторозрядні суматори:

- 6.1) пірамідального типу, реалізовані на основі удосконалених однорозрядних неповних суматорів з парафазними входами та виходами, які у порівнянні з відомим багаторозрядними комбінаційними суматорами, характеризується зменшеною апаратною складністю, не залежно від розрядності двійкових кодів, що додаються - у 1,5 рази, зменшеною часовою складністю – у 2 рази, зростанням структурної складності у 1,4 рази за рахунок наявності парафазних входу-виходів у компонентах суматора;
- 6.2) пірамідального типу на основі застосування однофазних неповних суматорів з прямими входами, прямими та інверсними виходами на основі логічного елемента "Виключаюче І", в якому, у порівнянні з відомими структурними рішеннями багаторозрядних пірамідальних суматорів такого класу на основі парафазних компонентів, досягнуто зменшення апаратної складності у 1,8 разів, зменшення структурної складності у 1,9 разів;
- 6.3) з прискореним переносом, в якому запропонована заміна дублювання багаторозрядних модулів суматора схемами формування сигналів прискорених переносів та інкрементними суматорами їх корекції, що дозволило зменшити структурну складність у 2 рази незалежно від розрядності вхідних двійкових чисел та підвищити ефективність застосування такого класу суматорів у багаторозрядних процесорах криптозахисту даних;
- 6.4) пристрій визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами, які двома АЦП паралельного типу перетворюються у паралельні унітарні коди, які на виходах логічних елементів "АБО" та "І" відповідно формують інверсний паралельний код Хаара більшого та меншого з них, коди яких перетворюються шифраторами у відповідний прямий та інверсний двійкові коди базису Радемахера. Отримані коди додаються в багаторозрядному двійковому суматорі, який містить логічну "1" у молодшому розряді, що дозволяє реалізувати операцію модульного віднімання

отриманих кодів шляхом додавання прямого та доповнюючого кодів більшого та меншого значень аналогового сигналу, що дозволило реалізувати визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами з затримкою сигналів 86 мікротактів, представлених 8-ми бітними двійковими кодами та об'ємом вибірки 256. У порівнянні з багатоканальним пристроєм визначення модульної кореляційної функції, запропонований пристрій дозволяє підвищити швидкодію у 14 разів та зменшити структурну складність на 1-2 порядки;

6.5) швидкодійний різницево-модульний квадратор у кодах Хаара-Крестенсона, який реалізує оцінку квадратичної Евклідової відстані  $Z = (x_i - y_i)^2$  згідно застосування АЦП з вихідними кодами Хаара-Крестенсона та модульної арифметики системи залишкових класів, що дозволило підвищити швидкодію визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами за 8 мікротактів, не залежно від діапазону їх квантування, а також дозволило ефективно застосувати такі пристрої у процесорах кореляційного та спектрального опрацювання сигналів, розпізнавання образів та ін.

#### 7) Перемножувачі у різних ТЧБ:

7.1) удосконалена структура перемножувача унітарних кодів у базисі Хаара-Крестенсона, які представляють діапазон квантування кольорів RGB-пікселів у діапазоні амплітуд  $0 \div 256$  рівнів, що дозволило, у порівнянні з відомим пристроєм, що реалізує обчислення у двійкових кодах базису Радемахера, підвищити швидкодію більш, ніж на 1 порядок, а також досягти більш високої регулярності мікроелектронної структури;

7.2) структура різницево-модульного квадратора, яка містить 2 АЦП паралельного типу з вихідними кодами у базисі Хаара-Крестенсона, реалізована шляхом застосування модульної арифметики СЗК та кодових матриць Хаара-Крестенсона. Запропонована структура

різничево-модульного квадратора у порівнянні з відповідним компонентом у пристрої визначення Хеммінгової віддалі дозволила підвищити швидкодію обчислень модульних різниць квадратів більше, ніж на 1 порядок. При діапазоні кодування вхідних чисел  $N = 255$ , що відповідає кількості рівнів квантування окремих кольорів RGB-пікселів, пристрій дозволяє реалізувати визначення Хеммінгової віддалі між пікселями кожного з кольорів зображень. При накопиченні кодів отриманих окремих різницевих квадратів, згідно матриці пікселів відеозображення, реалізується можливість розпізнавання двох зображень на основі інтегральної оцінки Хеммінгової віддалі у квадратичному Евклідовому просторі.

- 7.3) структура матричного перемножувача двійкових чисел, у якому застосовані запропоновані удосконалені структури однорозрядних неповних та повних суматорів, дозволила без зменшення швидкодії пристроєм зменшити його структурну складність, більше, ніж у 5 разів, а апаратну складність зменшити у 2,5 рази.
- 7.4) структура потокового перемножувача двійкових чисел, в якому шляхом розпаралелення процесів запису, перемноження та зчитування даних досягнуто зменшення структурної складності вхідних та вихідних шин  $4n/2$ , що у залежності від розрядності перемножувачів (512-2048 біт) відповідно складає (1024-4096) разів та без втрати швидкодії досягнуто зменшення у 2,5 рази апаратної складності перемножуваної матриці. У порівнянні з відомими поточковими перемножувачами досягнуто розширення функціональних можливостей шляхом застосування на вихідній шині логічного елемента "Виключаюче АБО", який дозволив здійснити перевірку достовірності результатів множення та криптозахист вихідних кодів реалізацією операції  $\oplus$  з біт-орієнтованою багаторозрядною кодовою послідовністю;

- 8) пристрій для визначення ентропії згідно інформаційної міри К.Шеннона, в якому шляхом структурного розпаралелення визначення мультиплікативних ймовірнісних та інтегральних функцій вилучено комутатор, що дозволило у порівнянні з відомими пристроями, підвищити регулярність структури, спростити топологію мікроелектронної реалізації на кристалі та досягнути зменшення структурної складності у 31,86 рази, апаратної складності - у 5,78 разів, підвищити швидкодію у 2,65 рази;
- 9) удосконалення структур протоколів обміну даними в мережах низових рівнів кіберфізичних систем шляхом використання надлишкових кодів на виходах АЦП при різних класах точності сенсорів дозволило, у порівнянні з відомими способами кодування результатів вимірювань, розширити можливості використання регістрових кодів та підвищити заводо захищеність запропонованих структур 4, 6, 7, 8-ми бітних кодів фреймів, що дозволило, у порівнянні зі стандартними протоколами HDLC, вилучити операцію "біт-стаффіngu" та ліквідувати випадкові зміни кількості бітів у пакетах даних. Крім того зменшення розрядності кодів фреймів дозволило спростити задачу телепортації без додаткових перетворень 4-бітних кодів алфавітно-цифрових даних, які формуються на виході синтезованих клавіатур;
- 10) удосконалена синтезована малогабаритна клавіатура, яка містить 16 клавіш, та спосіб введення алфавітно-цифрових даних шляхом формування символу двома 4-хбітними фрагментами, які об'єднуються згідно логічної функції  $a \wedge b \wedge c \wedge g_1 \vee g_2 \wedge d \wedge e \vee f$  компонентів структурно стилізованого зображення символів, що у порівнянні з відомими QWERTY-клавіатурами ПК, дозволило у 8 разів зменшити кількість клавіш, а також забезпечило криптозахист при передаванні алфавітно-цифрових даних шляхом застосування кодових масок, відомих тільки абонентам, які здійснюють обмін даними.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних досліджень та практичного їх впровадження у дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-технічну проблему розвитку теорії, методології та удосконалення структур поліфункціональних обчислювальних засобів, які є компонентами складних комп'ютерних систем.

При цьому отримано такі основні наукові теоретичні та прикладні результати:

1. На підставі аналізу сучасних теорії, методів та засобів формування, перетворення, передавання та цифрового опрацювання інформаційних потоків у складних КС запропоновано науково-обгрунтовану методологію та концепцію структуризації та удосконалення процесів поліфункціонального опрацювання аналогових та цифрових даних, яка, на відміну від відомих, дозволяє спростити процеси синтезованого формування та організації руху структуризованих даних та реалізувати обчислювальні засоби з розширеними функціональними можливостями та зменшеною структурною, апаратною та часовою складністю.

2. **Вперше розроблені** критерії структурної складності поліфункціональних даних на основі теорії графів, мереж Петрі, емерджентності, оцінки Квайна та класифікованих ознак ефективності атрибутів структур, що дозволило систематизувати структури та класи джерел інформації в багаторівневих РКС, які формують поліфункціональні дані. Також вперше класифіковані та систематизовані інформаційні взаємодії пар компонентів складних КС, що дозволило встановити систему їх типів: інформаційно-вимірювальні аналого-сигнальні та цифрові біт- та байт-орієнтовані дані, цифрові байт орієнтовані потоки даних, мережно-інтерфейсні сигнально-маніпульовані біт-орієнтовані дані.

3. Формалізовані системні характеристики джерел інформації у структурах РКС стосовно квазістаціонарних об'єктів. Розроблений функціонал контролю стану ОУ, який враховує масиви оцифрованих моніторингових



даних, технологічні стани, математичні сподівання, статистичні, кореляційні, спектральні, кластерні та ентропійні характеристики, а також логіко-статистичні інформаційні моделі контролю станів відхилень об'єкту від норми. Запропонований функціонал характеризується найбільш повною інформаційною ємністю у порівнянні з відомими, які застосовуються для моніторингу станів складних квазістаціонарних об'єктів.

4. Проведений аналіз методів ентропійного опрацювання структуризованих даних на основі оцінок мір ентропії, запропонованих Р.Хартлі, К.Шенноном, Я.Николайчуком. Показано, що міра ентропії Р. Хартлі є верхньою оцінкою і не враховує статистичні та динамічні характеристики ПФД, міра ентропії К. Шеннона враховує тільки ймовірнісні характеристики даних і не реагує на зміну кореляційних та спектральних характеристик вхідних даних. Визначення ентропії за оцінкою Я. Николайчука, яка враховує Марківські, кореляційні та спектральні характеристики даних, що дозволило, у порівнянні з ймовірнісними методами, підвищити інформативність оцінки ентропії ДІ з врахуванням статистичних розподілів та спектральних характеристик.

Результати проведених досліджень склали основи синтезу високопродуктивних процесорів визначення ентропії з глибоким розпаралеленням обчислювальних процесів.

5. **Вперше розроблені** основи теорії структуризації поліфункціональних компонентів складних комп'ютерних систем, здійснений диференційний аналіз елементів структур складних систем, структурно ідентифіковані інформаційні, матеріальні, енергетичні, електромагнітні, оптико-енергетичні та інші зв'язки, за допомогою яких елементи складних систем взаємодіють з середовищами ресурсів та користувачів, що дозволило систематизувати неповнофункціональні, транзитні та повнофункціональні компоненти з різними типами інформаційно-взаємодіючих зв'язків та здійснити перетворення та використання поліфункціональних інформаційних повідомлень, доведених до стану структуризованих даних.

6. **Вперше розроблений** метод кодування структуризованих даних у теоретико-числових базисах: унітарному, Радемахера, Крестенсона, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона, які застосовані для опрацювання цифрових відеозображень і, у порівнянні з відомими методами, дозволили на 2-3 порядки підвищити швидкість та зменшити обчислювальну складність цифрового перетворення та опрацювання двовимірних інформаційних даних пікселів RGB-стандарту колірного простору.

7. **Набув подальшого розвитку метод** криптозахисту ПФД в ТЧБ Галуа RGB-пікселів кольорових зображень, представлених кодами Хаара-Крестенсона, та вихідних кодів Радемахера матричних потокових перемножувачів шляхом згортки з багаторозрядними псевдовипадковими біт-орієнтованими послідовностями Галуа.

8. На основі проведеного аналізу методів структурних перетворень гармонічних сигналів на основі принципів рандомізації, нейропроцесорного опрацювання, на основі оцінки нормованого коефіцієнта взаємкореляції та цифрового інтегрального опрацювання функцій огинаючих низьких та високих частот та дослідження перехідних процесів у високовольтних електромережах при виникненні збурень типу: накидів, коротких замикань, запусків та відключень потужних електроприводів **вперше запропоновано** інтегрально-диференціальний метод розпізнавання збурень у високовольтних електромережах шляхом квадратичного перетворення структури гармонічних сигналів та накопичення інтегралу модульних різниць фазних струмів зсунутих на інтервал півперіода промислової частоти, що дозволило розробити цифрові решітчаті моделі для формалізації координат цифрових даних перехідних процесів та дискретні моделі коротких замикань в електромережах з експоненціальним спадом струму без спотворення та одночасним спотворенням гармонічного сигналу на інтервалі часу  $t_0 + \pi/2$  та  $t_0 + \pi/4$ . Отримані моделі стали основою для розробки структури спеціалізованого пристрою релейного захисту у високовольтних електромережах з характеристиками інваріантності до зміни

амплітуд фазних струмів при виникненні збурень та перехідних процесів у високовольтних ЛЕП.

9. На основі проведеного аналізу структурної та функціональної організації моніторингових систем **вперше запропонований** метод моніторингу станів квазістаціонарного об'єкта шляхом побудови образно-кластерної моделі контролю квазістаціонарних технологічних процесів на основі розробленого функціоналу станів технологічного процесу та побудови сукупності інформаційних, статистичних, кореляційних, спектральних, логіко-статистичних, кластерних та ентропійних моделей, який у порівнянні з відомими методами, дозволяє розпаралелити обчислювальні процеси розрахунку параметрів моделей та відобразити на моніторі оператора стан об'єкту контролю у вигляді структур образно-кластерних моделей із зменшеною структурною складністю на 2-3 порядки, які ідентифікують стани "норми", "розвитку аварії" та "аварії", що дозволяє підвищити реакцію оператора на відхилення технологічного процесу від норми та попередити виникнення аварійних ситуацій.

10. **Вперше розроблено** та реалізовано у мікроелектронному виконанні швидкодіючий АЦП паралельного типу на основі парафазних компараторів з розширеними функціональними можливостями та вихідними кодами у базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона, у якому, при розрядності вихідних кодів 10 біт, досягнуто зменшення апаратної складності, у порівнянні з відомими АЦП аналогічної розрядності, при наборі модулів вихідного коду Хаара-Крестенсона ( $P_1 = 32$ ,  $P_2 = 33$ ), у 14 разів, а при наборі модулів ( $P_1 = 7$ ,  $P_2 = 12$ ,  $P_3 = 13$ ) – у 8 разів.

11. **Вперше розроблені** та реалізовані у мікроелектронному виконанні структурні рішення однорозрядних неповних та повних, комутованих та некомутованих суматорів з однофазними прямими, інверсними та парафазними вхідно-виходами, а також багаторозрядних суматорів пірамідального типу та з прискореними переносами, які, у порівнянні з відомим суматорами названих

класів, дозволили досягнути гранично мінімаксних характеристик структурної, функціональної, апаратної та часової складності.

12. **Вперше розроблені** структури матричних та багаторозрядних потокових перемножувачів, які, у порівнянні з відомими перемножувачами на основі класичних однорозрядних повних суматорів, характеризуються підвищеною у 2 рази швидкодією, зменшеною структурною складністю у 5 разів, зменшеною структурною складністю входу-виходів у залежності від розрядності перемножувачів (512-2048 біт) відповідно у (1024-4096) разів. Досягнуто розширення функціональних можливостей, у порівнянні з потоковими перемножувачами, реалізацією функцій діагностування достовірності виконання операції множення та шифрування вихідних даних шляхом формування біт-орієнтованого потоку додавання по mod2 вихідних кодів з багаторозрядними псевдовипадковими послідовностями.

13. **Вперше розроблено** пристрій для визначення ентропії згідно інформаційної міри К.Шеннона, в якому шляхом структурного розпаралелення визначення мультиплікативних ймовірнісних та інтегральних функцій вилучено комутатор, що дозволило, у порівнянні з відомими пристроями, підвищити регулярність структури, спростити топологію мікроелектронної реалізації на кристалі та досягнути зменшення структурної складності у 31,86 рази, апаратної складності - у 5,78 разів, підвищити швидкодію у 2,65 рази.

14. **Вперше розроблена** структура мікроелектронного пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач, реалізованого шляхом конвеєрного різницево-модульного кореляційного опрацювання гармонічних сигналів промислової частоти 50 Гц, дозволила розпізнавати накиди, замикання на землю та запуски потужних електроприводів, у порівнянні з відомими, характеризується інваріантністю до амплітуди струмів збурень.

15. **Удосконалено** структуру протоколів обміну даними в мережах низових рівнів кіберфізичних систем шляхом використання надлишкових кодів на виходах АЦП при різних класах точності сенсорів, що дозволило, у порівнянні з відомими способами кодування результатів вимірювань, розширити можливості використання регістрових кодів та підвищити заводозахищеність

запропонованих структур 4, 6, 7, 8-ми бітних кодів фреймів, що дозволило, у порівнянні зі стандартними протоколами HDLC, вилучити операцію "біт-стаффінгу" та ліквідувати випадкові зміни кількості бітів у пакетах даних.

**16. Удосконалено метод** синтезованого формування алфавітно-цифрових даних на основі малогабаритної клавіатури, яка містить 16 клавіш та формує символи двома 4-бітними фрагментами, які об'єднуються згідно логічної функції  $a \wedge b \wedge c \wedge g_1 \vee g_2 \wedge d \wedge e \vee f$  компонентів структурно стилізованого зображення символів, що у порівнянні з відомими QWERTY-клавіатурами ПК, дозволило у 8 разів зменшити кількість клавіш, а також забезпечило криптозахист при передаванні алфавітно-цифрових даних шляхом застосування кодових масок, відомих тільки абонентам, які здійснюють обмін даними.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартин Дж. Организация баз данных в вычислительных системах : пер. с англ. / Дж. Мартин. – 2-е изд., доп. – М.: Мир, 1980 . – 662 с.
2. Мартин Дж. Программирование для вычислительных систем реального времени : пер. с англ. / Дж. Мартин. – М.: Наука, 1975 . – 360 с.
3. Мартин Дж. Вычислительные сети и распределенная обработка данных: программное обеспечение, методы и архитектура. Вып.2: пер. с англ. / Дж. Мартин. – М.: Финансы и статистика, 1986 . – 269 с.
4. Martin J., Design and strategy for distributed data processing, Prentice-Hall, 1981.
5. Фритч В. Применение микропроцессоров в системах управления / Фритч В.; пер. с нем. – М.: Мир, 1984. – 464 с.
6. Управляющие вычислительные машины в АСУ технологическими процессами / Под. ред. Т. Харрисона.- Т.1. – М.: Мир, 1975. – 230 с.
7. Управляющие вычислительные машины в АСУ технологическими процессами / Под. ред. Т. Харрисона /- Т.2. – М.: Мир, 1975. – 530 с.
8. Бат М. Спектральный анализ в геофизике / Бат М.; пер. с англ. – М.: Недра, 1980. – 535 с.
9. Томашевський В.М. Моделювання систем / Томашевський В.М. – К.: Видавнична група ВНУ, 2005. – 352 с.
10. Carl Adam Petri. Nets, time and space. Theoretical computer science, 153(12):3-48, 1996.
11. Carl Adam Petri. State-transition structures in physics and computation. International journal of theoretical physics, 21(12): 979-992, 1982.
12. Локазюк В.М. Інтелектуальне діагностування мікропроцесорних пристроїв та систем: Навч. посіб. для вузів / В.М. Локазюк, О.В. Поморова, А.О. Домінов – Хмельницький: ТУП, 2001. – 286 с.
13. Поморова О.В. Теоретичні основи, методи та засоби інтелектуального діагностування комп'ютерних систем. / О.В.Поморова // Монографія – Хмельницький: Тріада-М, 2007. – 252 с.

14. Зайцев Д.А. Декомпозиция сетей Петри / Д.А.Зайцев // Кибернетика и системный анализ. - 2004. - №5. - С.131-140.
15. Зайцев Д.А. Моделирование коммутируемой локальной сети раскрашенными сетями Петри / Д.А. Зайцев, Т.Р. Шмелёва // Зв'язок. - 2004. - Т. 46, № 2. - С.56-60.
16. Зайцев Д.А. Инварианты часовых сетей Петри / Д.А. Зайцев // Кибернетика и системный анализ. - 2004. - № 2. - С.92-106
17. Нікольський Ю.В. Дискретна математика: Підручник / Ю.В. Нікольський, В.В. Пасічник, Ю.М. Щербина. – Львів: "Магнолія 2006", 2007. – 608 с.
18. Глушков В. М. Основы безбумажной информатики / В. М. Глушков . – 2-е изд., испр . – М.: Наука, 1987 . – 552 с.
19. Глушков В. М. Моделирование развивающихся систем / В. М. Глушков, В.В. Иванов, В.М. Яненко. – М.: Наука, 1983. – 350 с.
20. Малиновский Б.Н. Введение в кибернетическую технику. Параллельные структуры и методы / Б.Н. Малиновский, В.П. Боюн Л.Г. Козлов – К.: Наукова думка, 1989. – 272 с.
21. Основы проектирования управляющих машин промышленного назначения. / Б.Н. Малиновский, И.А. Янович, В.М. Египко и др. - М.: Машиностроение, 1969. – 344 с.
22. Palagin A.V. Transdisciplinarity problems and the role of informatics / A.V. Palagin // Cybernetics and systems analysis. – 2013. - Т.49, № 5. – С.643-651.
23. Палагін О.В. Архітектурно-онтологічні принципи розбудови інтелектуальних інформаційних систем / О.В. Палагін, М.Г. Петренко // Математичні машини і системи. – 2006. – Т.1, №4. – С.15–20.
24. Palagin A. Informational model of natural language processing. / A. Palagin, V. Gladun, N. Petrenko [and others] // International journal "Information technologies and knowledge". – 2008. – Vol.2. – Pp.5-6.
25. Палагин А.В. Опыт разработки микропроцессорных распределенных систем реального времени / А.В. Палагин, Я.Н. Николайчук – К.: Знание, 1988. – 19 с.

27. Палагин А.В. Концепция системной интеграции в инновационных стратегиях / А.В.Палагин // Управляющие системы и машины. – 2001. - №2. – С.6-9.
27. Сергиенко И.В. Системный анализ многокомпонентных распределенных систем / И.В. Сергиенко, В.С. Дейнека - Киев: Наук. думка, 2009. – 640с.
28. Sergienko I.V. Optimal control of distributed systems with conjugation conditions / I.V. Sergienko, V.S. Deineka – New York: Kluwer academic publishers, 2005. – 400 p.
29. Боюн В.П. Інтелектуальні комп'ютерні системи сприйняття і обробки фізичної інформації / В.П. Боюн // Вісник НАН України. – 2015. - №5. – С.82-84.
30. Боюн В.П. Сприйняття і обробка зображень в системах реального часу. / В.П.Боюн // Штучний інтелект – 2013. – №3(61). – С.114-125.
31. Boyun V. Intelligent selective perception of visual information in visual systems. / V. Boyun // Preceedings the of 6-th IEEE international conference on intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and applicatins. - 2011, Prague, Czech Republic, Vol.1, pp. 412-416.
32. Задірака В.К. Комп'ютерна криптологія: Підручник / В.К. Задірака, О.С. Олексюк. – Київ, 2002. – 504 с.
33. Задірака В.К. Комп'ютерна арифметика багаторозрядних чисел: Наукове видання / В.К. Задірака, О.С. Олексюк. – Київ. –2003. – 264 с.
34. Карцев М.А. Арифметика цифровых машин / М.А.Карцев – М.: Наука, 1969 – 576с.
- 35 Майоров С.А. Принципы организации цифровых машин / С.А. Майоров, Г.И. Новиков - . Л.: Машиностроение, 1974. – 432 с.
36. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехніка: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е.П. Угрюмов – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 800 с.
37. Кондалев А.И. Высокопроизводительные преобразователи формы информации / Кондалев А.И. и др. – К.: Наук. думка, 1987. – 280 с.
38. Корнейчук В.И. Основы компьютерной арифметики / В.И. Корнейчук, В.П. Тарасенко – К.: Вища школа. – 2003. - С. 34-56.



39. Самофалов К.Г. Цифровые ЭВМ / К.Г. Самофалов, В.И. Корнейчук, В.П. Тарасенко// – СПб.: Вища школа – К. – 2000. – 528 с.
40. Черкаський М.В. Аналіз складності пристроїв помноження / М.В.Черкаський, Мурад Хусейн Халіл // Вісник НУЛП "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика" – Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2005. - №548. – С.15-21.
41. Черкаський М.В. Складність пристрою керування / М.В.Черкаський, Мурад Хусейн Халіл // Вісник НУЛП "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології". – Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2004. - №521. - С.3-7.
42. Кривуля Г.Ф. Комп'ютерна схемотехніка: підручник / Г.Ф. Кривуля та ін. - Луганськ: Видавництво СХУ ім.В.Даля, 2009. - 744 с.
43. Мельник А.О. Архітектура комп'ютера. / А.О.Мельник - Луцьк: Волинська обласна друкарня, 2008. - 470 с.
44. Мельник А.О. Персональні суперкомп'ютери: архітектура, проектування, застосування: Монографія / А.О. Мельник, В.А. Мельник. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2013. – 516 с.
45. Мельник А.О. Пам'ять із впорядкованим доступом. Монографія / А.О. Мельник. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 296 с.
46. Viktor Melnyk Security architecture technical investigation for IEEE 802.15.4 low-rate wireless personal area networks / V.Melnyk // Scientific-technical journal "Advances in cyber-physical systems". Vol. 3, No. 2, 2018. – pp.92–111.
47. Мичуда З.Р. Аналіз електронних пристроїв автоматики: Навч.посібник / З.Р. Мичуда - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. - 92с.
48. Мичуда З.Р. Слідкуючий логарифмічний аналого-цифровий перетворювач / З.Р. Мичуда, Л.З. Мичуда, І.А. Костів // Вісник НУЛП "Автоматика, вимірювання та керування" - Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2016. - Вип.852. - С.77-82.
49. Мичуда З.Р. Інтегральні аналого-цифрові перетворювачі з логарифмічною характеристикою перетворення. Огляд / З.Р. Мичуда, Л.З. Мичуда, Г.С. Єлісеєва // Вісник НУЛП "Автоматика, вимірювання та керування" -

Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2017. - Вип. 880, С.31-39.

50. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації / Я.М. Николайчук – Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф", 2010. – 536 с.
51. Николайчук Я.М. Коды поля Галуа: теория та застосування / Я.М. Николайчук // Монографія - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф", 2012. – 576 с.
52. Methods of Effective Protection of Information Flows / edited by Valeriy Zadiraka, Yaroslav Nykolaichuk. - Ternopil: Terno-graf, 2014. - 308 p.
53. J.Nukolaychuk Theoretical principles and development of modern cryptography // Computer technologies for information security / edited by V. Harbarchuk, W. Wojcik and V. Zadiraka – Lublin: Politechnika Lubelska, 2011. – P.13-37, 254-323.
54. Дунець Р.Б. Підхід до класифікації комунікаційних середовищ мереж на кристалі / Р.Б.Дунець // Вісник НУЛП “Комп’ютерні системи та мережі”. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2014. – № 806. – С.57–61.
55. Дунець Р.Б. Исследование матричных методов представления поточных графов алгоритмов / Р.Б. Дунець, В.М. Грига // Вестник "Физика, математика, информатика" – Брест: Брестский государственный технический университет, 2013. – №5(83) – С.41–46.
56. Дрозд М.О. Моделі контролепридатності цифрових компонентів в системах критичного застосування / М.О. Дрозд, О.В. Дрозд, І.М. Ніколенко // Холодильна техніка та технологія, 2014. - № 3. - С.69-72.
57. Дрозд А.В. Базовые концепции функционального диагностирования вычислительных устройств для приближенной обработки данных // Электронное моделирование, 2003. – Т.25. № 1. – С.73–79.
58. Застосування багатопроцесорних систем для удосконалення технологічних процесів / Г.Г. Швачич, С.Г. Семенов, Т.П. Карпова, В.В. Волнянський // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський національний університет повітряних сил ім.І.Кожедуба, 2016. - Вип. 3. - С.221-226.

59. Швачич Г. Г. Некоторые аспекты организации информационной безопасности функционирования многопроцессорных вычислительных систем / Г.Г. Швачич, Е.В. Иващенко, В.В. Бусыгин // Сучасні інформаційні системи, 2017. – Т.1, № 2. – С.62-69.
60. Модель расчета временных границ проектов разработки программного обеспечения / Г.Г Швачич, С.Г. Семенов, М.И. Главчев, Халифе Кассем // Системи управління, навігації та зв'язку, 2017. - Том 1, № 41. – С.43-49.
61. Семенов С. Г. Аналіз методів управління передачею відеопотоку даних та вимог до якості їх передавання / С.Г. Семенов, О.В. Ліпчанська, М.В. Ліпчанський // Системи управління, навігації та зв'язку, 2018. - Вип.3. - С.139-142.
62. Глухов В.С. Оцінка структурної складності багатосекційних помножувачів елементів полів Галуа / В.С. Глухов, Г.М. Трищ // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – Львів, 2014. – Вип.806. – С.27-33.
63. Основи метрології та вимірювальної техніки: підруч.; в 2-х т. / М.М. Дорожовець, В.П. Мотало, Б.І. Стадник та ін.; за ред. Б.І. Стадника. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. – Т.2. Вимірювальна техніка. – 656 с.
64. Метрологія та вимірювання: Навч.посіб. / М. Дорожовець, Р. Івах, В. Мотало [та ін.]; за наук. ред. Б.І. Стадника. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 312 с.
65. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань: Навч.посіб. / М. Дорожовець. - Львів: Вид-во Нац.ун-ту "Львівська політехніка", 2007. – 624 с.
66. Вимірювальні перетворювачі: сенсори: підручник / В.М.Ванько, Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець [та ін.]; за ред. Є.С. Поліщука та В.М. Ванька. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 584 с.
67. Залмазон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л.А. Залмазон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.

68. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Н.Ахмед, К.Р.Рао / пер. с англ. Т. Э. Кренкеля. - М.: Связь, 1980. – 248 с.
69. Fourier Joseph (1821). Rapport sur les tontines. Paris: Memoirs of the Royal Academy of Sciences of the Institut de France. P. 26–43.
70. Fourier Joseph (1833). Mémoire d'analyse sur le mouvement de la chaleur dans les fluides. Paris: Memoirs of the Royal Academy of Sciences of the Institut de France. P. 507–530.
- 71 Omondi B. Residue number systems: Theory and implementation / B. Omondi, S. Premkumar. - World scientific publishing Co. Pte. Ltd. - 2007. - 296 p.
72. High performance computing systems and applications / Douglas J.K. Mewhort, Natalie M. Cann, Gary W. Slater, Thomas J. Naughton - Springer Science & Business Media, 2010. – 418 p.
73. Hosseinzadeh M. New design of 4-3 compressor / M. Hosseinzadeh, K. Navi and S. Timarchi // 11th international CSI computer conference of Iran, 2006. – P.101-103.
74. Hosseinzadeh M. A. Novel multiple valued logic OHRNS modulo  $m$  adder Circuit / M.A. Hosseinzadeh, S.J. Jassbi and K. Navi // International journal of electronics, Circuits and systems. - Vol.1, No.4, 2007. - P.245-249.
75. Lenstra H.W. Divisors in residue classes / H.W. Lenstra // Math. Comput, 1984. - Vol.42, No.165. - P.331-340.
76. Lakhani G. Some fast residual arithmetic adders / G. Lakhani // International journal of electronics, 1994. - P. 225-240.
- 77 The implementation of real-time network traffic monitoring service with network functions virtualization. Y.Yang, W.Cheng, C.Yang, S.Chen, F.Jian / Proceedings of the 2015 IEEE international conference on cloud computing and big data (CCBD); Taipei, Taiwan. 4-6 November 2015; pp.279-286.
78. Yang L.L. A residue number system based parallel communication scheme using orthogonal signaling: Part II-Multipath fading channels / L.L. Yang, L. Hanzo // IEEE Trans. Veh. Technol, 2002. - Vol. 51. – P.1541-1553.

79. Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий – М: Сов.радио, 1986. – 440 с.
80. Амербаев В.М. Теоретические основы машинной арифметики / В.М. Амербаев; АН КазССР, Ин-т математики и механики. - Алма-Ата: Наука, 1976. - 324 с.
81. Анализ и синтез арифметического узла проф. Пospelова Д.А. поля Галуа / В.М. Амербаев, Е.С. Балака, Р.А. Соловьев, Д.В. Тельпухов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем, 2014. - №4. – С.179-182.
82. Амербаев В.М. Реализация библиотеки модульных арифметических операций на основе алгоритмов минимизации логических функций / В.М. Амербаев, Р.А. Соловьев, Д.В. Тельпухов // Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2013. – № 7 (144). – С.221–225.
83. Брюхович Е.И. Экономическая стратегия разработки вычислительных систем: место и роль счислений / Е.И. Брюхович // Управляющие системы и машины, 1990. – №2. – С.3-18.
84. Николайчук Я.М. Методы цифровой обработки шумоподобных сигналов на основе кодовых систем / Я.М. Николайчук, Б.М. Шевчук – Киев, Сб. тр. ИКАН УССР, 1988.
85. Николайчук Я.М. Теорія цифрових перетворень мультибазисного супершвидкодіючого процесора / Я.М. Николайчук // Искусственный интеллект, 2008. – №4. – С.387-394.
86. Глухов В.С. Особливості виконання операцій над матрицями в полях Галуа // Вісник НУЛП "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика". Вип.564. Львів, 2006. - С. 35–37.
87. Глухов В.С. Порівняння поліноміального та нормального базисів представлення елементів полів Галуа / В.С. Глухов // Вісник НУЛП "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика". Вип.591. Львів, 2007. - С.22–27.

88. Виноградов И.М. Основы теории чисел / И.М. Виноградов. – М.: Наука, 1981. – 176 с.
89. Бухштаб А.А. Теория чисел / А.А.Бухштаб. – М.: Просвещение, 1966. – 384с
90. Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці: Монографія / за загальною редакцією Я.М. Николайчука. – Тернопіль: "Бескиди", 2017. – 919 с.
91. Natalia Vozna Theory and methods of development of data flow models in distributed CS / N. Vozna // Advanced computer system and network: design and application: Proceedings of the 4-th international conference ACSN-2009. - Lviv, 2009. - P.304-307.
92. Modeling of movement and correlation data processing in computer systems / Y. Nykolajchuk, A. Segin, L. Nykolajchuk, N. Vozna // Proceedings of the XI international conference TCSET'2012. - Lviv, 2012. - PP. 374-375.
93. Возна Н.Я Теорія та методи побудови моделей руху даних у розподілених КС // Вісник НУЛП "Комп'ютерні системи та мережі", 2010. - №688. – С.60-64.
94. Возна Н.Я. Формалізація моделей руху даних розподілених комп'ютерних систем та оцінювання їх структурної складності // Вісник Тернопільського національного технічного університету ім.І.Пулюя, 2011. - №1. Т.16. – С.167-179.
95. Николайчук Я.М. Теорія моделей руху даних розподілених комп'ютерних систем: Монографія / Я.М.Николайчук, І.Р.Пітух, Н.Я.Возна. - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф", 2008 – 216 с.
96. Nykolaichuk Ya.M. Structuring the movement of data in computer systems / Ya.M. Nykolaichuk, N.Ya. Vozna, I.R. Pitukh. - Ternopil: Terno-graf, 2013. - 284 p.
97. Возна Н.Я. Структуризація поліфункціональних даних: теорія, методи та засоби / Н.Я. Возна // Монографія. – Тернопіль: ТНЕУ, 2018. – 378 с.
98. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем: Навчальний посібник / Я.М.Николайчук, Н.Я.Возна, І.Р.Пітух. - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф", 2010. – 392 с.

99. L.ászl.o Babai. E-mail and the unexpected power of interaction. In proceedings, fifth annual structure in complexity theory conference, pp.30-44, Barcelona, Spain, 8–11 July 1990. IEEE Computer Society Press.
100. L.ászl.o Babai, Lance Fortnow, and Lund Lund. Non-deterministic exponential time has two-prover interactive protocols. *Computational Complexity*, 1:3–40, 1991.
101. J. Beck. An algorithmic approach to the lov`asz local lemma. *Random Structures and Algorithms*, 2(4): 367–378, 1991.
102. Russell Impagliazzo. A personal view of average-case complexity. In structure in complexity theory conference, pp.134-147, 1995.
103. Michael Sipser. Expanders, randomness, or time versus space. *Journal of computer and system sciences*, 36(3):379–383, June 1988. Prelim. version in Proc. IEEE Structure in Complexity'86.
104. Noga Alon and Ravi B. Boppana. The monotone circuit complexity of boolean functions. *Combinatorica*, 7(1):1–22, 1987.
105. Romas Aleliunas, Richard M. Karp, Lipton Lipton, Laszlo Lov.asz, and Charles Rackoff. Random walks, universal traversal sequences, and the complexity of maze problems. / 20th annual symposium on foundations of computer science, pp.218-223, San Juan, Puerto Rico, 29-31 October 1979. IEEE.
106. David A. Mix Barrington, Richard Beigel, and Rudich Rudich. Representing Boolean functions as polynomials modulo composite numbers. *Computational Complexity*, 4(4):367–382, 1994. Prelim. version in ACM STOC 1992.
107. H. Buhrman and R. de Wolf. Complexity measures and decision tree complexity: A survey. *Theoretical computer science*, 288:21-43, 2002.
108. Yongming Xie, Guojun Wang. Message matching-based greedy behavior detection in delaytolerant networks. *Journal of computer and system sciences*. – Vol.80, Issue 5, 2014. - pp.903-915.
109. Yi Li, Huy L. Nguyễn, David P. WoodruffRead. On approximating matrix norms in data streams. *SIAM Journal on Computing*. – Vol.48, Issue 6, 2019. – pp.1643–1697.

110. J.Hartmanis and R.E. Stearns. On the computational complexity of algorithms. Transactions of the American mathematical society, 117:285–306, 1965.
111. R.M. Karp. Reducibility among combinatorial problems. In R.E. Miller and J.W. Thatcher, editors, Complexity of computer computations, pp.85–103. Plenum, New York, 1972.
112. Mauricio Karchmer, Ran Raz, Avi Wigderson. Super-logarithmic depth lower bounds via the direct sum in communication complexity. Computational Complexity, 5(3/4):191–204, 1995.
113. Dan C. Marinescu Complex Systems and Clouds: A Self-Organization and Self-Management Perspective / Dan Marinescu // Elsevier, Morgan Kaufmann, 2016. – 238 p.
114. C.Papadimitriou, M.Yannakakis. Optimization, approximation, and complexity classes. Journal of Computer and System Sciences, 43(3):425–440, December 1991. Prelim version STOC 1988.
115. R.Raz and B.Spieker. On the "log rank" - conjecture in communication complexity. Combinatorica, 15, 1995. Prelim version in IEEE FOCS 1993.
116. A.C.C. Yao. Some complexity questions related to distributive computing (preliminary report). In STOC '79: Proceedings of the 11th ACM STOC, pp.209–213. ACM Press, 1979.
117. A.Yao. Quantum circuit complexity. In 34th Annual Symposium on foundations of computer science, pp.352-361, Palo Alto, California, 1993. IEEE.
118. Structuring Big Data: How Financial Models May Help Thierry Warin, William Sanger. Journal of computer science and information technology, Vol.2(1), March 2014, pp. 01-20.
119. C.H. Papadimitriou. Computational Complexity / by Christos H. Papadimitriou - Addison-Wesley, 1994. – 523 p.
120. Hong Jia-Wei. Computation: Computability, Similarity and Duality: Research notes in theoretical computer science / Hong Jia-Wei. – New York: John Wiley & Sons, 1986. – 236 p.
121. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник / И. Гайдышев – СПб: Питер, 2001. – 752с.



122. Dyvak M. Identification of "input-output" dynamic model of the electrical circuits on the basis of interval data / M. Dyvak, P. Stakhiv, I. Calishchuc // Przegląd elektrotechniczny (Organ stowarzyszenia elektryków Polskich), Vol.2, 2005. –pp. 60-62.
123. Dyvak M. Problems of mathematical modeling of static systems with the interval data / M. Dyvak. - Ternopil: Publishers TNEU "Economichna Dumka, 2011. – 216 p.
124. Dyvak M. Interval model for identification of laryngeal nerves / M. Dyvak, A. Pukas, O. Kozak // Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R.86 NR 1/2010, pp.139-140.
125. Teslyuk V.M. Development of smart house system model based on colored Petri nets / V.M. Teslyuk, V.V. Beregovskiy, A.I. Pukach // Workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory DIPED — 2013: proc. of the XVIIIth international seminar - Lviv, Ukraine, 2013. - P. 205 - 208.
126. V.Teslyuk Method for automated synthesis of micromodels of plate based elements of MEMS / V.Teslyuk, R.Kryvyu // Радіоелектроніка та інформатика, 2012. - No.4 (59). - С.99-102.
127. Kis Y.P. Methods and tools of authentication biometric data in information systems / Y.P.Kis, V.M.Teslyuk // Actual problems of economics, 2012. - №12138. - P.174-182.
128. Возна Н.Я. Теорія моделей джерел інформації та формування ідентифіковано-структуризованих даних комп'ютеризованих систем / Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук // Искусственный интеллект, 2009. - №1. – С.26-34.
129. Vozna N. Theory of data structuring in information computerized systems // Computer technologies in information security / edited by Valeriy Zadiraka, Yaroslav Nykolaichuk / Natalia Vozna - Ternopil: "Kart-blansh", 2015. - PP.92-139.
130. Возна Н.Я. Архітектура та базові функції мобільного адаптера низового рівня розподіленої комп'ютерної системи / Н.Я. Возна, М.І. Чирка //

Поступ в науку. Збірник наукових праць Бучацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач, 2009. - №5. Т1. – С.77-82.

131. Метод синтезованого формування та передавання алфавітно-цифрових даних з підвищеним захистом від несанкціонованого доступу / Г.В. Возна, В.В. Шевчук, Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна // Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю АСІТ'2017. – Тернопіль: ТНЕУ, 2017. – С.50-52.
132. Возна Н.Я. Метод формування та організації руху даних у розподілених комп'ютерних системах на основі багаторівневих матричних моделей / Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук // Праці міжнародного симпозиуму: "Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXV)". – Київ: Інститут кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України, 2009. – Т.1. – С.120-125.
133. Возна Н.Я. Моделі руху даних у комп'ютерних системах з розпаралеленими інформаційними потоками / Н.Я. Возна, І.Р. Пітух // Праці міжнародного симпозиуму: "Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXV)". – Київ: Інститут кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України, 2009. – Т.1. – С.126-131.
134. Vozna N. Information technology traffic data in the banking system based on multi-matrix models / Natalia Vozna, Alina Davletova, Igor Pituh // Proceedings of the 10th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering TCSET'2010. - Lviv, 2010. - P.267.
135. Возна Н.Я. Теорія та методологія побудови інтерактивних матричних моделей руху даних / Н.Я.Возна, І.Р. Пітух // Поступ в науку. Збірник наукових праць Бучацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач, 2010. -- №6. Т1. – С.49-52.
136. Nykolaychuk Y. Integrated Theory of Analytical Defined and Multifunktional Data Structuring / Yaroslav Nykolaychuk, Nataliia Vozna // Proceedings of XIIIth International Conference CADSM'2015. - Lviv, 2015. - PP.147-151.
137. Information technologi distribution designing computer systems based on models of data traffic / Ya. Nykolaychuk, I. Pituh, N. Vozna, Yu. Franco //

Proceedings of XIth International Conference CADSM'2011. - Lviv, 2011 – P.200.

138. Концепція інформаційного моделювання руху структуризованих даних та взаємодії суб'єктів юриспруденції / Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, І.Р. Пітух, Л.М. Николайчук // Праці міжнародної молодіжної математичної школи "Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXVII)". - Київ: Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, 2011. - С.138-139.
139. Возна Н.Я. Концепція вирішення проблеми формування та опрацювання структуризованих даних у розподілених комп'ютерних системах / Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук // Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції "Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості". - Ів.-Фр., 2013. - С.50-51.
140. Возна Н.Я. Метод формування структуризованих даних квазістаціонарних об'єктів на основі системи числення залишкових класів базису Крестенсона / Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук, Н.Г. Ширмовська // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Ів.Фр., 2011. - №3(40). – С.62-65.
141. Николайчук Я.М. Дослідження системних функцій та архітектури інтерактивних комп'ютерних мереж / Я.М. Николайчук, Р.В. Цанько, Н.Я. Возна // Вісник Хмельницького національного університету - Хмельницький, 2012. - №4 (191). - С.73-78.
142. Николайчук Я.М. Протоколи та інтерфейси фреймів даних в сучасних комп'ютерних мережах / Я.М. Николайчук, Р.В. Цанько, Н.Я. Возна // Поступ в науку. Збірник наукових праць Буцацького інституту менеджменту і аудиту. - Бучач, 2012. - №8. - С.153-157.
143. Возна Н.Я. Теоретичні основи руху структуризованих даних в інтерактивних комп'ютерних системах. / Н.Я. Возна, І.М. Панчук, М.М. Прокіпчук // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2013. - Тернопіль: ТНЕУ, 2013. - С.96-97.

144. Возна Н.Я. Аналіз надлишковості передавання даних в протоколах сучасних комп'ютерних мереж / Н.Я. Возна, А.І. Дмитрів, Ю.В. Собчак. // Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2014. – Тернопіль: ТНЕУ, 2014. – С.57-58
145. Пітух І.Р. Оптимізація алгоритмів формування інтерфейсів в інтерактивних комп'ютерних системах / І.Р. Пітух, Н.Я. Возна // Праці VII міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень". – Ужгород: УжНУ, 2014. – С.202-203.
146. Возна Н.Я. Дослідження ефективності складних інформаційних систем. / Н.Я. Возна, О.М. Ключка, Н.І. Марканич // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2012. - Тернопіль: ТНЕУ, 2012. - С.84-85.
147. Возна Н.Я. Основи теорії, функції та задачі структуризації даних в інформаційних системах / Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук // Праці міжнародної наукової конференції "Питання оптимізації обчислень (ПОО-ХЛ)". - Київ: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2013. - С.56-57.
148. Методи спектрального косинусного перетворення Фур'є для розпізнавання сигналів у Хеммінговому просторі на основі різних кореляційних функцій та теоретико-числових базисів / Я. Николайчук, В. Піх, Т. Заведюк, Н. Возна // Вісник національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", 2013. - №773. - С. 89-98.
149. Метод структуризації дискретного косинусного преобразования Фурье в модульной арифметике теоретико-числового базиса Хаара–Крестенсона / Я.Н. Николайчук, Н.Я. Возна, Б.Б. Круликовский, В.Я. Пих // Кибернетика и системный анализ, 2018. – Том 54, №3. - С.178-188.
150. Vozna N.Ya. Conception and Theoretical Bases for Solving the Problem of Data Structuring in Information Computerized Systems / N.Ya. Vozna , Ya.M. Nycolaychuk , N.I. Alishov // Journal of qafqaz university. Mathematics and computer science. - Baku. Azerbaijan, 2013. - Volume 1, №2. - P.112–117.

151. The concept of data structuring based on entropy forming, transmission and processing methods of information flows / Nataliya Vozna, Artur Voronych, Taras Pastuh, Volodymyr Gladyuk // Proceedings of the International Conference TCSET'2014. - Lviv, 2014. - PP.549-551.
152. Метод прийняття рішень структуризованої ідентифікації станів промислових об'єктів в інтерактивних комп'ютеризованих системах / Н.Я. Возна, Г.Я. Процюк, І.Р. Пітух, Я.М. Николайчук // Праці VIII міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень". – Ужгород: УжНУ, 2016. – С.64-65.
153. Возна Н.Я. Теоретичні основи методу оцінки ентропії структуризованих даних / Н.Я. Возна, Т.І. Пастух // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електротехніка". – Рівне: НУВГП, 2016. – С.109-111.
154. Multichannel system for structuring and transmission entropy-manipulated cipher signals / Artur Voronych, Nataliya Vozna, Oleg Zastavnyy, Taras Pastukh, Taras Grynchyshyn // Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering TCSET'2018. – PP.295-299.
155. Люра О.П. Структура алгоритму розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних промислових електромережах / О.П. Люра, Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна // Збірник матеріалів міжнародної координаційної наради ISCM-2014. – Тернопіль, 2014. – С.216-222.
156. Ідентифікація структуризованих даних на основі нелінійного квадратично-імпульсного перетворення / Н.Я. Возна, Т.М. Заведюк, Я.М. Николайчук [та ін.] // Праці VII міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень". – Ужгород: УжНУ, 2014. - С.60-61.
157. Возна Н.Я. Метод структурного розпізнавання накидів та коротких замикань в ЛЕП / Н.Я. Возна, О.П. Люра // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції "Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості". - Івано-Франківськ, 2015. – С.180-181.

158. Метод розпізнавання та ідентифікації накидів та замикань на землю у високовольтних лініях електропередач / Н.Я. Возна, О.П. Люра, І.О. Сабадаш, І.І. Островка // Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. - Львів, 2018. - №28(1). - С.79-84.
159. Метод структуризации образно-кластерной модели состояний квазистационарного объекта управления / Н.Я. Возна, Н.И. Алишов, Г.Я. Процюк, Я.Н. Николайчук // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. - Baku. Azerbaijan, 2015. - Volume 3, № 2. - P.105-115.
160. System complexity criteria and synthesis of high-performance multifunctional parallel ADC in Rademacher's and Haar-Krestenson's theoretical and numerical bases / N. Vozna, Ya. Nykolaichuk, O. Zastavnyy, V. Pikh // Proceedings of the 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CADSM'2017. - PP.218-221.
161. Возна Н.Я. Критерій структурної складності та оцінки розширеної Хеммінгової віддалі для просторових об'єктів / Н.Я. Возна, А.І. Сидор // Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. – Львів, 2017. - №27(4). - С.159-165.
162. Круліковський Б.Б. Теоретичні основи та критерії оцінки структурної складності обчислювальних компонентів процесорів багаторозрядної арифметики / Б.Б. Круліковський, Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук // Вісник національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. - Рівне: НУВГП, 2014. - №1(65). – С.527-538.
163. Пат.107904 Україна МПК G06F 3/023 (2006.01) Пристрій для введення алфавітно-цифрових даних / Николайчук Я.М., Мельник А.О., Возна Н.Я., Мельник В.А. №а201404203; заявл.18.04.2014; опубл.25.02.2015, Бюл. №4/2015.
164. Image-cluster method of data structuring of multiprsmeter objects monitoring of interactive computer systems / N. Vozna, H. Protsiuk, I. Pituh, Y. Nykolaychuk // Proceedings of XIIIth International Conference CADSM'2015. - Lviv, 2015. - PP.295-299.

165. Проблеми структуризації інформатики моніторингу нафтових родовищ та захисту водних ресурсів Карпат / Я.М. Николайчук, Б.Б. Круліковський, Н.Я. Возна, Г.Я. Процюк // Вісник національного університету водного господарства та природокористування. - Рівне, 2015. - №3(71) Ч.2. – С.258-264.
166. Возна Н.Я. Характеристики та кількісні оцінки структуризованої інформації // Матеріали VI Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2016. – Тернопіль: ТНЕУ, 2016. – С.41-42.
167. Пат. 107039 Україна МПК G05B 23/00 (2016.01), G06F 11/277 (2006.01) Спосіб контролю параметрів технологічного процесу / Пітух І.Р., Возна Н.Я., Процюк Г.Я., Николайчук Я.М. №u201507057; заявл.15.04.2015; опубл.25.05.2016, Бюл. №10/2016.
168. Структуризація, методи та моделі інтерактивної взаємодії оператор – інформаційна система моніторингу об'єктів нафтогазової галузі / Н.Я. Возна, Г.Я. Процюк, І.Р. Пітух, Я.М. Николайчук // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - Івано-Франківськ, 2015. - №2(55). – С.111-118.
169. Пат.103938 Україна МПК H02H 9/00 (2015.01) Пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач / Николайчук Я.М., Возна Н.Я., Люра О.П., Островка І.І., Сабадаш І.І. №u201505713; заявл.09.06.2015; опубл.12.01.2016, Бюл. №1/2016.
170. Project of structural solutions and components of special processor of relay protection in high-voltage lines of electricity transmission / O. Liura, I. Sabadash, N. Vozna, I. Ostrovka // Proceedings of XIIIth International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: MEMSTECH'2017. - PP.70-73.
171. Люра О.П. Дослідження та оптимізація характеристик компонентів мікроелектронного пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач / О.П.Люра, Н.Я.Возна // Науковий вісник НЛТУ

України: збірник науково-технічних праць. Львів: НЛТУ України - 2017. - №27(5). - С.148-154

172. Люра О.П. Пристрої релейного захисту та компоненти спецпроцесора визначення квадратично-імпульсної функції / О.П.Люра, Н.Я.Возна // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства", Надвірна, 2018. – С.130-134
173. Возна Н.Я. Образно-кластерна модель ідентифікації технологічних станів промислових об'єктів управління / Н.Я. Возна, Г.Я. Процюк // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства". – Івано-Франківськ, 2016. – С.77-82.
174. The method to optimize structural, hardware and time complexities characteristics multi-bit adders of special processors for data encryption / V. Krulikovskiy, N. Vozna, V. Kimak, A. Davletova // Proceedings of the XIII the International Conference TCSET'2016. - PP. 455-459.
175. Пат. 124563 Україна МПК G06F 7/00 (2018.01) Повний однорозрядний суматор / Николайчук Я.М., Грига В.М.,Возна Н.Я., Давлетова А.Я. № u 2017 11720 заявл.30.11.2017; опубл.10.04.2018, Бюл. №7/2018.
176. Concept of construction and structural organization of interactive systems of adaptive distance learning / Yu.P. Franko, I.R. Pitukh, N.Ya. Vozna, M.V. Pikuliak // International scientific professional periodical journal "The unity of science". - Vienna. Austria, April, 2016. - P.68–70.
177. System for monitoring the quasi-stationary technological processes based on image-cluster model / Yaroslav Nykolaichuk, Ihor Pitukh, Nataliia Vozna [and others] // Proceeding of the 2017 IEEE 9th International conference on intelligent data acquisition and advanced computing systems: IDAACS'2017. - 2017. - P.712-715.
178. Возна Н.Я. Метод структуризації інформаційних потоків для відображення технологічних станів на електричній підстанції // Вісник Хмельницького національного університету. - Хмельницький, 2018.- №1 (257) - С.94-101.



179. Пат.107811 Україна МПК G06B 7/38 (2006.01) Числоімпульсний множильний пристрій / Давлетова А.Я., Круліковський Б.Б., Николайчук Я.М., Возна Н.Я. №u201512080; заявл.07.12.2015; опубл.24.06.2016, Бюл. №12/2016.
180. Пат.132145 Україна МПК G06F 7/00 (2018.01) G06F 7/40 (2006.01) Різницево-модульний квадратор / Сидор А.І., Николайчук Я.М., Возна Н.Я. № u 2018 09550 заявл.24.09.2018; опубл.11.02.2019, Бюл. №3/2019.
181. Пат.109136 Україна МПК G06F 7/00 (2006.01) Однорозрядний суматор / Круліковський Б.Б., Давлетова А.Я., Возна Н.Я., Николайчук Я.М.. №u201602122; заявл.04.03.2016; опубл.10.08.2016, Бюл. №15/2016.
182. Пат.109142 Україна МПК G06F 7/00 (2016.01) Однорозрядний суматор / Давлетова А.Я., Круліковський Б.Б., Возна Н.Я., Николайчук Я.М. №u201602165; заявл.04.03.2016; опубл.10.08.2016, Бюл. №15/2016.
183. Метод розпізнавання сигналів на основі критерію ентропійно-структурної складності / Н.Я. Возна, Т.І. Пастух, А.Р. Воронич, В.С. Білінський // Праці VIII міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень". – Ужгород: УжНУ, 2016. – С.62-63
184. Заставний О.М. Структура та системні характеристики високопродуктивного АЦП у теоретико-числових базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона / О.М. Заставний, Н.Я. Возна, Б.Б. Круліковський // Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю АСІТ'2017. – Тернопіль: ТНЕУ, 2017. – С.43-47.
185. Synthesis of a microelectronic structure of a specialized processor for sorting an array of binary numbers / V. Gryga, Ya. Nykolaichuk, N. Vozna, B. Krulikovskiy // Proceedings of XIIIth International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: MEMSTECH'2017. - PP.170-173.
186. Development and research of conveyor structures of binary number sorting algorithms / V. Gryga, Ya. Nykolaichuk, N. Vozna, A. Voronych, B. Krulikovskiy // Proceeding of the International Conference "Advanced Computer Information Technologies": ACIT'2018. - P. 123-127.

187. Пат.117572 Україна МПК G06F 7/38 (2006.01) Суматор з прискореним переносом / Круліковський Б.Б., Возна Н.Я, Грига В.М., Николайчук Я.М., Давлетова А.Я. №u201701336; заявл.13.02.2017; опубл.26.06.2017, Бюл. №12/2017.
188. Оптимізація структурних рішень комбінаційних суматорів згідно критеріїв мінімальної часової, апаратної та структурної складності / Б.Б. Круліковський, Н.Я. Возна, В.М. Грига, А.Я. Давлетова // Математичне та комп'ютерне моделювання: збірник наукових праць. - Кам'янець-Подільський: Кам.-Под. національний університет ім.І. Огієнка, 2017. – Вип.15. – С.97-103.
189. Пат. 116185 Україна МПК H03M 1/12 (2016.01), H03M 1/38 (2006.01) Аналого-цифровий перетворювач / Возна Н.Я, Круліковський Б.Б., Николайчук Я.М., Грига В.М., Піх В.Я. №u201612017; заявл.28.11.2016; опубл.10.05.2017, Бюл. №9/2017.
190. Пат.116176 Україна МПК H03M 1/38 (2006.01) Аналого-цифровий перетворювач / Возна Н.Я., Круліковський Б.Б., Николайчук Я.М., Грига В.М., Піх В.Я. № a2016 12016 заявл.28.11.2016; опубл.12.02.2018, Бюл. №3/2018.
191. Люра О. П. Дослідження перехідних процесів у високовольтних лініях електропересилань 6–10 Кв та розроблення мікроелектронного спецпроцесора релейного захисту, інваріантного до зміни амплітуд фазних струмів / О.П. Люра, Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Ів.Фр., 2018. - №2(45). – С.57-83.
192. Пат.127093 Україна МПК G06F 7/00 (2018.01) Пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами / Сидор А.І., Круліковський Б.Б., Возна Н.Я., Николайчук Я.М. № u 2018 02782 заявл.19.03.2018; опубл.10.07.2018, Бюл. №13/2018.
193. Methods and processors for image recognition in a linear and quadratic Hamming space / Andriy Sydor, Yaroslav Nykolaychuk, Nataliia Vozna [and

- others] // Proceedings of the 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CADSM'2019. - PP. 2/9-2/12.
194. Methods and Special Processors of Entropy Signal Processing / Artur Voronych, Lyubov Nyckolaychuk, Nataliia Vozna, Taras Pastukh // Proceedings of the 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CADSM'2019. - PP. 3/59-3/62.
195. Пат.121046 Україна МПК G06F 17/00 (2017.01) Пристрій для визначення ентропії / Воронич А.Р., Николайчук Л.М., Возна Н.Я., Пастух Т.М. № u 2017 05669 заявл.08.06.2017; опубл.27.11.2017, Бюл. №22/2017.
196. Пат.115751 Україна МПК G06F 7/501 (2006.01) Комбінаційний суматор / Возна Н.Я., Круліковський Б.Б., Грига В.М., Давлетова А.Я., Николайчук Я.М. № а 2017 01347 заявл.13.02.2017; опубл.11.12.2017, Бюл. №23/2017.
197. Пат.116601 Україна МПК G06F 7/501 (2006.01) Комбінаційний суматор / Круліковський Б.Б., Возна Н.Я., Грига В.М., Николайчук Я.М. № а 2017 00814 заявл.30.01.2017; опубл.10.04.2018, Бюл. №7/2018.
198. Methods of Crypto Protection of Color Image Pixels in Different Code Systems / Nataliia Vozna, Yaroslav Nykolaichuk, Orest Volynskiy [and others] // Proceeding of the International Conference "Advanced Computer Information Technologies": ACIT'2018. — P.110-113.
199. Возна Н.Я. Алгоритми розв'язання задач криптозахисту пікселів кольорових зображень у базисі Радемахера та залишкових класах / Н.Я.Возна, Я.М.Николайчук, О.І.Волинський // Кибернетика и системный анализ, 2019. – Том 55, №3. - С.149-163.
200. Метод моніторингу станів бурової установки та підвищення ефективності комунікації операторів розподіленої комп'ютеризованої системи / Г.Я.Процюк, Л.М. Николайчук, Н.Я. Возна // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – Ів.-Фр., 2017. – № 2(38) – С. 184-195.
201. А.Сидор Спецпроцесори визначення Хеммінгової віддалі при розпізнаванні образів / А.Сидор, Н.Возна // Матеріали Міжнародної

науково-практичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання". - Івано-Франківськ, 2019. - С.40-43.

202. Возна Н.Я. Теоретичні засади та метод моніторингу станів технологічного обладнання малих гідроелектростанцій на основі образно-кластерної моделі / Н.Я. Возна, І.Р. Пітух // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2019. - №3 (271). - С.197-203.
203. Пат.134154 Україна МПК (2019.01) G06F 17/40 (2006.01), G06F 15/00 G05B 23/02 (2006.01) Спосіб контролю параметрів технологічного процесу / Пітух І.Р., Возна Н.Я., Николайчук Я.М., Николайчук Л.М. №u201809554; заявл.24.09.2018; опубл.10.05.2019, Бюл. №9/2019.
204. Structuring of algorithms for data sorting and new principles of their parallelization / V. Gryga, Ya. Nykolaychuk, L. Nyckolaychuk, N. Vozna, H. Klym // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT‘2019. - P. 205-208.
205. Method of recognition of codes of road signs in the transport movement process / A. Sydor, L. Nykolaychuk, N. Vozna [and others] // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT‘2019. - P. 167-170.
206. Sensory measurements, efficient encoding and frame structure improving for data exchange / Artur Voronich, Lyubov Nykolaychuk, Nataliia Vozna, Yaroslav Nykolaichuk // Proceedings of XVth International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: MEMSTECH'2019. - PP. 144-147.
207. Structures and methods for synchronizing data exchange protocols in computer networks / A. Voronich, I. Pitukh, N. Vozna, L. Nyckolaychuk, O. Zastavnyy // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT‘2019. - P. 195-199.
208. Високопродуктивні матричні та потокові перемножувачі цифрових даних / Я М. Николайчук, Н.Я. Возна, В.М. Грига [та ін.] // Математичне та комп'ютерне моделювання: збірник наукових праць. - Кам'янець-

- Подільський: Кам.-Под. національний університет ім.І. Огієнка, 2019. – Вип.19. – С.101-107.
209. Пат.115182 Україна МПК (2017.01) G06F 7/00 G06F 7/38 (2006.1) Числоімпульсний пристрій для множення / Давлетова А.Я., Круліковський Б.Б., Николайчук Я.М., Возна Н.Я. №а201512081; заявл.07.12.2015; опубл.25.09.2017, Бюл. №18/2017.
210. Mathematical theory of Claude Shannon / Eugene Chiu, Jocelyn Lin, Brok Mcferron, Noshirwan Petigara, Satwiksai Seshasa // 6.933J / STS.420J The Structure of Engineering Revolutions, 2001. - 68 p.
211. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Н. Винер; пер. с англ. И.В. Соловьева, Г.Н. Поварова; Под ред. Г.Н. Поварова. – 2-е издание. – М.: Наука, 1983. – 344 с.
212. Бат М. Спектральный анализ в геофизике / М. Бат; пер. с англ. – М.: Недра, 1980. – 535 с.
213. Мартин Дж. Введение в сетевые технологии. Практическое руководство по организации сетей / Дж.Мартин – СПб.: Лори, 2002. – 659 с.
214. James Martin. Design and strategy for distributed data processing / J. Martin – NJ: Prentice Hall PTR Upper Saddle River, 1990 – 672 p.
- 215 Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж.Питерсон – М.: Мир, 1984. – 264 с.
216. Зайцев Д.А. Математичні моделі дискретних систем: Навчальний посібник / Д.А. Зайцев. - Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2004. – 40 с.;
217. Котов В.Е. Сети Петри / В.Е.Котов – М.: Наука, 1984. – 160 с.
218. Глушков В. М. Кибернетика. Вопросы теории и практики / В.М.Глушков — М.: Наука, 1986. — 488 с.
219. Капустій Б.О. Системи розпізнавання образів з малими базами даних / Б.О. Капустій, Б.П. Русин, В.А. Таянов. – Львів: Сполом, 2006. – 152 с.
220. Русин Б.П. Біометрична аутентифікація та криптографічний захист / Б.П. Русин, Я.Ю. Варецький – Львів: Коло, 2007. – 287 с.

221. Поморова О.В. Теоретичні основи, методи та засоби інтелектуального діагностування комп'ютерних систем. / О.В.Поморова // Монографія – Хмельницький: Тріада-М, 2007. – 252с.
222. Евдокимов А.А. Защита данных в облачных технологиях: Монография / А.А. Евдокимов, Э.Е. Тихонов. – Невинномысск: И-во НИЭУП, 2015. – 102 с.
223. Горбулін В.П. Системно-концептуальні засади стратегії національної безпеки України / В.П. Горбулін, А.Б. Качинський. — К.: ДП "НВЦ "Євроатлантикінформ", 2007. — 592 с.
224. Розподілені комп'ютерні системи як складові інформаційних інфраструктур / В.П. Горбулін, О.Г. Додонов, О.С. Горбачик, М.Г. Кузнєцова // Реєстрація, зберігання і оброб. Даних, 2008. - Т.10, № 4. - С.19-24.
225. Пітух І. Р. Розширення критеріїв інтерактивності комп'ютеризованих систем / І.Р. Пітух // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця, 2015. - № 1. - С.30–34.
226. Пітух І.Р. Теоретичні основи організації руху даних та опрацювання даних в інтерактивних комп'ютерних системах / І.Р. Пітух // Збірник матеріалів міжнародної координаційної наради ISCM-2014. – Тернопіль, 2014. – С.132-135.
227. Возна Н.Я. Моделювання законів доцільності зміни системних характеристик руху техніко-економічних даних в розподілених комп'ютерних мережах / Н.Я. Возна // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2007. - №3, Т1. - С.71-76.
228. Мельник А.О. Сучасні ситуативно-методологічні аспекти створення спеціалізованих комп'ютерних систем / А.О. Мельник, В.П. Тарасенко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – К., 1997. - №1. – С.18-21.
229. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / Антамошин А.Н., Близнова О.В., Бобов А.В. [и др.]. - М.: Горячая линия - Телеком, 2006. - 160 с.

230. William S. Davis, David C. Yen. The information system consultant's handbook. Systems analysis and design. - CRC Press, 1998. - 800 p.
231. Пуртов С.Т. Автоматизированные системы управления предприятием / С.Т.Пуртов - М.: Высшая школа, 1989. – 396 с.
232. Hoffmann A. Architecture exploration for embedded processors with Lisa / A.Hoffmann, H.Meyr, R.Leupers. - Kluwer academic publishers norwell, 2002. – 240 p.
233. ARM Processors. ARM. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.arm.com>
234. Основи моніторингу технологічних об'єктів нафтогазової галузі: Навч. посібн. / Г.Н.Семенцов, М.М.Дранчук, О.В.Гутак [та ін.]. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 808с.
235. Карпаш О.М. Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання: Навч. посібн. / О.М. Карпаш – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2007. – 272с.
236. Офіційний сайт компанії General Electric Company. Режим доступу: <https://www.ge.com/>.
237. Офіційний сайт фірми Шнейдер Електрик Україна. Режим доступу: <https://www.schneider-electric.ua>
238. Офіційний сайт фірми "Електросвіт". Режим доступу: [www.es.ua](http://www.es.ua).
239. Офіційний сайт компанії АВВ. Режим доступу:[www.abb.com](http://www.abb.com).
240. Система моніторингу виробництва "Диспетчер" [Електронний ресурс]. Режим доступу: [www.intechnology.ru](http://www.intechnology.ru).
241. Система управління виробництвом Centum VP [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/control-system/distributed-control-systems-dcs/centum-vp/>.
242. Система моніторингу "Есмду-Транс" [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ztr.com.ua/ua/monitoring-system>.
243. Офіційний сайт компанії Yokogawa. Режим доступу: [www.yokogawa.ua](http://www.yokogawa.ua).
244. Автоматизована система диспетчерського керування (АСДК) "Стріла". – Тернопіль. Тернопільське КБ "Стріла", вул. 15 Квітня, 6.
245. Офіційний сайт компанії Овен. Режим доступу: <https://owen.ua>.

246. Заміховський Л.М. Основи теорії надійності і діагностики технічних систем: Навч. посібн. / Л.М. Заміховський, В.П. Калявін. - Івано-Франківськ: Полум'я, 2004. – 360с.
247. С.А. Petri. Kommunikation mit automaten. Bonn: Institut fur instrumentelle mathematik, Schriften des IIM Nr.3, 1962 Also, English translation, "Communication with Automata". New York: Griffiss Air Force Base. Tech.Rep.RADC-TR-65-377, vol.1, Suppl.1, 1966.
248. Tadao Murata. Petri nets: properties, analysis and applications, Proc. of the IEEE, Vol.77, No.4, April 1989, PP.541-580.
249. Зайцев Д.А. Уравнение состояний и эквивалентные преобразования временных сетей Петри / Д.А. Зайцев, А.И. Слепцов // Кибернетика и системный анализ, 1997. – №5. - С.59-76.
250. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / Підручник за загальною редакцією В.В. Поповського. – Харків, ТОВ "Компанія СМІТ", 2006. – 564 с.
251. Захаров В.П. Информационные системы: Учебное пособие / В.П. Захаров. - СПб.: СПб.гос университет, 2002. - 188 с.
252. Marbán Ó. A Data Mining & Knowledge Discovery Process Model / Marbán Ó., Mariscal G., Segovia J. // In: Data Mining and Knowledge Discovery in Real Life Applications. – Vienna: I-Tech, 2009. – P.438-453.
253. Rohanizadeh S.S. A Proposed Data Mining Methodology and its Application to Industrial Procedures / S.S. Rohanizadeh, M.B. Moghadam // Journal of industrial engineering, 2009. – No 4. – PP.37-50.
254. Сагайда П.І. Алгоритмічні засоби та програмні компоненти комп'ютерних систем інтелектуальної обробки даних в організаційно-технічних комплексах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.13.05 – "Комп'ютерні системи та компоненти" / П.І.Сагайда - Покровськ, 2018. – 40 с.
255. Возная Н.Я. Теоретические основы структуризации полифункциональных данных в различных теоретико-числовых базисах / Н.Я. Возная // Journal of



- qafqaz university. Mathematics and computer science. - Baku. Azerbaijan, 2015. - Volume 3, № 1. - P.62–70.
256. Робоче діагностування безпечних інформаційно-керуючих систем / За редакцією Дрозда О.В., Марченка В.С. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є.Жуковського "ХАІ", 2012. – 614 с.
257. Касьянов В. А. Субъективный анализ: Монография / В.А.Касьянов – К.: НАУ, 2007. – 512 с.
258. Сергієнко І.В. Інформатика в Україні: становлення, розвиток, проблеми / І.В.Сергієнко - К.: Наук. думка, 1999. - 354 с.
259. Ахо, А. Структуры данных и алгоритмы. Пер. с англ. Учебное пособие / Альфред В. А. Ахо, Джон Э. Хопкрофт, Джеффри Д. Ульман. - М.: Вильямс, 2000. - 384 с.
260. Бойченко О.В. Швидкодіючі багатододанкові суматори комбінаційного типу / О.В. Бойченко, Я.І. Горошанко // Міжвузівський збірник "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво", 2011 - №3. – С.20-24.
261. Мельник Р.А. Алгоритми та методи опрацювання зображень: навч. посібник / Р.А.Мельник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 220 с.
262. Лотошинська Н.Д. Теорія кольору та кольороутворення: навч.посібник / Н.Д.Лотошинська, О.В.Івахів. – Львів: В-во Львівської політехніки, 2014. – 204 с.
263. Пітух І. Принципи побудови комп'ютерних мереж з глибоким розпаралелюванням інформаційних потоків на основі матричних моделей руху даних / І. Пітух, Я. Николайчук, Н. Возна // Вісник НУЛП "Радіоелектроніка та телекомунікації". – Львів, 2004. - №508. - С. 263-268.
264. Аналітична оцінка структурної складності помножувачів елементів полів Галуа / О.В.Глухова, А.Я.Лозинський, Р.І.Яремкевич, А.О.Ігнатович // Матеріали V Всеукраїнської школи-сесіонару молодих вчених і студентів "Сучасні комп'ютерні інформаційні технології АСІТ'2015". – Тернопіль: ТНЕУ, 2015. – С.166-167.

265. Возна Н.Я. Основи теорії структуризації поліфункціональних елементів складних систем // Вісник Хмельницького національного університету. - Хмельницький, 2015.- №2 (223). - С.204-208.
266. Возна Н.Я. Теорія та оцінка інформативності структурованих графічних та відеозображень // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства" (ЮПС-2011). – Івано-Франківськ, 2011. – С.65-70.
267. Возна Н.Я. Критерії оцінки структурної, інформаційно-структурної та ентропійно-структурної складності проблемно-орієнтованих даних / Н.Я. Возна // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції "Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту". - Івано-Франківськ, 2018. - С.187-188.
268. Хартли Р.Л. Передача информации / Р.Л. Хартли // Теория информации и ее приложения. – М., 1959. – 350с.
269. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетика / К.Э. Шеннон. – М.: Иностран.лит., 1963. – 829 с.
270. Method for structuring the Fourier discrete cosine transform in the modular arithmetic of the Haar–Krestenson number-theoretic basis [Electronic resource] / Ya. M. Nykolaichuk, N.Ya. Vozna, B.B. Krulikovskiy, V.Ya. Pikh // Cybernetics and systems analysis. Springer. – Electronic data. - May 2018, Vol.54, Issue 3, pp. 502–512. Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0051-y>.
271. Топорков В.В. Модели распределенных вычислений./ В.В. Топорков // - М.: Физматлит -2004. – 320 с.
272. Skillicorn D.A. Taxonomy for Computer Architectures /D.A. Skillicorn// Computer, 1988. - V.21. N 11. - P.46-57.
273. Харкевич А.А. Основы радиотехники / А.А. Харкевич [3-е изд.]. - Москва : Физматлит, 2007. - 513 с.
274. Kenefic R.J. Exact detection performance for broadband correlators / R.J. Kenefic, J.E. Barchak // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (AES-19), Mar. 1983. – PP.320-322.

275. DeFatta D.J. Digital signal processing: a system design approach / D.J. DeFatta, J.G. Lucas, W.S. Hodgkiss / New York: Wiley, 1988. – P.306.
276. Balcazar J.L. Structural Complexity / J.L. Balcazar, J. Diaz, J. Gabarro. – Two volumes // Springer, 1988. – Vol.I ; 1990. – Vol. II.
277. Shaltiel R. Simple extractors for all min-entropies and a new pseudo-random generator / R. Shaltiel, C. Umans // Proceedings of the 42nd IEEE symposium on foundations of computer science, 2001. – PP.648–657.
278. Raz R. The bns-chung criterion for multi-party communication complexity / R. Raz // Computational Complexity, 2000. – №9 (2). – P.113–122.
279. Кузьо М. М. Реконфігуровані обчислювальні системи на однорідній структурі / М.М. Кузьо // Вісник НУЛП "Комп'ютерні системи та мережі". – Львів, 2010. – №688. – С52–156.
280. Пат.107904 Україна МПК G06F 3/023 (2006.01) Пристрій для введення алфавітно-цифрових даних / Я.М. Николайчук, А.О. Мельник, Н.Я. Возна, В.А. Мельник // № а201404203; заявл.18.04.2014; опубл.25.02.2015, Бюл. №4/2015.
281. Николайчук Я. Теоретичні основи формування ентропійних моделей на базі кореляційних функцій / Я. Николайчук, А. Сегін, І. Сабадаш // Інформаційні технології і системи, 2002. – Т.5, № 1–2. – С.13–21.
282. Николайчук Я. М. Теоретичні основи мір ентропії та їх застосування в інформаційних технологіях формування та опрацювання сигналів/ Я.М. Николайчук, А.Р. Воронич // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця, 2010. – №1 (19). – С.50–64.
283. Воронич А.Р. Ентропійні методи формування та опрацювання сигналів в розподілених спеціалізованих комп'ютерних системах / А.Р. Воронич // Вісник Хмельницького нац. університету. – Хмельницький, 2010. – №4. – С.69–71.
284. Возна Н.Я. Теоретичні засади методу оцінки ентропії структуризованих поліфункціональних даних / Н.Я.Возна // Вісник НУЛП "Комп'ютерні системи та мережі". – Львів, 2016. - №857. - С.17-28.

285. Теорія та методи оцінки ентропії дискретних маніпульованих сигналів / Я.М. Николайчук, Т.І. Пастух, А.Р. Воронич // Методи та системи оптико-електронної і цифрової обробки зображень та сигналів. – Вінниця, 2015. – С.18-29.
286. Возна Н.Я. Структуризація поліфункціональних даних в унітарному теоретико-числовому базисі / Н.Я. Возна // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця, 2015. – №(29). – С.35–44.
287. Катренко А. В. Системний аналіз : Підруч. / А.В. Катренко. – Львів: Новий світ–2000, 2011. – 396 с.
288. Возна Н. Я. Концепція структуризації даних в розподілених інформаційних системах / Н. Я. Возна // Зб. матеріалів міжнародної координаційної наради ISCM-2014. – Тернопіль, 2014. – С.55–57.
289. Возна Н. Я. Теорія та оцінка інформативності структурованих графічних та відеозображень / Н.Я. Возна // Зб. матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конф. "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства (ЮПС-2011)". – Івано-Франківськ, 2011. – С. 65–70.
290. Возна Н.Я. Основи теорії, функції та задачі структуризації даних в інформаційних системах / Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук // Праці міжнародної наукової конференції "Питання оптимізації обчислень (ПОО-ХЛ)" Київ: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2013. - С.56-57
291. Петришин Л.Б. Теоретичні основи перетворення форми та цифрової обробки інформації в базисі Галуа: Навч. посібник. / Л.Б. Петришин. - Київ.: ІЗІМН МОУ, 1997. - 237 с.
292. Волинський О.І. Методи високопродуктивних перетворень великорозрядних чисел з базису Радемахера у базис Крестенсона / О.І. Волинський // Вісник НУЛП "Комп'ютерні системи та мережі". – Львів, 2012. - С.39-48.
293. Dong Chin Sun. Features of Liquid Crystal Display Materials and Processes. Scitus Academics LLC, 2016 - 264 p.

294. Zhang Yudong, Wu Lenan. Fast document image binarization based on an improved adaptive Otsu's method and destination word accumulation / Yudong Zhang, Lenan Wu // *Jornal of computational information systems*, 2011. – No.6. – P.1886-1892.
295. An improved median-based Otsu image thresholding algorithm / Xiaolu Yangab, Xuanjing Shenab, Jianwu Longab, Haipeng Chen // *AASRI Procedia*. - Volume 3, 2012. – PP.468-473.
296. Carsten Steger. Machine vision algorithms and applications / Carsten Steger, Markus Ulrich, Christian Wiedemann. - John Wiley & Sons, 2018. - 516 p.
297. Воробель Р.А. Логарифмічна обробка зображень / Р.А.Воробель - К.: Наукова думка, 2012. - 231с.
298. Glasbey C. A. An analysis of histogram-based thresholding algorithms // *CVGIP: Graphical Models and Image Proc.*, 1993. – 55. – P. 532–537.
299. Гуменний П.В. Теоретичні основи визначення залишків на основі лічильників у різних теоретико-числових базисах / П.В. Гуменний, О.І. Волинський // *Вісник Хмельницького національного університету*. – Хмельницький, 2016. – №4(239). – С. 164-173.
300. Nykolaychuk Ya. M. Theoretical foundations for the analytical computation of coefficients of basic numbers of Krestenson's transformation / Ya.M. Nykolaychuk, M.M. Kasianchuk, I.Z. Yakymenko // *Cybernetics and systems analysis*. – September, 2014. - Volume 50, Issue 5. – pp.649-654.
301. Nykolaychuk Ya.M. Theoretical Foundations of the Modified Perfect form of Residue Number System / Ya.M. Nykolaychuk, M.M. Kasianchuk, I.Z. Yakymenko // *Cybernetics and Systems Analysis*. – March, 2016. - Volume 52, Issue 2. – pp. 219-223.
302. Николайчук Я.М. Реалізація операції додавання на основі вертикально-інформаційної технології у базисі Галуа / Я.М. Николайчук, П.В. Гуменний // *II всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених та студентів "Інтелектуальні технології в системному програмуванні"*. –Хмельницький, 2013. – С.274-275.

303. Теория надежной и защищенной передачи данных в сенсорных и локально-региональных сетях / Я.Н. Николайчук, Б.М. Шевчук, А.Р. Воронич [та ін.] // Кибернетика и системный анализ, 2014. – том 50, №2. - С.161-174.
304. Задирака В.К. Облачные вычисления в криптографии и стеганографии / В.К. Задирака, А.М. Кудин // Кибернетика и системный анализ, 2013. - Т.49, № 4. - С.113-119.
305. Задирака В.К. Новые подходы к разработке алгоритмов скрывания информации / В.К. Задирака, Л.Л. Никитенко // Штучний інтелект, 2008. - № 4. - С.353-357.
306. Yaroslav Nykolaychuk. Rademacher-Krestenson's method of between-bases transformations in designing processors / Ya. Nykolaychuk, O. Volynskyy, A. Borovyi // Proceedings of the 6th International Conference "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications". – Prague, Czech Republic, 2011. – pp.310-313.
307. Теоретичні основи розпізнавання багатомірних образів у Хеммінговому просторі. / Б.Б. Круліковський, А.І. Сидор, Я.М. Николайчук. О.М. Заставний // Вісник НЛТУ України. – Львів, 2016. – Вип.26.3. - С.361-367.
308. Офіційний сайт фірми Siemens. Режим доступу: <https://www.siemens.com>.
309. Офіційний сайт компанії Teollisuuden Voima Oyj. Режим доступу: <https://www.tvo.fi>.
310. Офіційний сайт компанії Électricité de France. Режим доступу: <https://www.edf.fr>.
311. Офіційний сайт компанії Westinghouse Electric. Режим доступу: <https://westinghouse.com/>
312. Сайт виробничого об'єднання "Киевприбор". Режим доступу: [www.kievpribor.com.ua](http://www.kievpribor.com.ua).
313. Сайт АТ "Радиус Автоматика". Режим доступу: <http://www.rza.ru>.
314. Люра О.П. Дослідження та оптимізація характеристик компонентів мікроелектронного пристрою релейного захисту високовольтних ліній

електропересилань / О.П. Люра, Н.Я. Возна // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів, 2017. - №27(5). - С.148-154.

315. Theoretical principles and methods of distortions recognition in load surges, short circuits and powerful electric drives launching type power lines / Oleh Liura, Ivan Ostrovka, Iryna Sabadash, Yaroslav Nykolaichuk // Modern problem of radio engineering, telecommunications and computer science: proceedings of the XIII th International conference TSET'2016, February 23-26, 2016. - P.33-36.
316. Равлик О.М. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики / О.М. Равлик, Т.М. Гречин, В.Й. Іваноньків // Вісник ДУ "Львівська політехніка": Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів, 1997. – № 340. – С. 96–101.
317. Сайт Інституту мікропроцесорних систем керування об'єктами електроенергетики. Режим доступу: <http://imskoe.org.ua>.
318. Лазарович І.М. Метод рандомізації та цифрової обробки інформаційних потоків в системах автоматизації виробничих процесів. / І.М. Лазарович, Я.М. Николайчук // Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький, 2002. - №3, Т.2. - С.91-94.
319. Лазарович І.М. Теорія і методи рандомізації цифрових потоків в телекомунікаційних системах / І.М. Лазарович, Я.М. Николайчук // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. "Радіоелектроніка та телекомунікації". – Львів, 2001. - №440. – С.234-240.
320. Заведюк Т.О. Методи опрацювання гармонічних сигналів на основі спецпроцесорів з нейроподібними компонентами / Т.О. Заведюк // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп'ютерні науки та інформаційні технології”. – Львів, 2013. – №751. – С.18-28.
321. Zavedyuk T. The method of detection of transients in power systems based on neural processor square-pulse conversion of harmonic signals / T. Zavedyuk, Y. Nykolaychuk // Proceedings of the 6-th International Conference “Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application (ACSN'2013)”. – Lviv, 2013. – P.171-172.

322. Заведюк Т.О. Метод ідентифікації спотворень гармонічних сигналів на основі дискретного квадратично-імпульсного перетворення / Т.О. Заведюк, Я.М. Николайчук // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2013. – №6. – С. 130-135.
323. Розробка теоретичних засад та алгоритмів ідентифікації запусків потужних електроприводів у високовольтних ЛЕП на основі теорії розпізнавання образів: звіт про науково-дослідну роботу: державний реєстраційний номер 0115U002340. – Тернопіль, 2015. – 64 с.
324. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навчальний посібник / М.Г.Попович, О.Ю.Лозинський [та ін.]; за ред. М.Г.Поповича, О.Ю.Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
325. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Навчальний посібник / В.П.Кідиба. – Львів: Видавництво Львівської політехніки. - Львів, 2015. – 504с.
326. Гупал А.М. Оптимальные процедуры распознавания / А.М. Гупал, И.В. Сергиенко // Кибернетика и системный анализ, 2003. - № 1. – С.21-29.
327. Розробка алгоритмів функціонування захистів електропередач за коротких замикань на основі теорії кореляційних функцій: звіт про науково-дослідну роботу: державний реєстраційний номер 0112U007886. – Тернопіль, 2013. – 167 с.
328. Розробка математичного забезпечення захисту ліній електропередач номінальною напругою 6-35 кВ на основі теорії розпізнавання сигналів: звіт про науково-дослідну роботу: державний реєстраційний номер 0113U007679. – Тернопіль, 2014. – 71 с.
329. Розробка структурної схеми та компонентів дослідного взірця пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань на землю у високовольтних ЛЕП: звіт про науково-дослідну роботу: державний реєстраційний номер 0116U006790. – Тернопіль, 2016. – 86 с.
330. Авторський нагляд за розробкою схемних рішень та випробувань дослідних взірців пристрою релейного захисту в мережах 6-10 кВ: звіт про



науково-дослідну роботу: державний реєстраційний номер 0117U000141. – Тернопіль, 2017. – 66 с.

331. Лисяк Г.М. Розпізнавання аварійних ситуацій ліній електропередавання / Г.М. Лисяк, І.І. Островка, І.О. Сабадаш // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2015. - № 6. – С.79-83.
332. Наконечний А.Й. Цифрова обробка сигналів: Навчальний посібник / А.Й. Наконечний, Р.А. Наконечний, В.А. Павлиш. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 368 с.
333. Соломчак О.В. Електропостачання технологічних комплексів нафтової і газової промисловості: Навчальний посібник / О.В.Соломчак. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2005. - 421 с.
334. Русин Б.П. Системи синтезу, обробки та розпізнавання складноструктурованих зображень / Б.П. Русин. – Львів: Вертикаль, 1997.– 262 с.
335. Хемминг Р. В. Теория кодирования и теория информации: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1983. - 176 с.
336. Компонентами електронних пристроїв [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.rutronik24.com/diotec.html>.
337. Розробка та реалізація мікропроцесорного струмового захисту ліній електропередавань 6-35 кВ: звіт про дослідно-конструкторську роботу: державний реєстраційний номер 0117U005103. – Тернопіль, 2018. – 46 с.
338. Алишов Н.И. Развитые методы взаимодействия ресурсов в распределенных системах / Н.И. Алишов – Киев: Сталь, 2009. – 448с.
339. Система моніторингу промислового обладнання [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.intechnology.ru/>
340. Сайт компанії "Запоріжтрансформатор". Режим доступу: <http://ztr.com.ua/ua>.
341. Пат. 68874 Україна МПК G06F 15/00, G05B 23/02 (2006.01) Пристрій для контролю роботи технологічного об'єкту / Николайчук Я.М., Ширмовська Н.Г., Гладюк В.М. №u201112604; заявл. 27.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. №7/2012.

342. Пат. 71122 Україна МПК G06F 15/00, G05B 23/02 (2006.01) Спосіб контролю параметрів технологічного процесу / Николайчук Я.М., Ширмовська Н.Г. №u201112603; заявл. 27.10.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. №13/2012.
343. Николайчук Л.М. Дослідження впливу відео-, аудіо-, алфавітно-цифрової та іншої інформації на суспільно-комунікаційну поведінку суб'єктів права. / Л.М. Николайчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - Вінниця, 2015. - №1 (29) - С.51-55.
344. Sabadash I. The theory and technology of use of information models for objects of electric power industry / I. Sabadash, A. Segin, J. Nykolaychuk // Proceedings of the 7th International Conference. The Experience of Designing and Application. CAD Systems in Microelectronics, CADSM, 2003. – P.107–109.
345. Процюк Г.Я. Метод моніторингу станів бурової установки та підвищення ефективності комунікації операторів розподіленої комп'ютеризованої системи / Г.Я. Процюк, Л.М. Николайчук, Н.Я. Возна // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – Ів.-Фр., 2017. – № 2(38) – С. 184-195.
346. Пат.134154 Україна МПК (2019.01) G06F 17/40 (2006.01), G06F 15/00 G05B 23/02 (2006.01) Спосіб контролю параметрів технологічного процесу / Пітух І.Р., Возна Н.Я., Николайчук Я.М., Николайчук Л.М. №u201809554; заявл.24.09.2018; опубл.10.05.2019, Бюл. №9/2019.
347. Сайт компанії ХОЛИТ Дэйта Системс. Режим доступу: <http://holit.com.ua/>
348. Сайт компанії NXP. Режим доступу: <https://www.nxp.com/>
349. Сайт корпорації Renesas Electronics. Режим доступу: <https://www.renesas.com/eu/en/>
350. Сайт фірми Transfer Multisort Elektronik. Режим доступу: <https://www.tme.eu/ua/>
351. Marcel J.M. Pelgrom. Analog-to-Digital Conversion / M.Pelgrom – Springer International Publishing Switzerland, 2017. – 455p. ISBN 978-3-319-44970-8
352. Rudy J. van de Plassche. Integrated Analog-To-Digital and Digital-To-Analog Converters / R.Plassche - Springer Science & Business Media, 2012. – 501 p.

353. Шило В.Л. Популярныe цифрове микросхемы: Справочник - 2-е изд., исправленнoе / В.Л.Шило - М: Радио и связь, 1989. – 352 с.
354. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Якубовский С.В., Ниссельсон Л.И., Кулешова В.И. и др.; под ред. С.В. Якубовского. - М.: Радио и связь, 1990. - 496 с.
355. Швидкодiючі компаратори [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.alfarzpp.lv/rus/sc/521CA4.php>.
356. Корис Р. Справочник инженера-схемотехника / Р.Корис, Х.Шмидт-Вальтер. - М.: Техносфера, 2008. - 608 с.
357. Швидкодiючі компаратори [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmh7324.pdf>.
358. Таненбаум Э. Архитектура компьютера 5-е изд./ Э.Таненбаум – СПб.: Питер, 2010. – 844с.
359. Пат.115861 Україна МПК (2006) G06F 7/00 Однорозрядний напiвсуматор / Давлетова А.Я., Николайчук Я.М. №u201612463; заявл.07.12.2016; опубл.25.04.2017, Бюл. №8/2017.
360. Пат. 2514785 Россия МПК G06F 7/501 (2006.01) Комбинационный сумматор / Гринберг И.П. № 2013104382/08; заявл. 01.02.2013; опубл. 10.05.2014, Бюл. №13/2014.
361. Івасьєв С.В. Метод зберігання простих великорозрядних чисел у базисі Радемахера / С.В. Івасьєв, М.М. Касянчук, І.З. Якименко // Праці міжнародної молодіжної математичної школи “Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXVII)” Київ: Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, 2013. – С. 142-144.
362. Пат. 97162 Україна МПК G06F 7/00 Пристрій додавання багаторозрядних двійкових чисел / Николайчук Я.М., Кімак В.Л., Круліковський Б.Б. №u201405380; заявл. 20.05.2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. №5/2015.
363. Грига В. М. Оцінка варіантів синтезу матричних та багатозарових перемножувачів двійкових чисел / В. М. Грига // Науковий журнал “Комп’ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво”. –

Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2011. - №5. – С.120-125.

364. Пат. 76622 Україна МПК G06F 17/15 (2016.01), Цифровий автокорелятор / Албанський І.Б., Николайчук Я.М., Волинський О.І. №u201207741; заявл.25.06.2012; опубл.10.01.2013, Бюл. №1/2013.

365. <http://phg.su/basis2/x134.HTM>, с.1/6, 11.5

366. Кожем'яко В.П. Архітектура і алгоритми обробки зображень: Навч. посіб. / В.П. Кожем'яко, Т.Б. Мартинюк. – Вінниця: Вінниц. держ. техн. ун-т., 2000. - 128 с.

367. Сачанюк-Кавецька Н.В. Елементи око-процесорної обробки зображень в логіко-часовому середовищі: Моногр. / Н.В. Сачанюк-Кавецька, В.П. Кожем'яко. - Вінниця: Універсум-Вінниця, 2004. - 135 с.

368. Тимочко О.І. Градієнтний метод виділення контуру об'єкта розпізнавання на аерофотознімку / О.І. Тимочко, О.М. Маменко // Системи озброєння і військ. техніка, 2011. - № 4. - С.90-92.

369. Басюк Т.М. Методи та засоби мультимедійних інформаційних систем: навч. посібник / Т.М.Басюк, П.І.Жежнич. – Львів: В-во Львівської політехніки, 2015. – 428 с.

370. Николайчук Я.М. Числоимпульсное множительное устройство // А.С. СССР № 754414. - Бюллетень № 29. - 1980.

371. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс – М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.

372. Гриньов Д.В. Методи стиснення зображень в системах цифрової обробки даних / Д.В.Гриньов, З.З.Закіров // Системи обробки інформації. — Х.: ХУПС, 2010. - Вип. 2 (83). - С.66–70.

373. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. Пер. с англ. / Р.В. Хемминг - М.: Сов. радио, 1980. - 224 с.

374. Многоканальное устройство для вычисления модульной корреляционной функции / Я.Н. Николайчук, С.М. Ищеряков, А.Д. Ластовецкий // SU 1686433, Бюл. №39, 1991.

375. Сидор А. Спецпроцесори визначення Хеммінгової віддалі при розпізнаванні образів / А. Сидор, Н. Возна // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання". - Івано-Франківськ, 2019. - С.40-43.
376. Пат. 132520 Україна МПК G06F 7/52 (2006.01) Матричний перемножувач / Давлетова А.Я., Грига В.М., Николайчук Я.М. №u20181030; заявл.17.10.2018014; опубл.25.02.2019, Бюл. №4/2019.
377. Високопродуктивні матричні та потокові перемножувачі цифрових даних / Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, В.М. Грига [та ін.] // Математичне та комп'ютерне моделювання: Технічні науки: збірник наукових праць. Кам'янець-Подільський: Кам.-Под. національний університет ім.І. Огієнка, 2019. – Вип.19. – С.101-107.
378. Мельничук С.І. Застосування оцінок інформаційної ентропії під час опрацювання широкосмугових акустичних реалізацій діагностичних сигналів / С.І. Мельничук, І.М. Лазарович // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2017. – №1 – С.186-190.
379. W.Stallings. Data and Computer Communications. Pearson; 8nd ed. 2006, P.576.
380. A.Tanenbaum. Computer networks. Prentice Hall 5th ed. 2010 p.960.
381. Пат. 117659 Україна МПК (2006) G06N 7/00 Інформаційна нейромодель суб'єкта права / Николайчук Л.М. № u201606789; заявл.22.06.16; опубл. 10.07.2017, Бюл. №13/2017.
382. Olifer N. Computer networks: principles, technologies and protocols for network design / N.Olifer, V.Olifer. - John Wiley & Sons, 2006. - 973 p.
383. Sklar B. Digital communications / B.Sklar. - Prentice Hall, 2001. - Vol. 2. - P.1011.
384. Theory of Reliable and Secure Data Transmission in Sensory and Local Area Networks [Electronic resource] / Y.M. Nykolaychuk, B.M. Shevchyuk, A.R. Voronych [and others] // Cybernetics and systems analysis. Springer. – Electronic data. - March 2014, Vol. 50, Issue 2, pp 304-315.

385. Основи метрології та вимірювальної техніки: підруч.; в 2-х т. / М.М. Дорожовець, В.П. Мотало, Б.І. Стадник та ін.; за ред. Б.І.Стадника. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. – Т.1. Основи метрології. – 532 с.
386. Офіційний сайт фірми Texas Instruments. Режим доступу: <http://www.ti.com>.
387. Офіційний сайт фірми Analog Devices. Режим доступу: <https://www.analog.com/en/index.html>.
388. Пат.25291 Україна МПК (2006) G06F 3/00 Пристрій для введення алфавітно-цифрових даних / Николайчук Я.М., Возна Н.Я. № u200613176; заявл. 13.12.2006; опубл. 10.08.2007, бюл. № 12/2007.
389. Цилькер Б.Я. Организация ЭВМ и систем: Учебник для вузов / Б.Я. Цилькер, С.А. Орлов – СПб.: Питер, 2006. – 668 с.



## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А1

#### Структури та характеристики класичних та кольорових мереж Петрі

Граф мережі Петрі визначає сукупність двох множин: множини вершин або вузлів графа та множини їх упорядкованих пар у вигляді дуг або ребер.

Приклад графа мережі Петрі наведено на рис.А1.1 [1, 2], де вершини графа позначено символами  $a, b, c, d, e$ , а направлені стрілками дуги – символами  $\alpha, \beta, \delta, \varphi, \varepsilon, \gamma, \zeta, \xi$ .

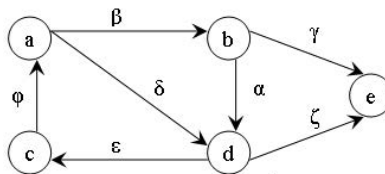


Рис.А1.1 - Приклад графа мережі Петрі.

Довільний граф мережі Петрі ідентифікується символом  $G$ , множина вершин -  $X$ , множина ребер -  $E$ , множина дуг -  $A$ .

Таким чином, конкретний граф, залежно від його орієнтації, прийнято записувати у вигляді:

$$G = (X, A) \text{ або } G = G(X, A), \quad G = (X, E) \text{ або } G = G(X, E).$$

Структурні відношення між елементами множини описуються матрицею суміжності [1, 2]:

$$[C_{ij}]_V = [n \times n],$$

рядки і стовпчики якої відповідають вершинам оргграфа структурної моделі, а її  $C_{ij}$ -й елемент – кількості ребер, спрямованих від вершини  $V_i$  до  $V_j$ .

Відношення між елементами множини  $V$  і  $B$  відповідно опису відношень між вершинами і ребрами оргграфа, описується у вигляді булевої матриці інциденцій

$$[A_{ij}]_{V,B} = [n \times m],$$

рядки якої відповідають вершинам, а стовпчики- ребрам оргграфа, при цьому  $a_{ij}$ -елементу присвоюється „+1”, якщо  $V_i$ - початкова вершина  $b_j$  і „-1”, якщо  $V_i$ - кінцева вершина ребра  $b_j$ .

На рис А1.2 показаний оргграф з вершинами  $V_1$ - $V_7$  та ребрами  $b_1$ - $b_{12}$ .

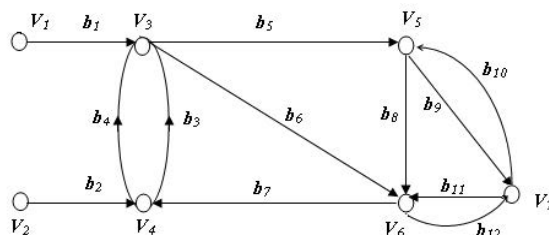


Рис.А1.2 - Оргграф булевої матриці інциденцій.



Матриці суміжності  $C_{ij}$  та інциденцій  $A_{ij}$  цього оргграфа мають вигляд (рис.А1.3) [1, 2]:

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$		$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	$b_{11}$	$b_{12}$	
$V_1$			1					$V_1$	-1												
$V_2$				1				$V_2$		-1											
$V_3$				1	1	1		$V_3$	+1		-1	+1	-1	-1							
$V_4$			1			1		$V_4$		+1	+1	-1			-1						
$V_5$						1	1	$V_5$					+1			-1	-1	+1			
$V_6$							1	$V_6$						+1	+1	+1			+1	-1	
$V_7$					1			$V_7$									+1	-1	-1	+1	

Рис.А1.3 - Матриці суміжності та інциденцій оргграфа (рис.А1.2).

Існують різні розширення мереж Петрі, орієнтовані на моделювання систем різних типів: стохастичних, динамічних, предикатних та ін. Кольорові мережі Петрі дають змогу значно зменшити розміри мереж, які використовуються, наприклад, для опису моделей комп'ютерних систем [3-6].

Для графічного подання мереж Петрі використовуються наступні графічні символи [1-4] таблиця А1.1.

Таблиця А1.1 - Елементи мережі Петрі

Назва елемента	Позначення
Перехід	
Позиція	
Дуга	
Маркер	
Кілька фішок	
Кілька дуг	

Дуги поєднують вершини протилежних типів: позицію з переходом і навпаки, фішки знаходяться усередині позицій і переміщуються внаслідок переходів. Переходи є дозволеними, якщо його вхідні позиції містять фішки (рис.А1.4) [1-4].



Рис.А1.4 - Елементи мережі Петрі.

Необхідність дослідження динаміки ресурсних потоків у системах змусила шукати шляхи включення до мереж Петрі в явному вигляді часових параметрів. Крім того, у деяких моделях необхідно розрізняти порядок надходження маркерів до вузлів та вибору маркерів з них, що дає змогу впорядкувати події в часі.

На практиці широко використовуються проблемно-орієнтовані розширення мереж Петрі, серед яких найбільш відомі £-мережі, комбі-мережі, ПРО-мережі, М-мережі та ін. [1, 2, 7, 8]

Теорія розширених та кольорових мереж Петрі, а також матриця інцидентності, які відображають топологічну архітектуру комп'ютерної системи і направленість інформаційних потоків між її вузлами. Дана матриця є базою для побудови матриці двохвимірної моделі руху даних, в якій конкретизуються атрибути комп'ютерної системи у вигляді символів джерел інформації, пунктів цифрового опрацювання даних, зберігання та архівації даних (рис.А1.5).

На рис.А1.5 показана символіка вузла матричної моделі руху даних [6].

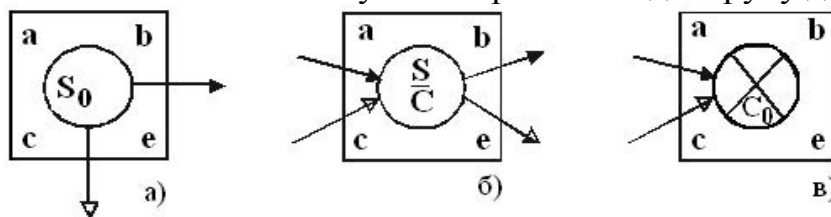


Рис.А1.5 - Елементи вузла матричної моделі (ММ).

На рис.А1.5 використані наступні позначення:

- а) джерело формування даних ;
- б) пункт цифрової обробки та зберігання даних;
- в) пункт архівації та затвердження даних;
- а,б- відповідно час початку та тривалість виконання операцій формування, цифрового опрацювання, зберігання та затвердження даних;
- с- тип операції формування, опрацювання та архівації даних ;
- е- собівартість операцій руху даних;
- д- час передавання даних між вузлами ММ;
- в- собівартість руху матеріальних потоків, які включають вартість носіїв інформації та компютерних засобів, час транспортування та інше.

S,C- відповідно число запитів та читань даних у вузлі ММ

Кожен вузол ММ ідентифікується номером документа і об'єкта  $D_iO_j$

де  $i$  - номер документа,  $j$  - номер об'єкта. При проектуванні комп'ютерної мережі на основі ММ на рівні окремих вузлів необхідно класифікувати типи задач технічного, інформаційного, економічного та іншого забезпечення.

Викладені принципи побудови Мереж Петрі та матричних моделей руху даних обґрунтовують важливу роль формалізації перетворень та структуризації даних в середовищі РКС.

#### Список джерел, використаних у додатку А1

1. Локазюк В.М. Інтелектуальне діагностування мікропроцесорних пристроїв та систем: Навч. посіб. для вузів / В.М.Локазюк, О.В.Поморова, А.О.Домінов – Хмельницький: ТУП, 2001. – 286 с.

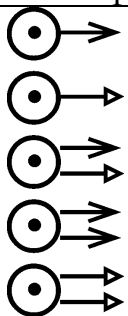
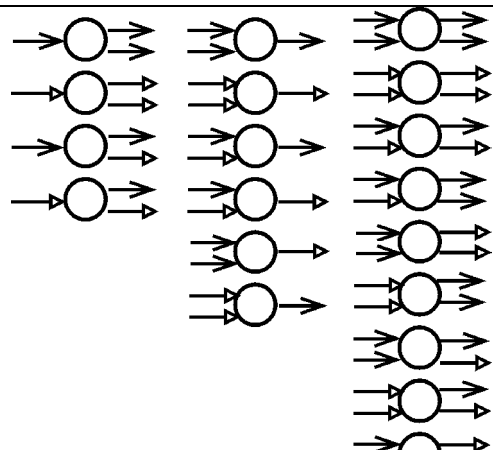
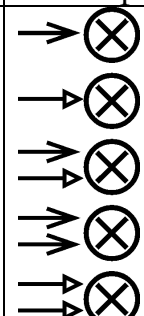
2. Зайцев Д.А. Математичні моделі дискретних систем: Навчальний посібник // Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2004. – 40 с.
3. Зайцев Д.А. Моделирование коммутируемой локальной сети раскрашенными сетями Петри / Д.А.Зайцев, Т.Р.Шмелёва // Зв'язок. - 2004. - Т. 46, № 2. - С. 56-60.
4. Зайцев Д.А. Инварианты часовых сетей Петри / Д.А.Зайцев // Кибернетика и системный анализ. - 2004. - № 2. - С. 92-106
5. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації / Я.М. Николайчук – Тернопіль: ТзОВ „Терно–граф”, 2010. – 536 с.
6. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем: Навчальний посібник / Я.М.Николайчук, Н.Я.Возна, І.Р.Пітух - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф". 2010. – 392с., іл.
7. Нікольський Ю.В. Дискретна математика: Підручник / Ю.В.Нікольський, В.В.Пасічник, Ю.М.Щербина. – Львів: "Магнолія 2006", 2007. – 608с.
8. Слепцов А.И. Автоматизация проектирования управляющих систем гибких автоматизированных производств / А.И.Слепцов, А.А.Юрасов // Под ред. Б.Н.Малиновского. – К.: Техніка, 1986. – 160 с.

## ДОДАТОК А2

Аналіз та перспективи розвитку структур інформаційних потоків в РКС на основі матричних моделей руху даних.

Розроблена систематизація атрибутів ММРД характеризується обмеженими функціональними можливостями, оскільки передбачає наявність багатьох інформаційних входів та не більше одного виходу. Практично в реальних багаторівневих РКС в активних пунктах формування, опрацювання та реєстрації даних можуть опрацьовуватися як інформаційні, так і матеріальні потоки (наприклад, застосування флеш-пам'яті, застосування дисків та інш.). Тому запропоноване розширення атрибутів ММРД (табл.А2.1) враховує диференціацію інформаційних та матеріальних потоків як на входах, так і на виходах активних вузлів ММРД.

Таблиця А2.1 - Символіка об'єктів РКС

Джерела інформації	Середовища обробки даних	Приймачі інформації
		

В роботі [1] класифіковано та уточнено поняття руху даних в РКС, де під рухом даних вважаються процедури, які виконуються над даними на всіх рівнях архітектури комп'ютерних мереж, зокрема низовий, технологічний, цеховий та адміністративний.

У роботах [2, 3] здійснено розширення символіки атрибутів мереж Петрі на основі МРД, де враховуються коефіцієнти руху даних, запропоновані Дж.Мартіном та автором:

$$K_d = \frac{S}{G},$$




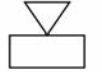











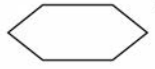
















де  $S$  - число зчитувань або запитів,  $G$  - число записів або оновлень даних.

$$K_{ed} = \frac{S_i \cdot G_0}{S_0 \cdot G_i},$$




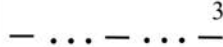
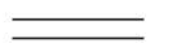


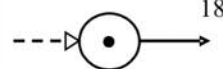



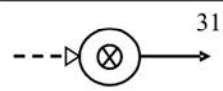


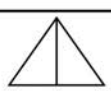












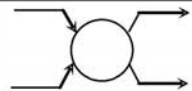
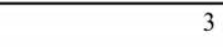
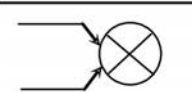

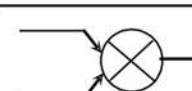
де  $S_i, S_0, G_i, G_0$  - відповідно фактичне число запитів, максимально можливе число запитів, фактичне число записів або оновлень, максимально можливе число записів або оновлень у вузлі матричної моделі.

З метою формалізованого опису граф-алгоритмічної моделі в роботах [3, 4] автором запропонована систематизація умовних позначень типів операцій, що виконуються в активних вузлах та типів каналів передавання інформаційних потоків між вузлами (табл.А2.2) згідно ГОСТ 19.003.80.

Таблиця.А2.2 - Систематизація структурних позначень типів операцій граф-алгоритмічної моделі

№ п/п	Позначення	Зміст позначення
1	 6	Неавтономна пам'ять
2	 9	Автономна пам'ять
3	 8	Тверда копія документа
4	 19	Звуковий ввід/вивід
5	 6	Мишка
6	 14	Магнітно оптичний диск
7	 13	Магнітна дискета
8	 4	Оптичний диск
9	 13	Автономний сенсор
10	 21	Архів
11	 12	Магнітна карта
12	 25	Модем
13	 15	Дисплей
14	 12	Процес
15	 12	Рішення
16	 18	Модифікація
17	 22	Конкретизований процес
18	 12	Ручна операція
19	 20	Допоміжна операція
20	 12	Ручний ввід
21	 3	Оптичний канал
22	 12	Ввід/ вивід
23	 4	Пуск/зупинка
24	 18	Ручний документ
25	 12	Оператор
26	 10	Джерело-приймач
27	 15	Злиття
28	 15	Виділення
29	 15	Групування
30	 13	Сортування
31	 1	Сторінковий з'єднувач
32	 15	Міжсторінковий з'єднувач

Продовження таблиці А2.2

33	 1	Безпосередня передача	49	 3	Інфрачервоний канал зв'язку
34	 2	Інформаційний потік	50	 3	Волоконно-оптичні лінії зв'язку
35	 2	Дублювання передачі	51	 11	Степінь використання лінії зв'язку $C=0.1, 0.2, \dots, 1.0$
36	 7	Канал зв'язку	52	 18	Джерело з інтерактивним управлінням
37	 12	Матеріальний потік	53	 17	Інтерактивно-керований пункт обробки даних
38	 18	Розшифрування	54	 31	Інтерактивно-керований пункт приймання даних
39	 16	Кодування	55	 13	Джерело міжрівневих зв'язків
40	 13	Копіювання	56	 12	Пункт приймання з міжрівневими зв'язками
41	 12	Автономна обробка	57	 17	Пункт обробки з міжрівневими зв'язками
42	 3	Інтернет	58	 7	Джерело з ознаками використання ресурсів
43	 18	Мобільний зв'язок	59	 6	Пункт обробки з ознаками використання ресурсів
44	 4	Супутниковий зв'язок	60	 19	Пункт приймання з ознаками використання ресурсів
45	 3	Зверх високочастотний зв'язок	61	 10	Неінтерактивне джерело
46	 3	Зворотній зв'язок інтерактивного управління	62	 17	Пункт обробки даних
47	 3	Езернет – 10 Мбіт/с	63	 16	Незалежний приймач
48	 3	Езернет – 100 Мбіт/с	64	 18	Залежний приймач

Класична ієрархія типових структур інформаційних систем контролю та управління промисловими об'єктами типу SCADA, що випускаються відомими фірмами [6-10], містить три рівні: технологічний, цеховий та адміністративний (рис А2.1).

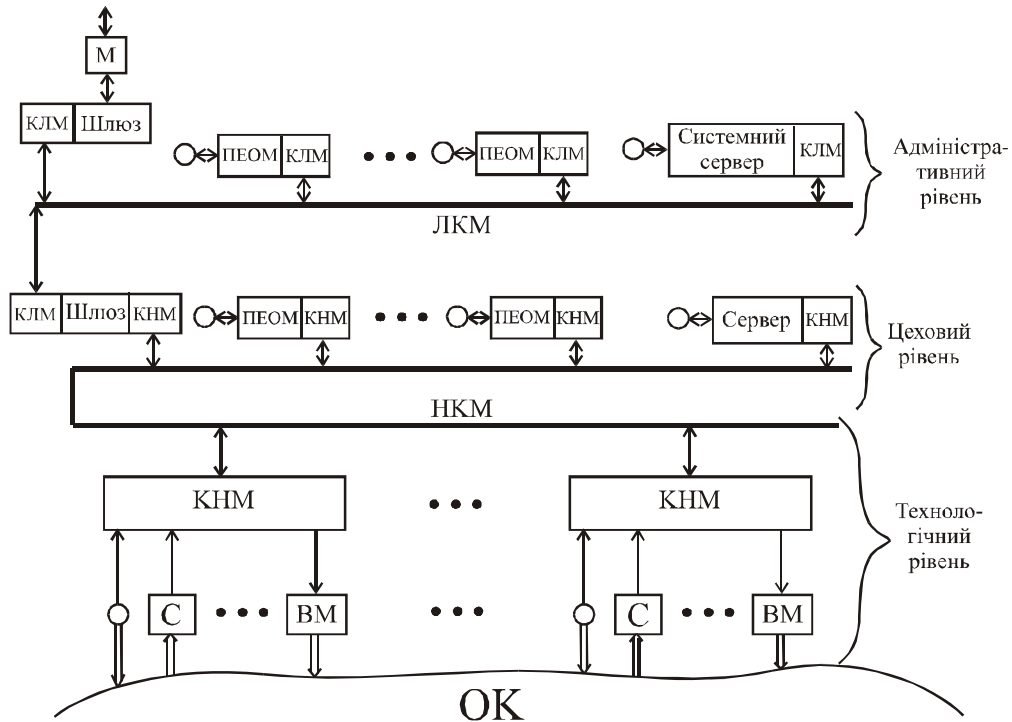


Рис. А2.1 - Трирівнева магістральна архітектура СКС: ОК – об'єкт керування; С – сенсор; ВМ – виконавчий механізм; КНМ – контролер низової мережі; М – модем; О – оператор; КЛМ – контролер локальної мережі; НКМ – низова комп'ютерна мережа; ЛКМ – локальна комп'ютерна мережа.

Для багаторівневих РКС автором розроблена структура взаємодії вложенних матричних моделей руху даних [5] (рис.А2.2), які формалізують структуру руху даних такого класу РКС на основі:

- елементів ММРД низового рівня, що формалізують характеристики відповідних стаціонарних та квазістаціонарних ДІ  $\odot$ , пункти перетворення і кодування первинних даних  $\bigcirc$  і приймачі  $\otimes$ , що є концентраторами даних типу групових контролерів низової мережі;
- елементів ММРД середнього рівня, які визначають пункти обробки і типи операцій в локальній мережі підприємства;
- елементів ММРД верхнього рівня, які формалізують взаємодію документопотоків на адміністративному рівні підприємстві.

Прикладом успішного застосування основ теорії структуризації даних є формалізація структур та організація опрацювання даних у багаторівневих РКС на основі сімейства матричних моделей руху даних [11].

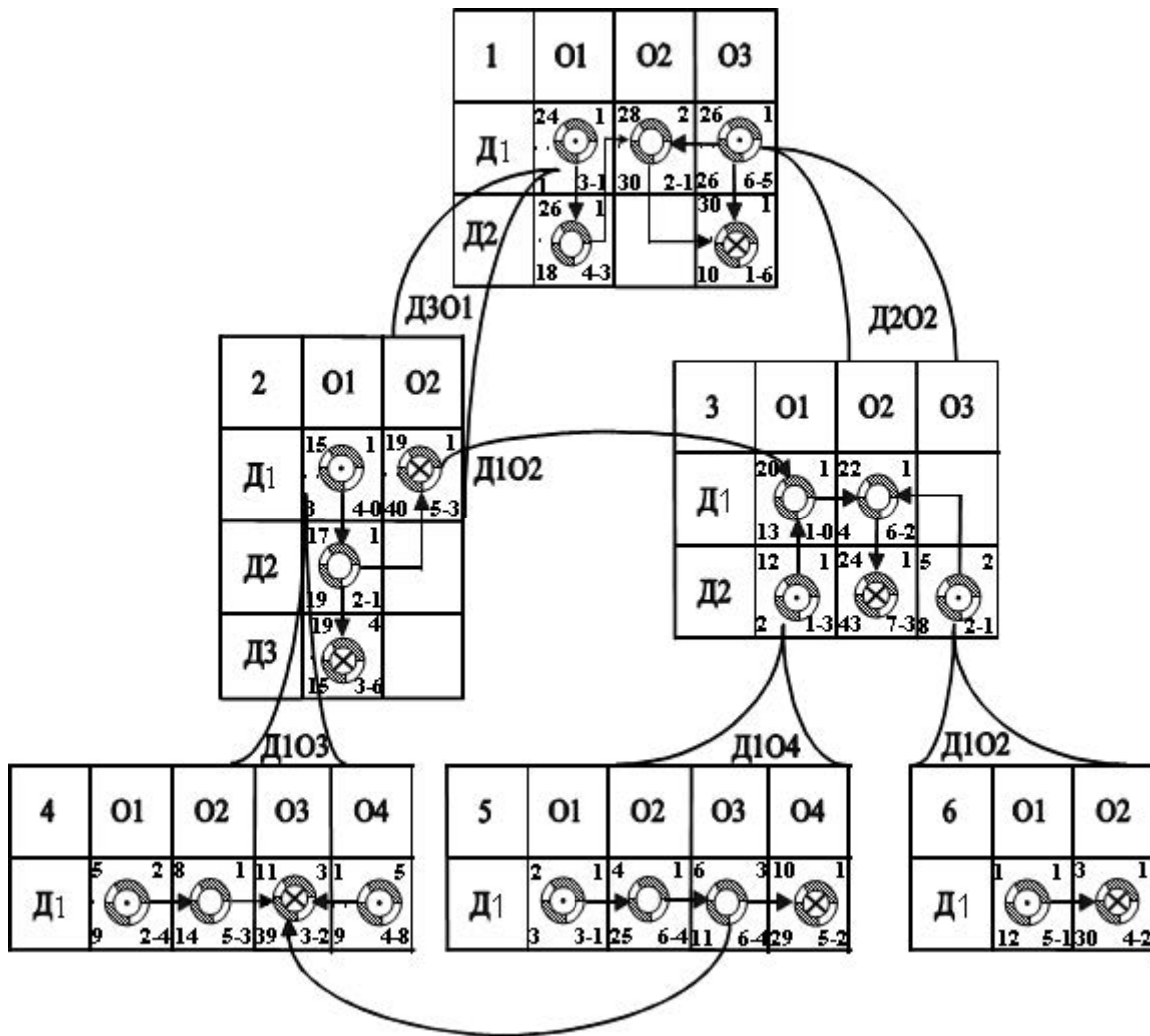


Рис.А2.2 - Багаторівнева матрична модель руху даних.

В загальному випадку відомі методи та моделі організації руху СД в РКС описуються алгоритмом послідовного виконання системних функцій у вигляді [3]:

$$F_{PKC} = F_1[G(V, B)] \Rightarrow F_2[C_{ij}] \Rightarrow F_3[A_{ij}]_{V, B} \Rightarrow F_4[D, K],$$

де  $F_1, F_2, F_3, F_4$  - відповідно формалізований опис процесів організації руху даних у вигляді подання топології РКС, процесів оброблення даних та їх використання для оптимізації параметрів РКС;

$[G(V, B)]$  - орієнтований граф топологічної моделі;

$V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$  - множина вершин елементів архітектур;

$B$  - множина ребер, яка представляє рівні описування об'єкта  $B(V) = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ ;

$[C_{ij}]$  - матриця суміжності, яка описує структурні відношення між елементами системи;

$C_{ij}$  - елемент кількості ребер, спрямованих від вершин  $V_i$  до  $V_j$ ;

$[A_{ij}]_{V, B}$  - булева матриця інцидентів;



$D = \{D_1, \dots, D_l\}$  - сукупність показників критеріїв якості, які поділяються на підгрупи умов, що обмежують функції системи  $Y = \{Y_1, \dots, Y_p\}$ , умов, що обмежують структуру та параметри проектованої системи  $O_s = \{O_{s1}, \dots, O_{sq}\}$ , вектори показників якості, які враховуються в процесі синтезу системи  $K = \langle k_1, \dots, k_m \rangle$ .

Результатом функціоналу  $F_4$  є визначення параметрів допустимої системи  $D = \{Y, O_s, K, O_k\}$ , що задовільняє сукупності обмежень  $O_s$  та умов  $Y$ , причому  $\sum_{i=1}^m K_i = \min$  відповідає наближенню до умови оптимально-структуризованої системи.

Суть одного з існуючих методів організації руху даних у послідовному виконанні функцій полягає у наступному виконанні алгоритмів [12]:

$$F_1[\odot \circ \otimes] \Rightarrow F_2 \left[ \begin{array}{l} E_p = F(T, V, M, S) \\ E_d = F(T, M, V_R, V_W, S) \\ E_{OY} = F(T, M, I, S) \\ E_{СПД} = F(V_R, V_W, P_i, S) \\ E_O = F(T, V_R, V_W, S, M) \\ X_{OY} = F(X(t), M_x, D_x, \sigma_x, R_{xx}, R_{xy}, M_{ij}, S(w), K_{ij}, ЛСИМ, I_x) \end{array} \right] \Rightarrow (A2.1)$$

$$\Rightarrow F_3[K_{ed}, P - V] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_4[M_1, ТМРД, ДММРД, \dots, M_n] \Rightarrow F_5 \left[ \begin{array}{l} EPД \\ \Delta EPД(t_j) \\ \int \Delta EPД(T) dT \\ \sum_{i=1}^n \int \Delta EPД(T) dT \end{array} \right] \Rightarrow F_6[G_{КС}]. (A2.2)$$

де  $\odot \circ \otimes$  - відповідно атрибути джерела, пункту опрацювання та пункту затвердження даних;  $E_p, E_d, E_{OY}, E_{СПД}, E_O$  - відповідно характеристики системних об'єктів РКС (відповідно процесорів, даних, об'єктів управління, систем передавання даних, операторів);  $T$  - часовий параметр,  $V$  - швидкодія перетворення даних,  $M$  - об'єм використовуваної пам'яті,  $S$  - системні ресурси;  $X(t)$  - поточні значення технологічних параметрів ОУ,  $M_x$  - математичне сподівання,  $D_x$  - дисперсія,  $\sigma_x$  - середньоквадратичне відхилення,  $R_{xx}$  - автокореляційна функція,  $R_{xy}$  - взаємкореляційна функція,  $M_{ij}$  - матриця нормованих коефіцієнтів взаємкореляції,  $S(w)$  - спектральні моделі,  $K_{ij}$  - матриця імовірностей переходу в різні стани,  $ЛСИМ$  - логіко-статистична інформаційна модель,  $I_x$  - ентропійна модель;  $K_{ed}$  - коефіцієнт ефективності руху даних,  $P - V$  - собівартість виконання операції в активному вузлі матричної моделі;  $M_1$  - матрична модель руху даних,  $ТМРД(S_0, S_i, C_o, C_i, G)$  -

тривимірний матричний модель руху даних ( $S_0$  – максимальне число записів,  $S_i$  – реальне число записів,  $C_0$  – швидкість створення та передавання даних,  $C_i$  – проектна швидкість створення та передавання даних,  $G$  – завантаженість),  $ДММРД(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, d_0, d_i)$ -двовимірний матричний модель руху даних ( $\alpha_0$ -ресурси зчитування даних;  $\alpha_1$ -ступінь використання ресурсів зчитування даних;  $\alpha_2$ -ступінь використання ресурсів записів;  $d_0, d_i$ - відповідно ресурси та ступінь використання швидкості передавання даних в каналі зв'язку);  $M_n$ -похідні моделі;  $ЕРД$  -сигнальна ЕРД,  $\DeltaЕРД(t_j)$ - диференціальна,  $\int \DeltaЕРД(T)dT$  -інтегральна,  $\sum_{i=1}^n \int \DeltaЕРД(T)dT$  -сумарна інтегральна;  $G_{КС}$  -глобальна характеристика ефективності комп'ютерної системи.

Аналіз існуючого методу організації руху даних в РКС (А2.1, А2.2) на основі однорівневої матричної моделі руху даних показує, що вона характеризується наступними функціональними обмеженнями:

- атрибути джерела, пункту оброблення та пункту затвердження даних

$F_1[\odot \bigcirc \otimes]$  відповідають структурі однорівневої ММРД, що обмежує функціональні можливості такої моделі при проектуванні та діагностуванні характеристик багаторівневих РКС, які формалізовані автором в роботах [13, 14] і адекватно відображаються багаторівневими ММРД, що відповідають трирівневій магістральній архітектурі автоматизованої системи;

- у функціоналі відомого методу  $F_1[\bullet]$ (А2.1):

$$X_{OU} = F(X(t), M_x, D_x, \sigma_x, R_{xx}, R_{xy}, M_{ij}, S(w), K_{ij}, ЛСИМ, I_x) \quad (A2.3)$$

не враховані процедури сумісного формування технологічних даних  $X(t)$  та техніко-економічних даних у вигляді СД, які формуються в реальному часі та враховують характеристики квазістаціонарних станів ДІ;

- характеристичний функціонал об'єкта  $X_{OU}$  не представлений у вигляді фреймів СД, які забезпечують компактне завадозахищене кодування інформації про ОУ, а також захист даних від помилок та несанкціонованого доступу;

- у функціоналі  $F_4[\bullet]$  (А2.2) згідно відомих методів реалізації його моделей

$$F_4[M_1, ТМРД, ДММРД, \dots, M_n] \quad (A2.4)$$

використовується трьохвимірний МРД (ТМРД), яка, виявилася неефективною у практичному застосуванні;

- у функціоналі  $F_4$  для моделювання руху даних в РКС застосована двовимірний модифікований МРД, яка також має функціональні обмеження і її атрибути не можуть бути реалізовані при проектуванні, діагностиці та моделюванні багаторівневих РКС;

- у сукупності похідних моделей руху даних  $M_n$  функціонала  $F_4$  відсутня граф-алгоритмічна модель, яка відображає типи носіїв інформації, каналів зв'язку комп'ютерної мережі, містить розшифровку алгоритмів формування та побудови моделей джерел інформації, а також аналітики цифрової обробки даних у відповідних активних вузлах комп'ютерної системи;

- відомий функціонал існуючого методу  $F_4$  не враховує диференціацію форм та собівартісних характеристик руху даних в активних вузлах багаторівневих диференційованих МРД та відповідної диференціації епюру руху даних.

Суть запропонованих автором методів формування та організації структуризованих даних у багаторівневих ММРД [5, 14-16] полягає у послідовному виконанні функцій наступних алгоритмів:

$$F_1 \left[ \begin{array}{c} \left( \begin{array}{ccc} \text{●}, \text{○}, \text{⊗} & \rightarrow & \text{●}, \text{○}, \text{⊗} \\ \dots & & \dots \end{array} \right) \Rightarrow \\ \left( \begin{array}{ccc} \text{●}, \text{○}, \text{⊗} & \rightarrow & \text{⊗} \end{array} \right) \end{array} \right] \Rightarrow \quad (A2.5)$$

$$\Rightarrow F_2 \left\{ \begin{array}{l} E_p = F(T, V, M, S) \\ E_d = F(T, M, V_R, V_W, S) \\ E_{OY} = F(T, M, I, S) \\ E_{CPII} = F(V_R, V_W, P_i, S) \\ E_O = F(T, V_R, V_W, S, M) \\ X_{OY} = F(S_i : X(t) + TEД, M_x, D_x, \sigma_x, R_{xx}, R_{xy}, M_{ij}, S(w), K_{ij}, LCIM, I_x, CD) \end{array} \right\} \Rightarrow (A2.6)$$

$$\Rightarrow F_3 [K_{ed}, D(P - V)] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_4 [БРМ_1, ДД, БРДММРД, \dots, D(M_n + ГАМ)] \Rightarrow \quad (A2.7)$$

$$\Rightarrow F_5 \left[ \left\{ ДЦРД, ДЕРД, \Delta EPД(t_j), \int \Delta EPД(T) dT, \sum_{i=1}^n \int \Delta EPД(T) dT \right\} \Rightarrow F_6 [G_{KC}] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_7 \left[ \left( \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline \text{start} & T & N & S & \{X\} & \{M\} & \{L\} & \text{stop} \\ \hline \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline \Phi & C_i & C_j & N & S & M & L & TEД & \Phi \\ \hline \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & T & N & S & X & M & L & TEД & I \\ \hline \end{array} \right] \end{array} \right) \Rightarrow F_8 \left[ \left( \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \Phi & C & C & Y & \Phi \\ \hline \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \Phi & C & C_i & Y & G & \Phi \\ \hline \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \Phi & C & C_i & V & Y & \Phi \\ \hline \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \Phi & C & C_i & W & Y & \Phi \\ \hline \end{array} \right] \end{array} \right),$$

де новизна запропонованих наукових рішень по вдосконаленню методів формування та організації руху потоків даних в багаторівневих РКС полягає у розширенні та вдосконаленні функцій організації руху даних на основі [11, 13, 16]:

- багаторівневої матричної моделі руху даних (A2.5);

- розширення функцій формування СД шляхом сумісного кодування технологічних даних  $x(t)$  та ТЕД (A2.5) при заданих квазістаціонарних станах ОУ  $(S_i : )$ , а також реалізація апаратно-програмних засобів синтезованого вводу алфавітно-цифрових даних;

- формування мінімально надлишкових та захищених від помилок фреймів структуризованих даних (СД), які формуються, обробляються, зберігаються та передаються;

- диференціація собівартісних характеристик руху даних в активних вузлах

МРД  $D(P-V) = \sum_{i=1}^m P_i - \sum_{j=1}^n V_j$ , де  $m$  – число диференційованих компонентів

прибутків,  $n$  – число диференційованих компонентів витрат в активному вузлі МРД;

- розширення класу МРД до рівня багаторівневих МРД (БМРД) ;

- врахування диференціації форм документів та даних ММ по відповідних активних вузлах МРД, що відповідають відповідним об'єктам МРД;

- розширення сукупності похідних моделей руху даних шляхом включення в їх склад важливого класу граф-алгоритмічних моделей;

- диференціації циклів руху даних з врахуванням диференціації собівартісних характеристик руху даних в активних вузлах БРДММРД та відповідна диференціація епюр руху даних.

У функціоналах  $F_7$  та  $F_8$  використовуються такі параметри фреймів та атрибути обміну потоками даних між вузлами комп'ютерних систем: start, stop – границі інформаційного файлу фрейма-оператора,  $\Phi$  – границі пакету даних системи передачі даних,  $T$  – реальний час,  $N$  – номер об'єкта,  $S$  – тип виконуваної операції,  $X$  – масив технологічних даних,  $M$  – сукупність інформаційних моделей об'єкта,  $L$  – сукупність логіко-статистичних інформаційних моделей,  $S_i, S_j$  – коди станцій КС, яка передає і приймає дані, ТЕД – техніко-економічні дані, які формуються оператором,  $I$  – інформаційні моделі та характеристики об'єкта,  $Y$  – команди управління,  $G$  – готовність виконання команди управління,  $V$  – дозвіл виконання команди управління,  $W$  – підтвердження виконання команди управління на об'єкті.

Дані структури фреймів реалізуються на різних рівнях РКС згідно стандартних інтерфейсів, протоколів обміну даними, структури фреймів БД, структури файлів використовуваних БД, а також стандартизованих протоколів спеціалізованих комп'ютерних систем.

## Список джерел, використаних у додатку А2

1. Возна Н. Проблеми юриспруденції та інформаційна технологія проектування комп'ютерних мереж на основі законів економічної доцільності / Н.Возна, Л.Шандровська-Николайчук // Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України. - Випуск 26. – Київ, 2004 - С.33-40.
2. Pitukh I. Principles of computer networks construction with deep paralleling of information flows on the basis of matrix models of data movement / I.Pitukh, Y.Nykolaychuk, N.Vozna // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції TCSET'2004 Львів-Славське. - С 417-419/
3. Пітух І. Принципи побудови комп'ютерних мереж з глибоким розпаралелюванням інформаційних потоків на основі матричних моделей руху даних / І.Пітух, Я.Николайчук, Н.Возна // Вісник Національного

- університету "Львівська політехніка" "Радіоелектроніка та телекомунікації". – 2004. - №508. - С. 263-268.
4. Н.Я.Возна Інформаційна технологія побудови граф-алгоритмічної моделі руху техніко-економічних даних. Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці ім.Г.Є.Пухова НАН України "Моделювання та інформаційні технології". – Випуск 39. – Київ. – 2006. – С.44-51.
  5. Возна Н.Я. Організація руху даних в розподілених комп'ютеризованих системах на основі сукупності багаторівневих інформаційних моделей. Поступ в науку. Збірник наукових праць Буцацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач. – 2008. - №4. Т1. – С.202-209.
  6. [www.abb.com](http://www.abb.com) - офіційний сайт компанії АВВ.
  7. [www.es.ua](http://www.es.ua) - офіційний сайт фірми "Електросвіт".
  8. [www.yokogawa.ua](http://www.yokogawa.ua) - офіційний сайт компанії Yokogawa.
  9. <https://tkbr-strila.business-guide.com.ua/>
  10. <https://schneider-electric.ua>
  11. Nykolaichuk Ya.M. Structuring the movement of data in computer systems / Ya.M. Nykolaichuk, N.Ya. Vozna, I.R. Pitukh - Ternopil: Terno-graf, 2013. - 284 р.
  12. Пітух І.Р. Методи організації руху даних в розподілених комп'ютерних системах на основі матричних моделей: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.13 "Обчислювальні машини, системи та мережі" / І.Р. Пітух. – Тернопіль, 2007. – 34 с.
  13. Николайчук Я.М. Теорія моделей руху даних розподілених комп'ютерних систем: Монографія / Николайчук Я.М., Пітух І.Р., Возна Н.Я. - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф", 2008 – 216 с.
  14. Сегін А.І. Методології побудови інформаційних моделей руху даних / А.І. Сегін, Н.Я. Возна // Вісник Технологічного університету Поділля. - 2002. - Т1, №3. - С.128-135.
  15. Возна Н.Я Теорія та методи побудови моделей руху даних у розподілених КС // Вісник національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2010. - №688. – С.60-64.
  16. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем: Навчальний посібник / Я.М.Николайчук, Н.Я.Возна, І.Р.Пітух - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф", 2010. – 392с.

# ДОДАТОК Б1

## Функціонально-інформативні характеристики МРД

№ п/п	Функціонально-інформативні характеристики МРД (S) та їх формалізації (F)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Наявність структурних зв'язків	1/0	1/0	1/1	0/0	1/1	1/1	0/0	1/1	1/1	0/0	0/0	0/0
2	Ідентифікатор активного вузла $D_i O_j$	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	0/1	0/1	0/1	1/1	0/1	0/0
3	Тип атрибута (джерело, пункт обробки, пункт приймання)	1/0	1/1	0/0	1/1	1/1	1/1	1/1	0/0	1/1	0/0	0/1	0/0
4	Інформація про ступінь використання ресурсів	0/0	1/1	0/0	0/0	1/0	1/1	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	0/0
5	Час початку операції $a_{ij}$	1/1	1/1	0/0	1/1	0/0	1/1	1/1	1/1	0/0	1/1	1/1	1/1
6	Тривалість операції $b_{ij}$	1/1	1/1	0/0	1/1	0/0	0/0	1/1	1/1	0/0	1/1	1/1	1/1
7	Тип операції та носія даних $c$	1/1	1/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	5/5	0/0	0/0	0/0
8	Тип каналу зв'язку	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	0/0	0/0	0/0
9	Параметр $P - V$	1/1	1/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	5/5	0/0	6/6
10	Диференційованість параметрів МРД	0/0	1/1	0/0	0/0	1/1	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	0/0	1/1
11	Тип моделі технологічного ДІ $S_i : X(t) + TEД, M_x, L \sigma_x, R_{xx}, R_{xy}, M_{ij}, S(w) K_{ij}, ЛСІМ, I_x, СД$	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	0/0	0/0	0/0
12	Епюри руху даних $ДЦРД, ДЕРД, \Delta EРД(t_j) \int \Delta EРД(T) dT, \sum_{i=1}^n \int \Delta EРД(T) dT, G_{kk}$	0/0	5/5	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	1/1

13	$\sum_{j=1}^m f_j, m=12$	7/ 5	14 /1 3	2/ 2	4/ 4	5/ 4	5/ 5	3/ 4	3/ 4	9/ 10	9/ 9	4/ 6	10 /1 0
14	Однорівневі моделі	7/-	14 /-	1/-	3/-	2/-	3/-	2/-	2/-	6/-	5/-	1/-	0/-

В даній таблиці пронумерована сукупність моделей руху даних [1, 2]:

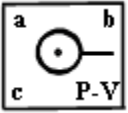
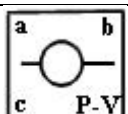
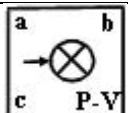
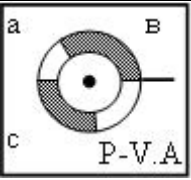
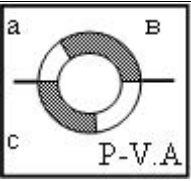
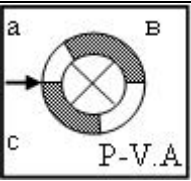

- 1 – матрична модель;
- 2 – модифікована матрична модель;
- 3 – граф-розгалужене дерево;
- 4 – параметрично-часова модель;
- 5 – структурно-часова модель;
- 6 – модель "мережевий графік";
- 7 – суміщений часовий граф;
- 8 – блок-схема алгоритму;
- 9 – граф-алгоритмічна модель;
- 10 – сигнальна ЕРД;
- 11 – інтегрально-глобальна характеристика.
- 12 – ступінь використання ресурсів.

#### Список джерел, використаних у додатку Б1




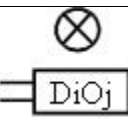

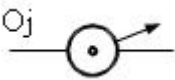
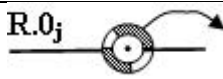
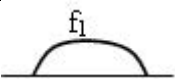
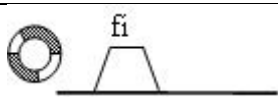
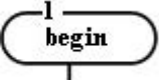
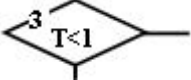

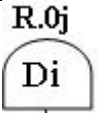
1. Николайчук Я.М. Теория моделей руху даних розподілених комп'ютерних систем: Монографія / Николайчук Я.М., Пітух І.Р., Возна Н.Я. - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф", 2008 – 216 с.
2. Nykolaichuk Ya.M. Structuring the movement of data in computer systems / Ya.M. Nykolaichuk, N.Ya. Vozna, I.R. Pitukh - Ternopil: Terno-graf, 2013.- 284 p.


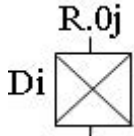
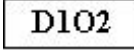

ДОДАТОК Б2

Структурно-інформативні характеристики компонентів атрибутів МРД

№ п/ п	Структура компонента МРД	1	P	x	d	r	h	z	b	c	i	n	$k_c$
		1	2	3	2	2	2	2	8	4	4	2	
1	 $D_i O_j . a . b . c . P - V$ ;	7	4	-	1	-	-	-	5	-	-	1	59
		-	-	-	-	-	-	-	7	-	2	6	80
2	 $D_i O_j . a . b . c . P - V$ ;	7	4	-	2	-	-	-	5	-	-	1	61
		-	-	-	-	-	-	-	7	-	2	6	80
3	 $D_i O_j . a . b . c . P - V$ ;	8	4	1	5	-	-	1	5	-	-	1	73
		-	-	-	-	-	-	-	7	-	2	6	80
4	 $R . D_i . O_j . a . b . C_k . M_k . d_k (P_k - V_k)$	8	4	-	1	-	2	-	6	-	-	2	74
		-	-	-	-	-	-	-	10	-	7	8	124
5	 $R . D_i . O_j . a . b . C_k . M_k . d_k (P_k - V_k)$	8	4	-	2	-	2	-	10	-	-	2	108
		-	-	-	-	-	-	-	10	-	7	8	124
6	 $R . D_i . O_j . a . b . C_k . M_k . d_k (P_k - V_k)$	8	4	1	5	-	2	1	10	-	-	2	119
		-	-	-	-	-	-	-	10	-	7	8	124
7	 $D_i O_j$	5	4	-	1	-	-	-	2	-	2	-	39
									2		2	-	24



8		9	7	-	1	-	1	-	3	-	2	2	63
	R.D <sub>i</sub> O <sub>j</sub>							3		2	1	34	
9		7	4	1	4	-	1	-	2	-	2	-	52
	D <sub>i</sub> O <sub>j</sub>							2		2	-	24	
10		8	4	-	1	-	3	-	3	-	2	1	58
	R.D <sub>i</sub> O <sub>j</sub>							3		2	1	34	
11		9	4	1	4	-	1	-	2	-	2	-	54
	D <sub>i</sub> O <sub>j</sub>							2		2	-	24	
12		4	-	-	2	1	2	-	4	-	2	3	54
	R.DiOj.A							4	-	2	2	40	
13		4	-	-	3	-	-	1	1	-	1	-	24
	D <sub>i</sub> O <sub>j</sub>							2		2	-	24	
14		5	-	-	3	-	2	1	2	-	1	1	39
	R.DiOj							3	-	2	1	34	
15		2	-	-	2	-	-	-	1	-	1	-	18
	DiOj.a <sub>ij</sub> .a <sub>ij</sub> + b <sub>ij</sub>							5	-	8	3	78	
16		6	2	-	2	-	2	-	1	-	1	-	30
	R.D <sub>i</sub> O <sub>j</sub> .d.(a <sub>ij</sub> + b <sub>ij</sub> )							6	-	6	6	84	
17		4	-	-	2	-	-	-	5	1	-	-	52
18		6	4	-	3	-	-	-	1	2	-	1	38
19		6	4	-	3	-	-	-	1	2	1	-	40
20		5	2	-	1	-	-	-	3	-	2	1	45

21		7	8	-	1	-	-	-	-	-	-	25	
22		8	4	1	2	-	-	-	3	-	2	1	57
23		4	4	-	-	-	-	-	2	2	-	-	32
24		4	4	-	2	-	-	-	1	2	-	-	32

На основі приведеної таблиці реалізується проектування організації руху даних в РКС на основі багаторівневої МРД та побудови сімейства її похідних моделей [1-3].

#### Список джерел, використаних у додатку Б2.

1. Николайчук Я.М. Теория моделей руху даних розподілених комп'ютерних систем: Монографія / Николайчук Я.М., Пітух І.Р., Возна Н.Я. - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф", 2008 – 216 с.
2. Nykolaichuk Ya.M. Structuring the movement of data in computer systems / Ya.M. Nykolaichuk, N.Ya. Vozna, I.R. Pitukh - Ternopil: Terno-graf, 2013.- 284p.
3. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем: Навчальний посібник / Я.М.Николайчук, Н.Я.Возна, І.Р.Пітух - Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф". 2010. – 392с.

## ДОДАТОК В1

### Структурна організація поведінки ОУ різних класів стаціонарності

Стаціонарні ОУ – це ОУ, які не змінюють своїх системних характеристик у часі.

Приклад поведінки одного з параметрів  $x(t)$  стаціонарного ОУ наведено на рис.В1.1, де дисперсія  $D_x$  відображає динамічні характеристики стаціонарного ОУ:

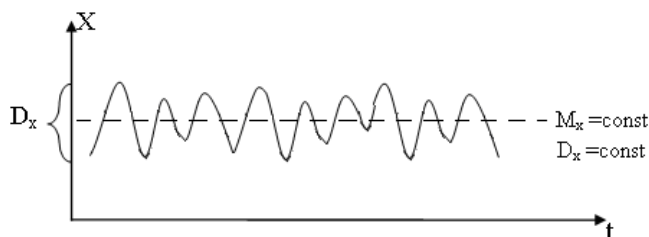


Рис. В1.1 - Приклад поведінки одного з параметрів  $x(t)$  стаціонарного ОУ.

Якщо всі атрибути  $X_{OY}$  незмінні в часі, то ОУ належить до класу стаціонарних. При цьому структура та функції САУ – найпростіші і функції управління реалізуються в автоматичному режимі без адаптації.

Квазістаціонарні ОУ – це такі ОУ, які стрибкоподібно в певний момент часу переходять з одного стаціонарного стану в інший.

Приклади поведінки квазістаціонарних ОУ зі зміною математичних сподівань ( $M_i$ ), кореляційних ( $R_{xx}$ ), спектральних ( $S(\omega)$ ) та ентропійних ( $I_i$ ) характеристик показано на рис. В1.2.

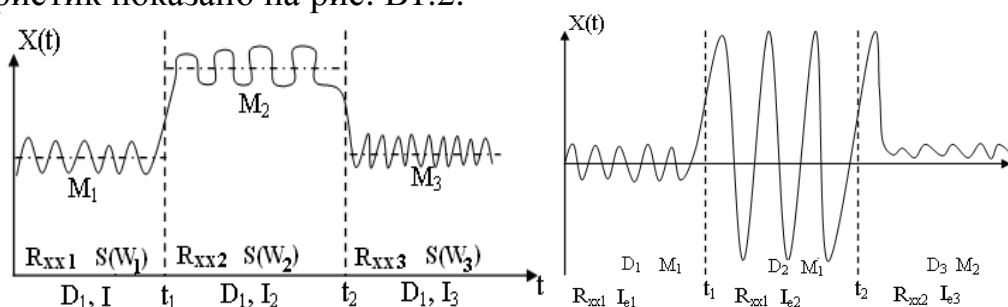


Рис. В1.2 - Приклади поведінки квазістаціонарного ОУ.

Нестаціонарні ОУ – це об'єкти, в яких всі системні характеристики змінюються в часі (рис.В1.3).

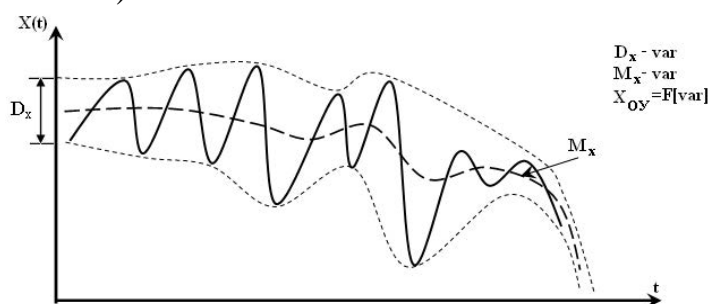


Рис. В1.3 - Приклад поведінки нестаціонарного ОУ.

## ДОДАТОК В2

Дослідження характеристик способів структуризованого кодування станів джерел інформації.

Існують два види способів кодування станів ОУ: лінійні, нелінійні.

У лінійних способах використовують лінійні функції і лінійні перетворення, а у нелінійних – нелінійні перетворення.

### 1.1. Лінійні

1. Представлення станів ОУ у вигляді традиційної моделі подання знань, яка реалізується у вигляді решітчастої функції, яка представлена цифровими відліками, що формуються на виході аналого-цифрових перетворювачів згідно виразу:  $x_i = E \left[ \frac{x(t)}{\Delta} \right]$ , де  $x_i$  - цифровий відлік,  $E[\bullet]$  - цілочисельна функція з округленням до меншого цілого,  $x(t)$  - вхідний аналоговий сигнал,  $\Delta$  - крок квантування по амплітуді;  $i = \Delta t = const$  - крок дискретизації в часі.

Цифрові відліки можуть бути представлені у різних системах числення у різних ТЧБ, у тому числі наступними кодами: число-імпульсними кодами унітарного базису, розрядно-позиційними кодами базису Хаара, двійковими кодами базису Радемахера, модульними кодами системи числення залишкових класів базису Крестенсона, рекурентними кодами базису Галуа, мультбазисними кодами Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона.

### 2. Диференціальний спосіб кодування станів ОУ.

Використання, коли важливою характеристикою ОУ є не амплітуда станів, а динаміка, тобто приріст  $\Delta x_{i+1} = x_i - x_{i-1}$ .

### 3. Спосіб центрування станів ОУ.

Центрування виконується на основі математичного сподівання:

$$\circ \quad x_i = x_i - M_x ; \quad M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ,$$

де  $x_i$  – центроване значення;  $x_i$  – цифрове значення;  $M_x$  – математичне сподівання.

### 4. Інтегральний спосіб

$$Z_i = \sum_{i=1}^n x_i .$$

Даний спосіб використовується у лічильниках витрат електричної енергії, води, газу.

### 5. Цифровий фільтр.

$$Z_i = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \omega_i ,$$

де  $\omega_i$  – вагова функція характеристики цифрового фільтра.

6. Функціональне перетворення

$X_i \rightarrow f(x_i)$  використовується при апроксимації характеристик станів

ОУ. Найчастіше використовуються наступні функції:  $x_i^2$ ,  $\sqrt{x_i}$ ,  $|x_i - x_j|$ ,  
 $(x_i - x_j)^2$ ,  $\log_2 x_i$ ,  $\exp^{(-x_i)}$  та інш.

1.2. Нелінійні

1. Метод залишків:  $b_i = \text{res}x_i(\text{mod } p)$ ,  $\text{res}$  – операція обчислення найменшого невід'ємного залишку по  $\text{mod } p$ .

Якщо  $\Delta x_i \leq \frac{p}{2}$ , то стани ОУ можна однозначно представити  $x_i, b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n$ .

2.  $\Delta$ -модуляція:  $\Delta x \leq \pm 1$ .

Метод, запропонований академіком О.О.Харкевичем, дозволяє перетворювати багаторівневі послідовності цифрових відліків  $x_i$  у біт-орієнтовані інформаційні потоки, широко застосовується в аудіосистемах [Харкевич, А.А. Основы радиотехники / А.А. Харкевич. - 3-е изд., стер. - Москва : Физматлит, 2007. - 513 с. - ISBN 978-5-9221-0790-7].

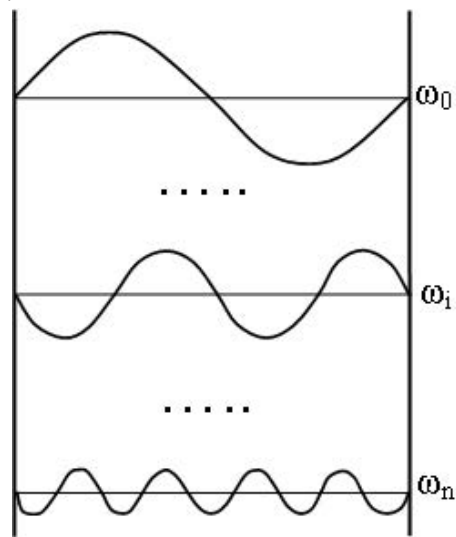
## ДОДАТОК Г

### Аналіз кодових систем різних теоретико-числових базисів

#### 1. Кодова система перетворення Фур'є.

Базис Фур'є широко застосовується для опрацювання даних у часовій, комплексній та спектральній областях, в той же час даний базис на основі гармонічних функцій не породжує системи числення, що ускладнює рішення широкого класу задач на основі дискретної математики, тобто потребує розкладу ортогональних косинусоїдальних функцій у ряди Фур'є, Маклорена та Тейлора. Такі характеристики базису Фур'є ускладнюють алгоритми рішення задач цифровими мікропроцесорними засобами. Тому сучасні алгоритми цифрового опрацювання сигналів побудовані на математичній основі дискретних ступінчатих функцій.

Представлення функцій базису Фур'є у модульному просторі дозволяє представити базисні функції не в діапазоні  $(\pm 1)$ , а в діапазоні  $(0,1)$ . В результаті отримують систему не ортогональних гармонічних функцій, показану на рис.Г.1.



$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t))$$

$\omega = 2\pi/T$  - колова частота основної гармоніки з періодом  $T$ ;

$a_k$  і  $b_k$  - коефіцієнти ряду Фур'є:

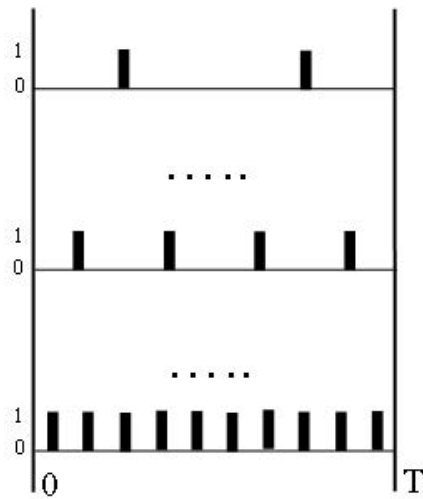
$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(k\omega t) dt, (k = \overline{1, \infty})$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(k\omega t) dt, (k = \overline{1, \infty})$$

$$\int_0^T x_i(t) \cdot x_j(t) dt = 0$$

Рис.Г.1 - Система модульних гармонічних функцій базису Фур'є.

Виконавши операцію диференціювання та прирівнювання похідної до 0 на основі даної системи гармонічних функцій на інтервалі  $(0, T)$   $\frac{d(x)}{d(t)} = 0$  отримують систему числоімппульсних кодів (рис.Г.2).



$$\frac{d(x)}{d(t)} = 0$$

$$x(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0; \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & i = n\Delta t; \\ 0, & i \neq n\Delta t \end{cases}$$

$\Delta t$  - крок дискретизації

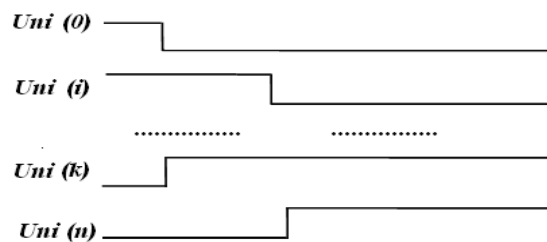
Рис.Г.2 - Система решітчастих одиничних функцій числоімпульсних кодів.

Число-імпульсні коди широко застосовуються в цифровій вимірювальній техніці при побудові частотомірів, сенсорів з частотномодульованими вихідними імпульсними потоками, число-імпульсних спеціалізованих процесорів функціонального опрацювання інформаційних потоків та цифрових фільтрів [1, 2].

## 2. Унітарна кодова системи та ТЧБ Хаара.

Для подання унітарних кодів використовуються унітарні функції (рис.Г.3) [3].

Система з перших  $N$  унітарних функцій порядку  $m$  є лінійно незалежною, оскільки виконується достатня умова лінійної незалежності: ранг матриці  $N$  функцій дорівнює кількості функцій  $N$ . Наступні  $N$  функцій є лінійними комбінаціями  $N$  перших.



$$Uni(m, \theta, i) = \text{sign}(\sin(2^m \pi(\theta + i \cdot 2^{-n})))$$

$$m = 0, 1, \dots, n+1$$

де  $n = \log_2 N$ ;  $N$  – модуль цілочисельних дискретних значень системи;

$\theta = t/T$ ; ( $0 \leq \theta < 1$ ) – нормований параметр часу;

$T = 2\pi$ ;  $t$  – потокове значення часу;  $0 \leq t < 2\pi$ ;

$i = 0, 1, \dots, 2^{n-m+1} - 1$  – порядковий номер функції в наборі порядку  $m$ .

Рис.Г.3 - Функції унітарного ТЧБ.

Унітарні функції не ортогональні, оскільки  $\int_0^1 Uni(m, \theta, i) Uni(k, \theta, j) d\theta \neq 0$  (рис.Г.4).



Рис.Г.4 - Унітарні функції нульового порядку.

В той же час, шляхом диференціювання системи функцій унітарного ТЧБ забезпечує їх представлення у вигляді системи імпульсних ортогональних функцій.

Дана властивість системи унітарних функцій зумовлює некомпактне пакування кодових елементів системи, що приводить до значної надлишковості інформаційних потоків, які утворюють унітарну систему числення та унітарні коди.

Породжуючу кодову матрицю унітарного коду розмірності  $N \times N$  одержують при дискретизації з інтервалом  $1/N$  за параметром часу перших  $N=2^n$  із системи  $2N$  унітарних функцій та здійсненні бінарної заміни значень функцій 1 на 0, -1 на 1 в точках  $\theta_s = s/2^n$ ,  $s = 0, 1, \dots, 2^n - 1$ , яка реалізується за допомогою операції

$$u_i = (1 - Uni(0, \theta_s, 2^n - 1 - i)) / 2,$$

де  $u_0, u_1, \dots, u_i, \dots, u_{2^n-1}$  - значення розрядів унітарного коду  $\theta_s, i = 0, 1, \dots, 2^n - 1$ .

Для прикладу, при  $n=3$  восьми функціям відповідають такі елементи кодової матриці:

$$\begin{aligned}
 Uni(0, \theta, 0) &\rightarrow 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 Uni(0, \theta, 1) &\rightarrow 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \\
 Uni(0, \theta, 2) &\rightarrow 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \\
 Uni(0, \theta, 3) &\rightarrow 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 Uni(0, \theta, 4) &\rightarrow 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 Uni(0, \theta, 5) &\rightarrow 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 Uni(0, \theta, 6) &\rightarrow 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 Uni(0, \theta, 7) &\rightarrow 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1
 \end{aligned}$$

Наведені властивості системи унітарних функцій дозволяють визначити процедури міжбазисних перетворень. В ролі первинних при перетворенні форми інформації та при переході від  $N$ -розрядних унітарних до кодів з меншою розрядністю також використовуються розрядно-позиційні коди.

### 3. Характеристика кодової матриці ТЧБ Радемахера.

Екстракція *sin*-складових за кожним із порядків  $n$  набору дискретно-фазових функцій утворює систему функцій Радемахера [3, 4] (рис.Г.5).

Система Радемахера є основою двійкової системи числення або двійкових кодів.



Відповідність між значеннями функцій у точках  $\theta_s = s/2^n$ ,  $s = 0, 1, \dots, 2^n - 1$  та їх поданням у двійковому коді  $\theta_s = r_n r_{n-1} \dots r_0$  встановлюється співвідношенням:  $r_k = (1 - \text{Rad}(n - k, \theta_s))/2$ , де  $r_k$  - значення розрядів двійкового коду,  $k = 0, 1, \dots, n$ .

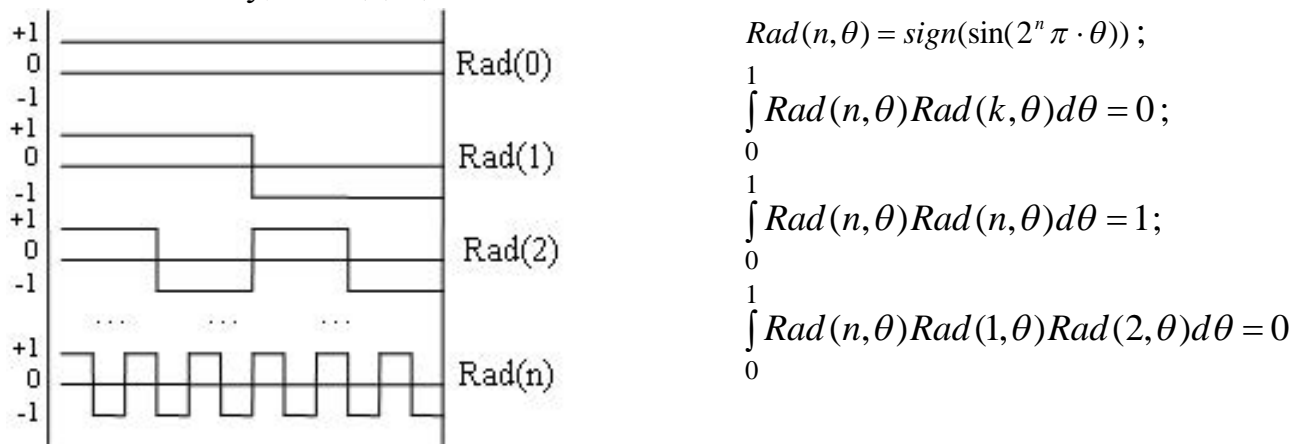


Рис.Г.5 - Ортогональні функції ТЧБ Радемахера.

Система Радемахера володіє наступними властивостями.

1. Функції Радемахера ортонормовані на відрізку  $[0, 1)$ , оскільки

$$\int_0^1 \text{Rad}(n, \theta) \text{Rad}(k, \theta) d\theta = 0 \text{ та } \int_0^1 \text{Rad}(n, \theta) \text{Rad}(n, \theta) d\theta = 1.$$

2. Система функцій Радемахера утворює в просторі інтегрованих з квадратом функцій  $L_2[0, 1)$  неповну систему ортонормованих функцій, оскільки для довільного  $n$  не виконується означення повноти системи:

$$\int_0^1 \text{Rad}(n, \theta) \text{Rad}(1, \theta) \text{Rad}(2, \theta) d\theta = 0,$$

тобто існує функція  $\text{Rad}(1, \theta) \text{Rad}(2, \theta)$ , яка тотожно не дорівнює нулю на інтервалі  $[0, 1)$  та ортогональна до всіх функцій системи.

Неповнота системи Радемахера обмежує її застосування для подання інформаційних потоків на основі ортогональних перетворень [4]. Одночасно із широким застосуванням, творені за допомогою системи Радемахера двійкові коди, володіють недоліком, що полягає у неоднозначності формування відліків суміжних кодів при міжрозрядному позиціонуванні.

4. Теоретичні засади перетворень ТЧБ Крестенсона.

ТЧБ Крестенсона формується на основі системи пилоподібних ортогональних функцій (рис.Г.6).

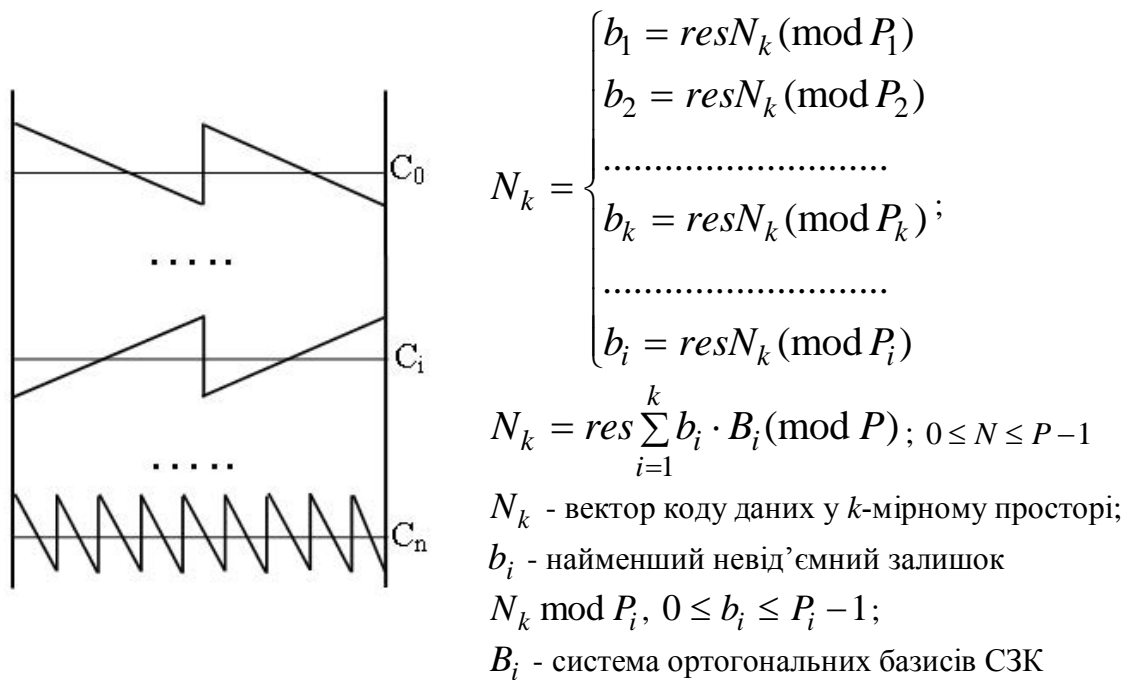


Рис.Г.6 - Система пилоподібних ортогональних функцій ТЧБ Крестенсона.

Система ортогональних базисів СЗК  $B_i$ , які задовольняють умови діагональної матриці:

$$\begin{array}{cccccc}
 & P_1 & P_2 & \dots & P_i & \dots & P_k \\
 B_1 = & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\
 B_2 = & 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 B_i = & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 B_k = & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1
 \end{array}
 , \text{ тобто }
 \begin{array}{cccccc}
 B_1 = & (1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0) \\
 B_2 = & (0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0) \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 B_i = & (0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0) \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 B_k = & (0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1)
 \end{array}$$

а значення  $B_i$  розраховуємо згідно рішення діофантового рівняння

$$B_i = \frac{P}{P_i} \cdot m_i \equiv 1 \pmod{P_i}; 1 \leq m_i \leq P_i - 1; P = \prod_{i=1}^k P_i, i \in \overline{1, k}$$

Слід зауважити, що система ортогональних функцій базису Крестенсона відповідає системі фазових функцій ТЧБ Фур'є і породжує систему числення залишкових класів з набором взаємпростих модулів  $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k$ , які відповідають взаємпростим періодам гармонічних функцій базису Фур'є.

### 5 Характеристика квазіортогональної кодової системи Галуа.

ТЧБ Галуа характеризується рекурентними властивостями і породжується системою ортогональних ступінчатих функцій базису Уолша, які можуть бути впорядковані по Пилі і по Качмажу (рис.Г.7).

Властивості системи Радемахера та відповідних кодів визначають процедуру переходу в базис Уолша  $Wal(i, \theta)$ ,  $i = 0, 1, \dots, 2^n - 1$ , впорядкований за Уолшем, із системи Радемахера  $Rad(n, \theta)$ . Функції Уолша  $Wal(i, \theta)$  визначаються як добуток функцій Радемахера:



Рис.Г.7 - Система функцій Уолша

Тобто в середовищі ортогональних функцій Уолша існують такі окремі функції, які характеризуються рекурентними властивостями і породжують систему квазіортогональних функцій Галуа, добуток яких на інтервалі (0, N) не перевищує  $\pm 1$  (рис.Г.8).

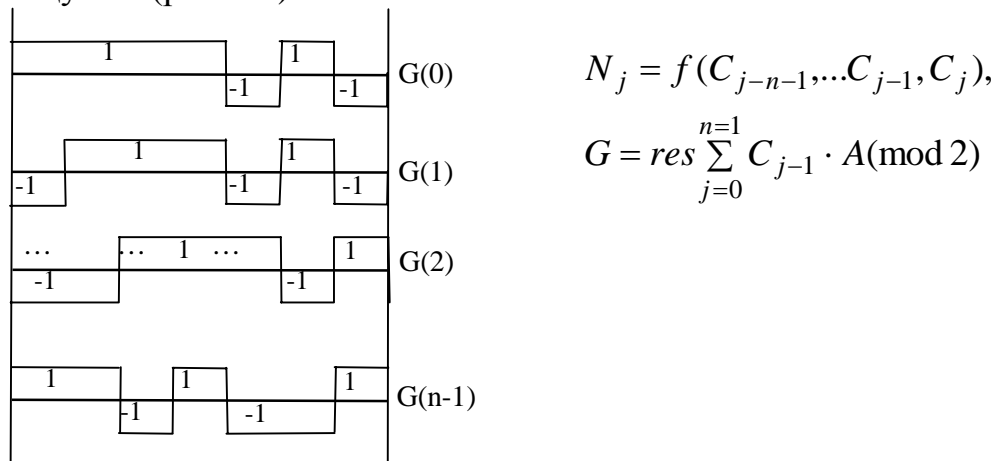


Рис.Г.8 - Система функцій Галуа.

Кодова система ТЧБ Галуа широко застосовується при вирішенні задач шифрування інформації, передавання інформації з виявленням та виправленням помилок, стиснення інформації, побудови АЦП скануючого типу, побудови процесорів та асоціативної пам'яті з паралельним доступом на основі вертикальної інформаційної технології, створення сенсорів з біторієнтованими частотномодульованими потоками кодів поля Галуа.

Кодова система базису Галуа на основі гармонічних функцій базису Фур'є у квадратичному просторі (рис.Г.9) [3].

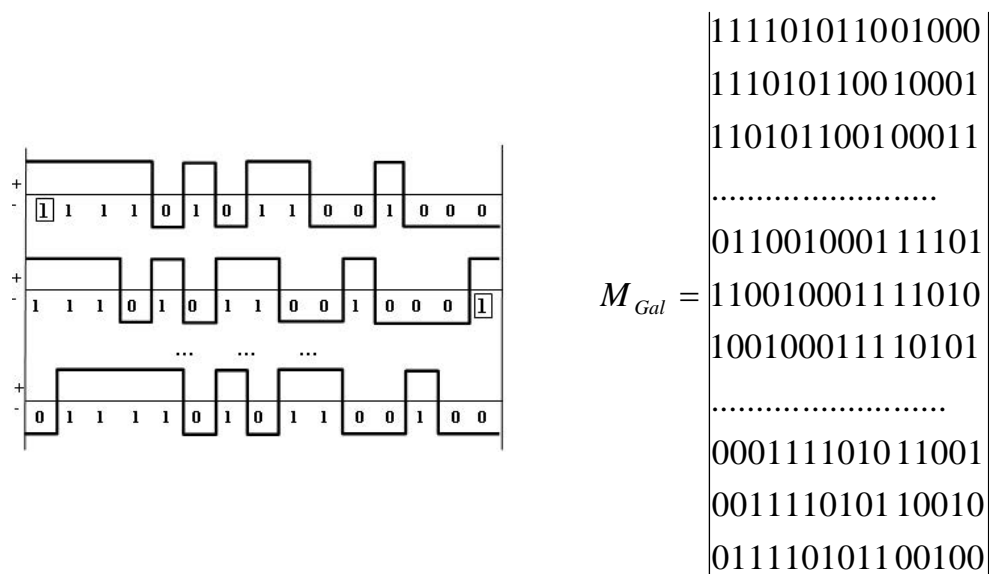


Рис.Г.9 - Кодова система базису Галуа.

Виконуючи операції диференціювання в особливих точках даного класу функцій, утворюється кодова система рекурентних функцій з властивостями ТЧБ Галуа.

З метою оцінки ефективності кодування даних на основі різних ТЧБ доцільно провести аналіз кодових матриць, які породжують різні системи числення [3, 4].

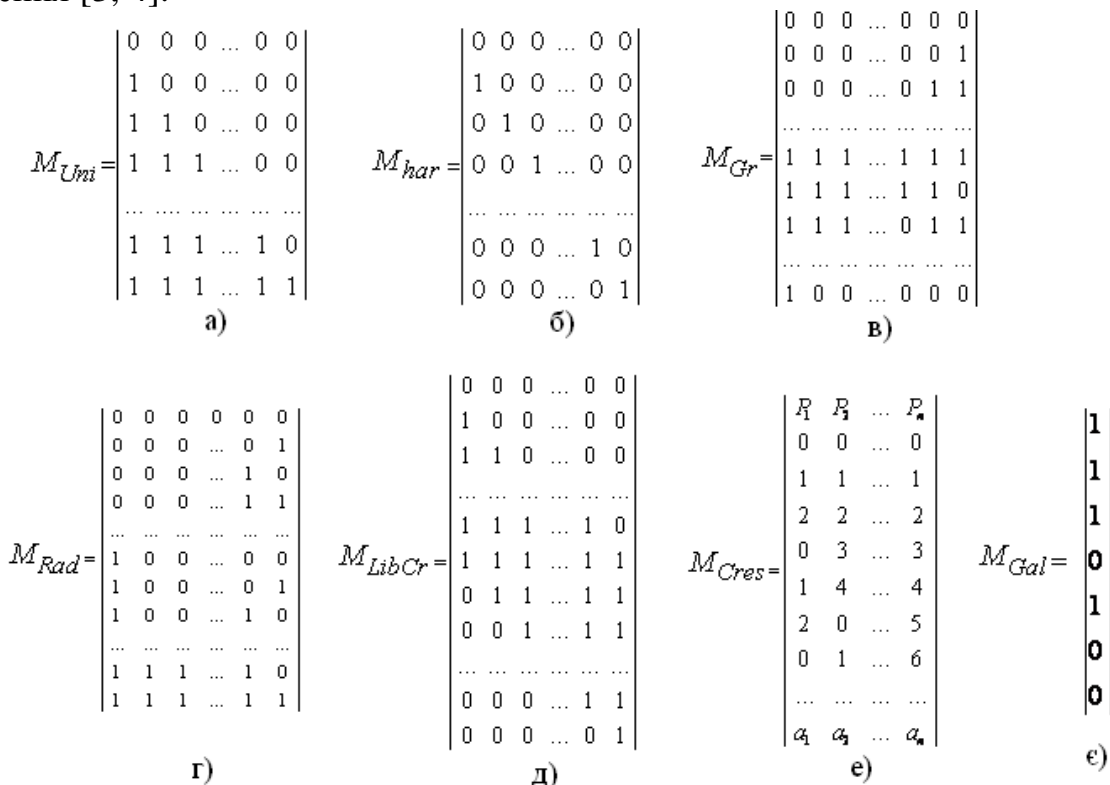


Рис.Г.10 - Кодові матриці дискретних базисів (а - унітарного, б - Хаара; в - Грея; г - Радемахера; д – Крейга; е - Крестенсона; е - Галуа).

При цьому важливою характеристикою кожного базису є об'єм його кодової матриці  $M_j$  та число активних елементів  $m_j$ , що визначає

характеристики надлишковості представлення інформації на основі аналітичної оцінки [5]:

$$V = n \cdot N ,$$

де  $n$  – розрядність числа;

$N$  - число незалежних кодових значень.

Оцінка ефективності кодових базисів проводиться за виразом:

$$K_{\text{ефект}} = \frac{N}{V} ,$$

де  $K_{\text{ефект}}$  – коефіцієнт ефективності кодових базисів;

$N$  – кількість кодових комбінацій,  $V$  – об’єм кодової матриці.

Результат порівняння кодових базисів представлено графіком (рис.Г.11).

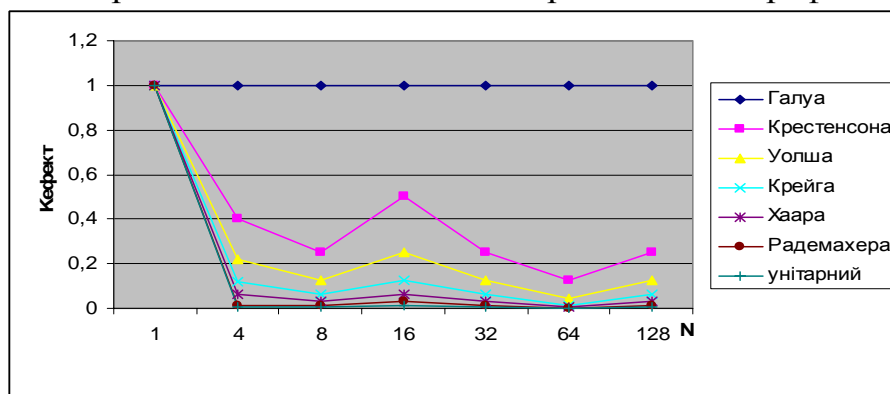


Рис.Г.11 - Коефіцієнт ефективності дискретних кодових базисів.

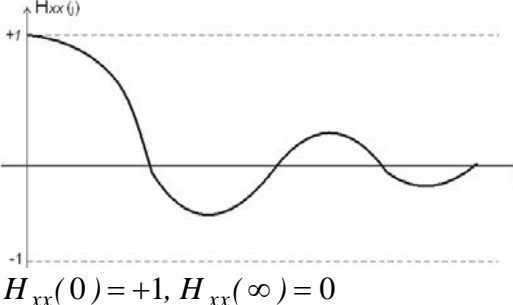
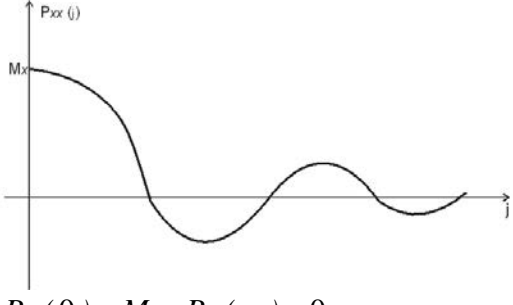
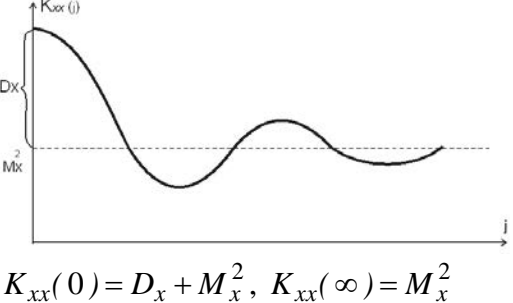
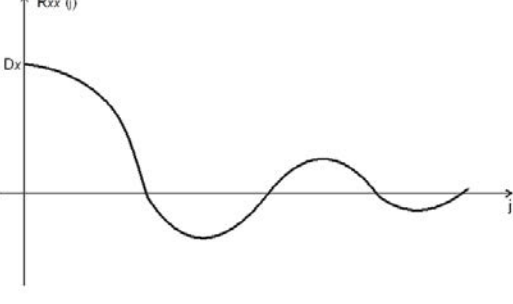
Аналіз графіків, наведених на рис.Г.11, показує, що найбільш компактним і ефективним для кодування і представлення даних є теоретико-числовий базис Галуа, оскільки він має коефіцієнт ефективності  $K_{\text{ефект}}=1$ .

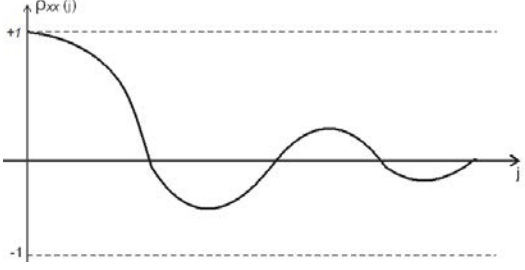
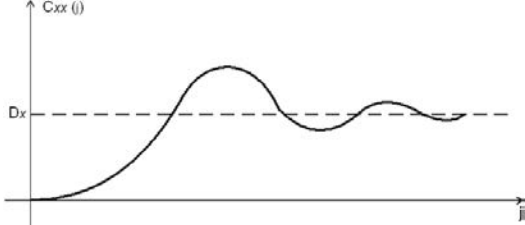
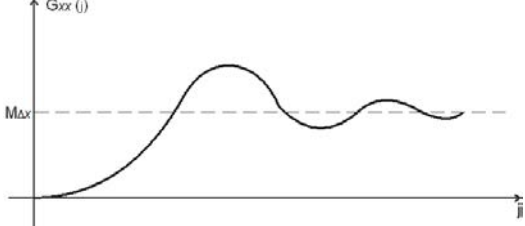
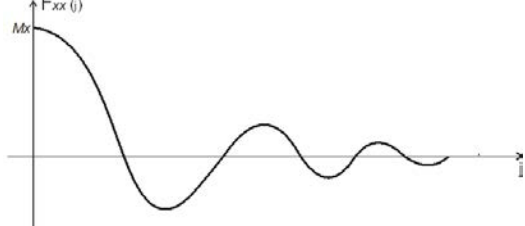
Список джерел, використаних у додатку Г.

1. Числоимпульсные функциональные преобразователи с импульсными обратными связями: монография / В.Б.Дудикевич, В.М.Максимович, Л.В.Мороз; Нац. ун-т «Львов. политехника». — Л. : Изд-во Львов. политехники, 2011. - 244 с.
2. Николайчук Я.Н., Зевелев С.Я. Числоимпульсное множильное устройство. А.С. №754414.-Бюллетень №29.-1980.
3. Николайчук Я.М. Коды поля Галуа: теорія та застосування / Я.М. Николайчук // Монографія - Тернопіль: ТЗОВ «Тернограф», 2012. – 576с.
4. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації / Я.М. Николайчук – Тернопіль: ТЗОВ „Терно–граф”, 2010. – 536 с.
5. Николайчук Я.М. Теоретичні засади та принципи побудови арифметико-логічного пристрою на основі вертикально-інформаційної технології /Я.М. Николайчук, О.М. Заставний, П.В. Гуменний// Вісник Хмельницького національного технічного університету. –2012. – №2. – С.190-197.

# ДОДАТОК Д1

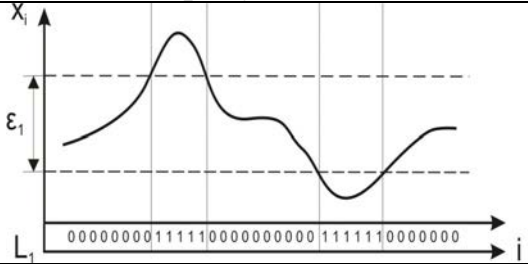
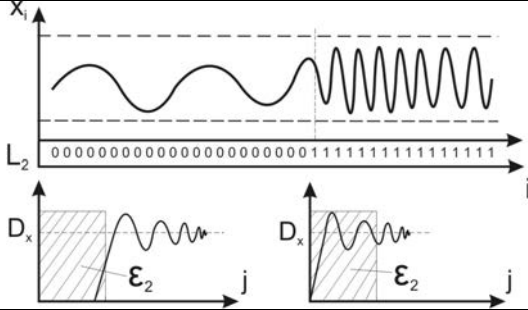
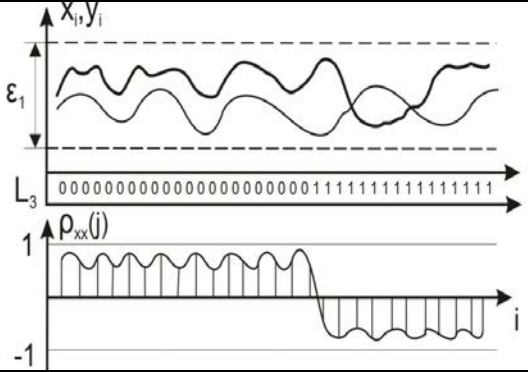
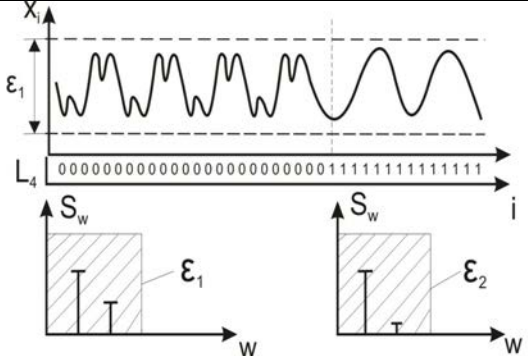
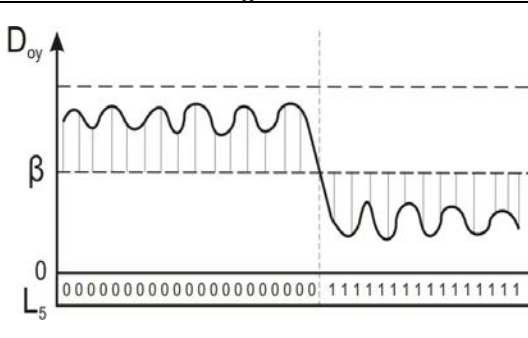
## Аналітика та асимптотика автокореляційних функцій

№ п/ п	Кореляційна функція	Графічне зображення та асимптотика	Аналітичний вираз
1	Знакова	 <p><math>H_{xx}(0) = +1, H_{xx}(\infty) = 0</math></p>	$H_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign } x_i \cdot \text{sign } x_{i+j}$ $\text{sign } x_i = \begin{cases} +1, & x_i \geq 0 \\ -1, & x_i < 0 \end{cases}$
2	Релейна	 <p><math>P_{xx}(0) = M_x, P_{xx}(\infty) = 0</math></p>	$P_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \text{sign } x_{i+j}$
3	Коваріаційна	 <p><math>K_{xx}(0) = D_x + M_x^2, K_{xx}(\infty) = M_x^2</math></p>	$K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j}$
4	Кореляційна	 <p><math>R_{xx}(0) = D_x, R_{xx}(\infty) = 0</math></p>	$R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j}$

5	Нормована кореляційна	 <p><math>\rho_{xx}(0) = +1, \rho_{xx}(\infty) = 0</math></p>	$\rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{D_x},$ $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2$
6	Структурна	 <p><math>C_{xx}(0) = 0, C_{xx}(\infty) = D_x</math></p>	$C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+j})^2$
7	Модульна	 <p><math>G_{xx}(0) = 0, G_{xx}(\infty) = M_x</math></p>	$G_{xx}(j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n  x_i - x_{i+j} $
8	Еквівалентності	 <p><math>F_{xx}(0) = M_x, F_{xx}(\infty) = 0</math></p>	$F_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{xx}^{\vee},$ $Z_{xx}^{\vee} = \begin{cases} x_i, & x_i < x_{i+j} \\ x_{i+j}, & x_i \geq x_{i+j} \end{cases}$

ДОДАТОК Д2

Аналітика та продукційні моделі ЛСІМ

Аналітичний вираз	Продукційна модель
<p>Відхилення по амплітуді ЛСІМ-1</p> $L_1 = \begin{cases} 0, & x_i \in \varepsilon_1 \\ 1, & x_i \notin \varepsilon_1 \end{cases}, L_1 \in \overline{0,1}$	
<p>Відхилення по динаміці ЛСІМ-2</p> $L_2 = \begin{cases} 0, & C_{xx}(j) \in \varepsilon_2 \\ 1, & C_{xx}(j) \in \varepsilon_1 \end{cases}$ $C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-j})^2 \quad j = 0, 1, 2, \dots, m$	
<p>Відхилення по фазі ЛСІМ-3</p> $L_3 = \begin{cases} 0, & \rho_{xy}(0) \geq 0 \\ 1, & \rho_{xy}(0) < 0 \end{cases}, \rho_{xy}(0) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sqrt{D_x D_y}}$	
<p>Відхилення по спектру ЛСІМ-4</p> $L_4 = \begin{cases} 0, & S_w \in \varepsilon_4 \\ 1, & S_w \notin \varepsilon_4 \end{cases} \quad S_w = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \rho_{xx}(j) \cdot w_j \cdot e^{-\alpha \cdot j}$	
<p>Відхилення по глобальній дисперсії ЛСІМ-5</p> $L_5 = \begin{cases} 0, & D_{i0} > \beta \\ 1, & D_{i0} \leq \beta \end{cases}$ <p><math>0 &lt; \beta &lt; 1</math> - коефіцієнт деградації ОУ, <math>D_{i0}</math> - глобальна дисперсія.</p>	



Приведена система ЛСІМ характеризується розширеними функціональними характеристиками, оскільки в існуючих моніторингових системах використовується тільки перша ЛСІМ, яка контролює відхилення технологічного процесу по амплітуді. Такі відхилення від норми ОУ виникають при впливі зовнішніх збурень, що перевищують можливості критеріїв стійкості П, Ш, ПД, ПІД-регуляторів. ЛСІМ 2, ЛСІМ 3 контролюють та реєструють відхилення станів ОУ від норми по динаміці, фазі та спектру потребують попереднього статичного, кореляційного та спектрального опрацювання сигналів сенсорів при відсутності амплітудних відхилень, що суттєво покращує характеристики моніторингової системи. Тому дані ЛСІМ застосовуються при побудові образно-кластерних моделей квазістаціонарних ОУ. Функціональними обмеженнями ЛСІМ 1-ЛСІМ 4 є цифрове опрацювання одномірних випадкових процесів. ЛСІМ 5 розраховується на основі інформативної частини матриці коефіцієнтів взаємкореляції між парами технологічних параметрів шляхом обчислення глобальної дисперсії квадратів парних коефіцієнтів взаємкореляції. При цьому, як видно з асимптотики ЛСІМ 5, якщо технологічний процес знаходиться у стані норми, то глобальна дисперсія перевищує заданий пороговий коефіцієнт. У випадку, коли глобальна дисперсія приймає значення менше заданого порогу, об'єкт ідентифікується у стані відхилення від норми. Важливою функцією такої ЛСІМ є градієнт зменшення значення глобальної дисперсії, який може бути застосований для розпізнавання тенденції деградації стану об'єкта та попередження виникнення передаварійних ситуацій.

## ДОДАТОК Е

### Багаторозрядні незвідні поліноми

(1, 0)	(40, 5, 4, 3, 0)	(75, 6, 3, 1, 0)
(2, 1, 0)	(41, 3, 0)	(76, 5, 4, 2, 0)
(3, 1, 0)	(42, 7, 4, 3, 0)	(77, 6, 5, 2, 0)
(4, 1, 0)	(42, 5, 4, 3, 2, 1, 0)	(78, 7, 2, 1, 0)
(5, 2, 0)	(43, 6, 4, 3, 0)	(79, 9, 0)
(6, 1, 0)	(44, 6, 5, 2, 0)	(79, 4, 3, 2, 0)
(7, 1, 0)	(45, 4, 3, 1, 0)	(80, 9, 4, 2, 0)
(7, 3, 0)	(46, 8, 7, 6, 0)	(80, 7, 5, 3, 2, 1, 0)
(8, 4, 3, 2, 0)	(46, 8, 5, 3, 2, 1, 0)	(81, 4, 0)
(9, 4, 0)	(47, 5, 0)	(82, 9, 6, 4, 0)
(10, 3, 0)	(48, 9, 7, 4, 0)	(82, 8, 7, 6, 1, 0)
(11, 2, 0)	(48, 7, 5, 4, 2, 1, 0)	(83, 7, 4, 2, 0)
(12, 6, 4, 1, 0)	(49, 9, 0)	(84, 13, 0)
(13, 4, 3, 1, 0)	(49, 6, 5, 4, 0)	(84, 8, 7, 5, 3, 1, 0)
(14, 5, 3, 1, 0)	(50, 4, 3, 2, 0)	(85, 8, 2, 1, 0)
(15, 1, 0)	(51, 6, 3, 1, 0)	(86, 6, 5, 2, 0)
(16, 5, 3, 2, 0)	(52, 3, 0)	(87, 13, 0)
(17, 3, 0)	(53, 6, 2, 1, 0)	(87, 7, 5, 1, 0)
(17, 5, 0)	(54, 8, 6, 3, 0)	(88, 11, 9, 8, 0)
(17, 6, 0)	(54, 6, 5, 4, 3, 2, 0)	(88, 8, 5, 4, 3, 1, 0)
(18, 7, 0)	(55, 24, 0)	(89, 38, 0)
(18, 5, 2, 1, 0)	(55, 6, 2, 1, 0)	(89, 51, 0)
(19, 5, 2, 1, 0)	(56, 7, 4, 2, 0)	(89, 6, 5, 3, 0)
(20, 3, 0)	(57, 7, 0)	(90, 5, 3, 2, 0)
(21, 2, 0)	(57, 5, 3, 2, 0)	(91, 8, 5, 1, 0)
(22, 1, 0)	(58, 19, 0)	(91, 7, 6, 5, 3, 2, 0)
(23, 5, 0)	(58, 6, 5, 1, 0)	(92, 6, 5, 2, 0)
(24, 4, 3, 1, 0)	(59, 7, 4, 2, 0)	(93, 2, 0)
(25, 3, 0)	(59, 6, 5, 4, 3, 1, 0)	(94, 21, 0)
(26, 6, 2, 1, 0)	(60, 1, 0)	(94, 6, 5, 1, 0)
(27, 5, 2, 1, 0)	(61, 5, 2, 1, 0)	(95, 11, 0)
(28, 3, 0)	(62, 6, 5, 3, 0)	(95, 6, 5, 4, 2, 1, 0)
(29, 2, 0)	(63, 1, 0)	(96, 10, 9, 6, 0)
(30, 6, 4, 1, 0)	(64, 4, 3, 1, 0)	(96, 7, 6, 4, 3, 2, 0)
(31, 3, 0)	(65, 18, 0)	(97, 6, 0)
(31, 6, 0)	(65, 4, 3, 1, 0)	(98, 11, 0)
(31, 7, 0)	(66, 9, 8, 6, 0)	(98, 7, 4, 3, 1, 0)
(31, 13, 0)	(66, 8, 6, 5, 3, 2, 0)	(99, 7, 5, 4, 0)
(32, 7, 6, 2, 0)	(67, 5, 2, 1, 0)	(100, 37, 0)
(32, 7, 5, 3, 2, 1, 0)	(68, 9, 0)	(100, 8, 7, 2, 0)
(33, 13, 0)	(68, 7, 5, 1, 0)	(101, 7, 6, 1, 0)
(33, 16, 4, 1, 0)	(69, 6, 5, 2, 0)	(102, 6, 5, 3, 0)
(34, 8, 4, 3, 0)	(70, 5, 3, 1, 0)	(103, 9, 9)
(35, 2, 0)	(71, 6, 0)	(104, 11, 10, 1, 0)

(36, 11, 0)	(71, 5, 3, 1, 0)	(105, 16, 0)
(36, 6, 5, 4, 2, 1, 0)	(72, 10, 9, 3, 0)	(106, 15, 0)
(37, 6, 4, 1, 0)	(72, 6, 4, 3, 2, 1, 0)	(107, 9, 7, 4, 0)
(37, 5, 4, 3, 2, 1, 0)	(74, 7, 4, 3, 0)	(108, 31, 0)
(38, 6, 5, 1, 0)	(151, 3, 0)	(201, 79, 0)
(39, 4, 0)	(151, 9, 0)	(202, 55, 0)
(111, 10, 0)	(151, 15, 0)	(207, 43, 0)
(111, 49, 0)	(151, 31, 0)	(212, 105, 0)
(113, 9, 0)	(151, 39, 0)	(218, 11, 0)
(113, 15, 0)	(151, 43, 0)	(218, 15, 0)
(113, 30, 0)	(151, 46, 0)	(218, 71, 0)
(114, 11, 2, 1, 0)	(151, 51, 0)	(218.83, 0)
(115, 8, 7, 5, 0)	(151, 63, 0)	(225, 32, 0)
(116, 6, 5, 2, 0)	(151, 66, 0)	(225, 74, 0)
(117, 5, 2, 1, 0)	(151, 67, 0)	(225, 88, 0)
(118, 33, 0)	(151, 70, 0)	(225, 97, 0)
(119, 8, 0)	(152, 6, 3, 2, 0)	(225, 109, 0)
(119, 45, 0)	(153, 1, 0)	(282, 43, 0)
(120, 9, 6, 2, 0)	(153, 8, 0)	(286, 69, 0)
(121, 18, 0)	(154, 9, 5, 1, 0)	(286, 73, 0)
(122, 6, 2, 1, 0)	(155, 7, 5, 4, 0)	(294, 61, 0)
(123, 2, 0)	(156, 9, 5, 3, 0)	(322, 67, 0)
(124, 37, 0)	(157, 6, 5, 2, 0)	(333, 2, 0)
(125, 7, 6, 5, 0)	(158, 8, 6, 5, 0)	(350, 53, 0)
(126, 7, 4, 2, 0)	(159, 31, 0)	(366, 29, 0)
(127, 1, 0)	(159, 34, 0)	(378, 43, 0)
(127, 7, 0)	(159, 40, 0)	(378, 107, 0)
(127, 63, 0)	(160, 5, 3, 2, 0)	(390, 89, 0)
(128, 7, 2, 1, 0)	(161, 18, 0)	(462, 73, 0)
(129, 5, 0)	(161, 39, 0)	(521, 32, 0)
(130, 3, 0)	(161, 60, 0)	(521, 48, 0)
(131, 8, 3, 2, 0)	(162, 8, 7, 4, 0)	(521, 158, 0)
(132, 29, 0)	(163, 7, 6, 3, 0)	(521, 168, 0)
(133, 9, 8, 2, 0)	(164, 12, 6, 5, 0)	(607, 105, 0)
(134, 57, 0)	(165, 9, 8, 3, 0)	(607, 147, 0)
(135, 11, 0)	(166, 10, 3, 2, 0)	(607, 273, 0)
(135, 16, 0)	(167, 6, 0)	(1279, 216, 0)
(135, 22, 0)	(170, 23, 0)	(1279, 418, 0)
(136, 8, 3, 2, 0)	(172, 2, 0)	(2281, 715, 0)
(137, 21, 0)	(174, 13, 0)	(2281, 915, 0)
(138, 8, 7, 1, 0)	(175, 6, 0)	(2281, 1029, 0)
(139, 8, 5, 3, 0)	(175, 16, 0)	(3217, 67, 0)
(140, 29, 0)	(175, 18, 0)	(3217, 576, 0)
(141, 13, 6, 1, 0)	(175, 57, 0)	(4423, 271, 0)
(142, 21, 0)	(177, 8, 0)	
(143, 5, 3, 2, 0)	(177, 22, 0)	
(144, 7, 4, 2, 0)	(177, 88, 0)	
(145, 52, 0)	(178, 87, 0)	
(145, 69, 0)	(183, 56, 0)	
(146, 5, 3, 2, 0)	(194, 87, 0)	
(147, 11, 4, 2, 0)	(198, 65, 0)	
(148, 27, 0)	(201, 14, 0)	
(149, 10, 9, 7, 0)	(201, 17, 0)	
(150, 53, 0)	(201, 59, 0)	

## ДОДАТОК Є

Аналіз структурних характеристик перехідних процесів в електромережах під час запуску потужних електроприводів

Результати досліджень здійснені на основі реєстрації цифрограм у діючих електромережах з допомогою керувально-діагностичної системи "Альтра" при виконанні наукових договорів з Інститутом мікропроцесорних систем керування об'єктами електроенергетики в період 2012-2018 роки [1-5], де автор виконувала обов'язки відповідального виконавця.

Досліджуючи перехідні процеси струмів і напруг виявлено, що часто один тип нештатної ситуації розвивається і переходить в інший. Наприклад, на рис. 2 показано графіки струмів і напруг нештатної ситуації, яка почалась з двополярної дуги на відносному інтервалі часу  $[0,1; 0,3]$ . Потім на  $[0,3; 0,92]$  мс розвиток аварії в однополярну несиметричну дугу і на інтервалі  $[0,92...]$  перехід у двополярну симетричну дугу. Як видно з наведених графіків, кожен вид аварійних ситуацій має характерний тип перехідних процесів. Проте на сьогоднішній день не існує методів і засобів для автоматизованого визначення типу аварії і, тим більше, місця пошкодження чи пошкодженого обладнання.

Експериментальні цифрограми накиду в електричних мережах при успішному запуску потужних електроприводів показано на рис.Є.1, Є.2 [6].

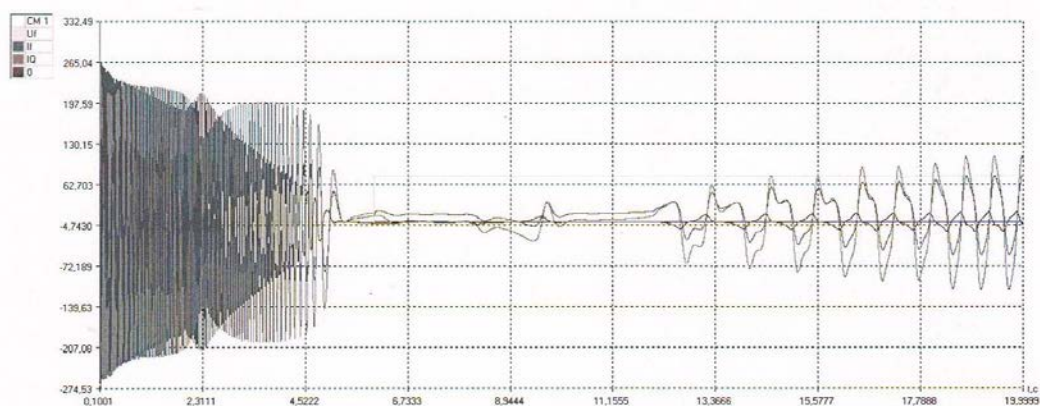


Рис.Є.1 – Графіки струмів і напруг нештатної ситуації

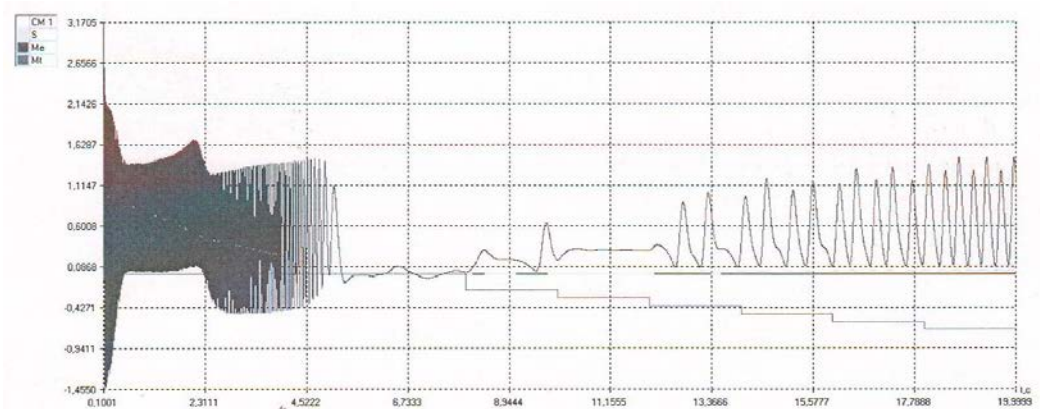


Рис.Є.2 – Цифрограми накиду в електромережах

На рис.Є.3 зображено експериментальні цифрограми накиду в електричних мережах при неуспішному запуску потужних електроприводів, які супроводжуються експоненціальними характеристиками змін струмів в електромережі у моменти запуску потужних електроприводів.

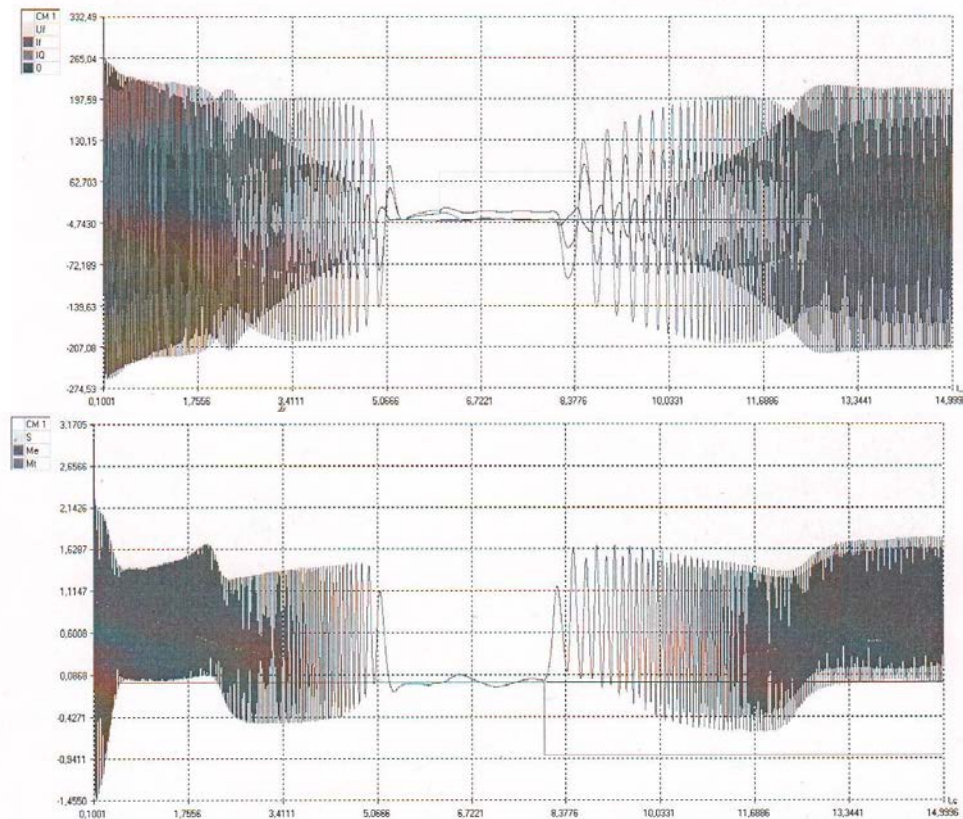


Рис.Є.3 – Цифрограми накиду в електричних мережах при неуспішному запуску потужних електроприводів

На рис.Є.4 показано перехідні процеси при запуску асинхронного двигуна.

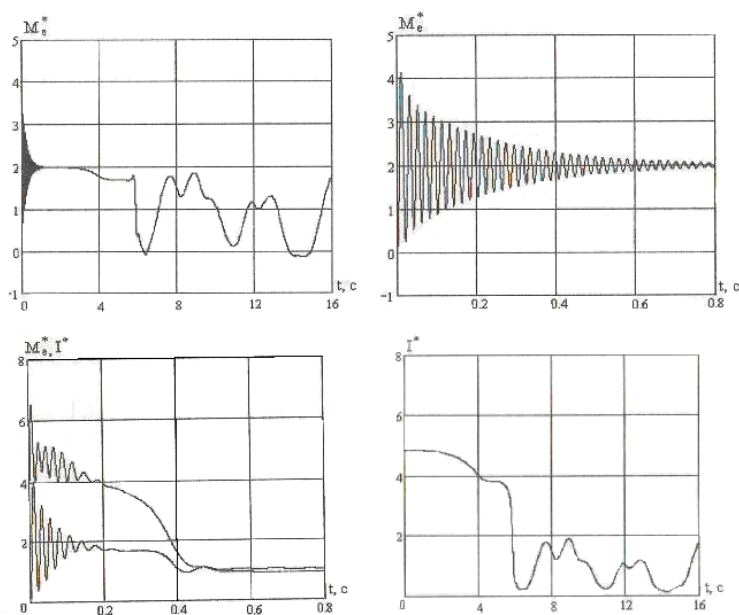


Рис.Є.4 - Перехідні процеси.

На рис.Є.5 показані перехідні характеристики пуску електроприводу з врахуванням змінних навантажень, що задаються нафтовидобувною установкою.

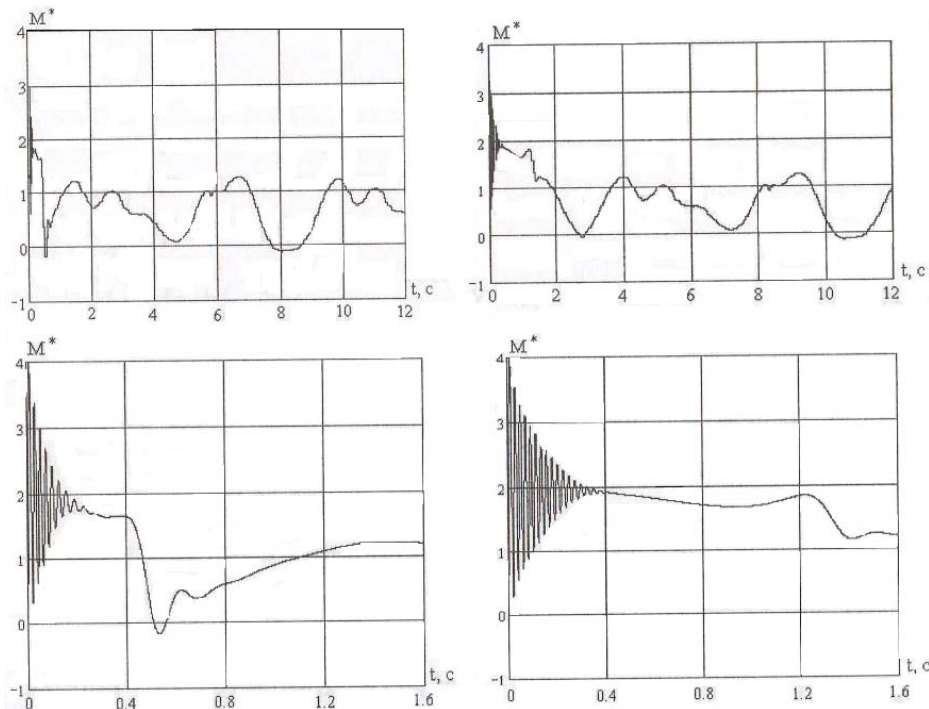


Рис.Є.5 - Залежності електромагнітного моменту під час пуску електроприводу з різним навантаженням промислової установки.

На рис.Є.6 показані часові залежності діючого значення струму в лінії під час пуску електроприводу [7].

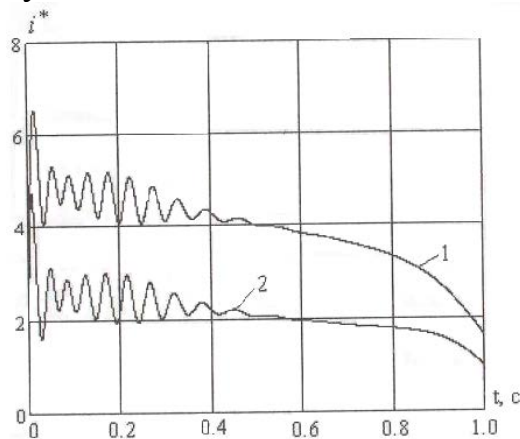


Рис.Є.6 - Часові залежності діючого значення струму в лінії під час пуску електроприводу за відсутності компенсації реактивної потужності (1) та з компенсацією (2) при  $\cos \varphi = 0,8$ .

На рис.Є.7 показані залежності лінійної напруги (а), струму фази та частоти обертання (б) ротора електроприводу з паралельно ввімкненими конденсаторами [7-9].



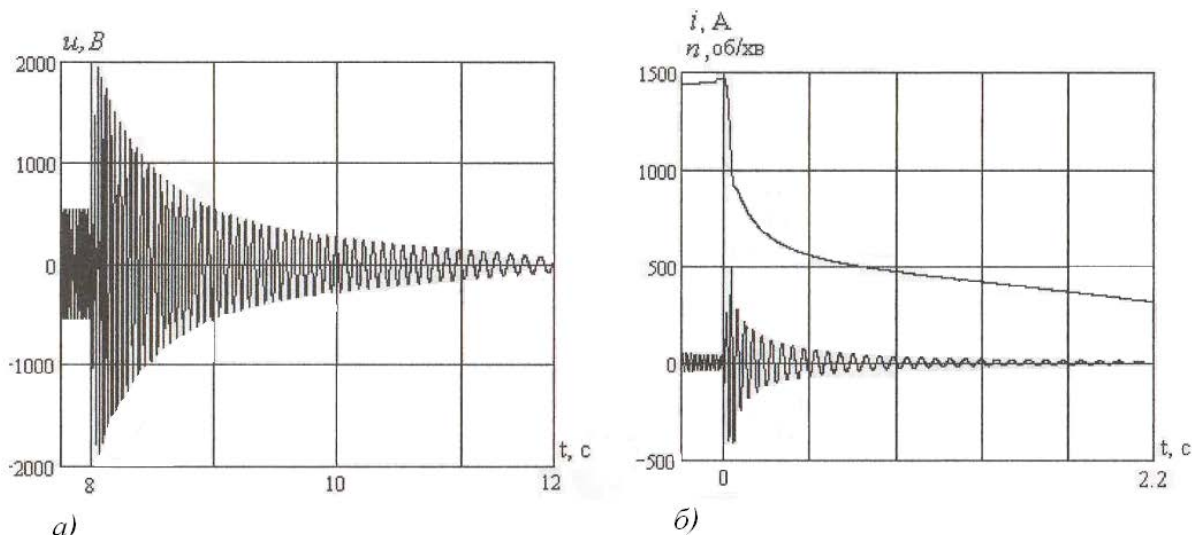


Рис.Є.7 - Залежності лінійної напруги (а), струму фази та частоти обертання (б).

На рис.Є.8 показана залежність струму фази електроприводу з паралельно увімкненими конденсаторами під час пуску та вимкнення (*при  $t = 8$  с*) напруги живлення [7, 9].

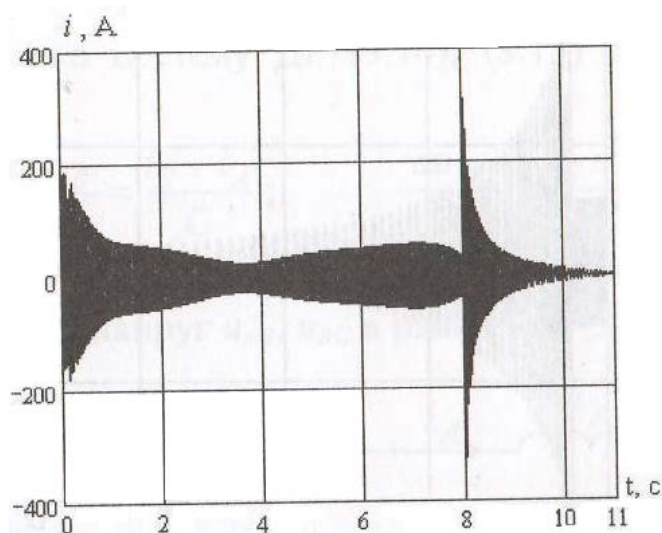


Рис.Є.8 - Залежність струму фази електроприводу з паралельно увімкненими конденсаторами під час пуску та вимкнення (*при  $t = 8$  с*) напруги живлення.

Особливості структури сигналів під час виникнення коротких замикань у високовольтних лініях електропередач.

Під час міжфазних замикань у високовольтних лініях електропередач виникають стрибки струмів, які не характеризуються значними спотвореннями гармонічних сигналів. Розпізнавання такого типу коротких замикань може бути принципово здійснене на інтервалі 1,5-2 періодів промислової частоти (рис.Є.11), при трифазному замиканні.

Міжфазне замикання в момент часу 0,175 с. Замикання між фазами А і В максимум фазної напруги пройшов. Замикання в кінці лінії (рис.Є.9).

Міжфазне замикання в момент часу 0,1455 с. Замикання між фазами А і В за максимуму фазної напруги. Замикання в кінці лінії (рис.Є.10).

Трифазне замикання в момент часу 0,1455 с. Замикання в кінці лінії (рис.Є.11).

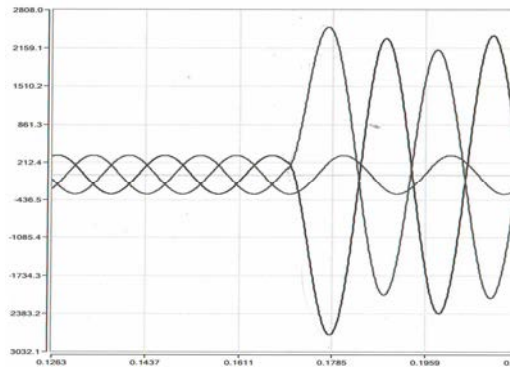


Рис.Є.9 – Міжфазне замикання в момент часу 0,175 с

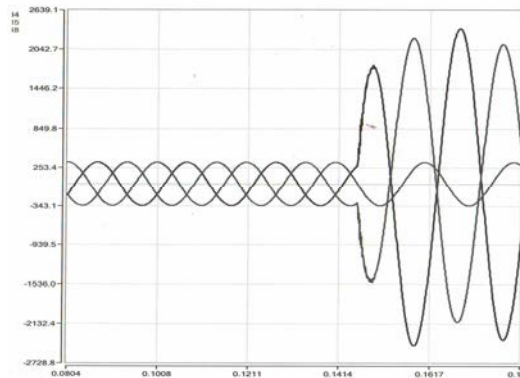


Рис.Є.10 – Міжфазне замикання в момент часу 0,1455 с

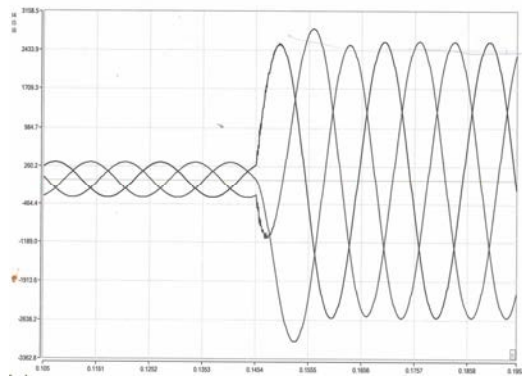


Рис.Є.11 – Трифазне замикання в момент часу 0,1455 с

Однофазне замикання на землю зображено на рисунках Є.12 та Є.13.



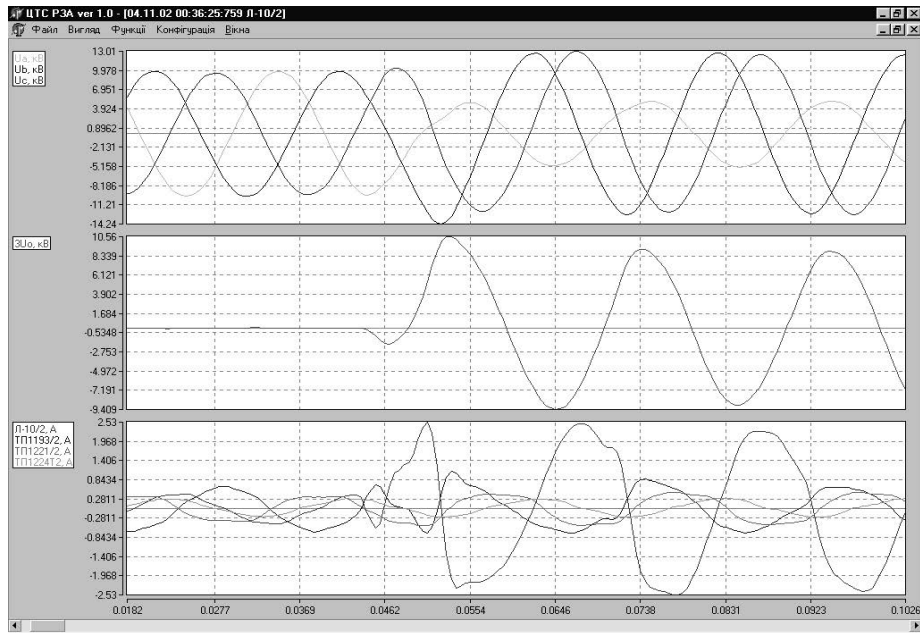


Рис.Є.12 - Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі і струмів при однофазному замиканні на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю.

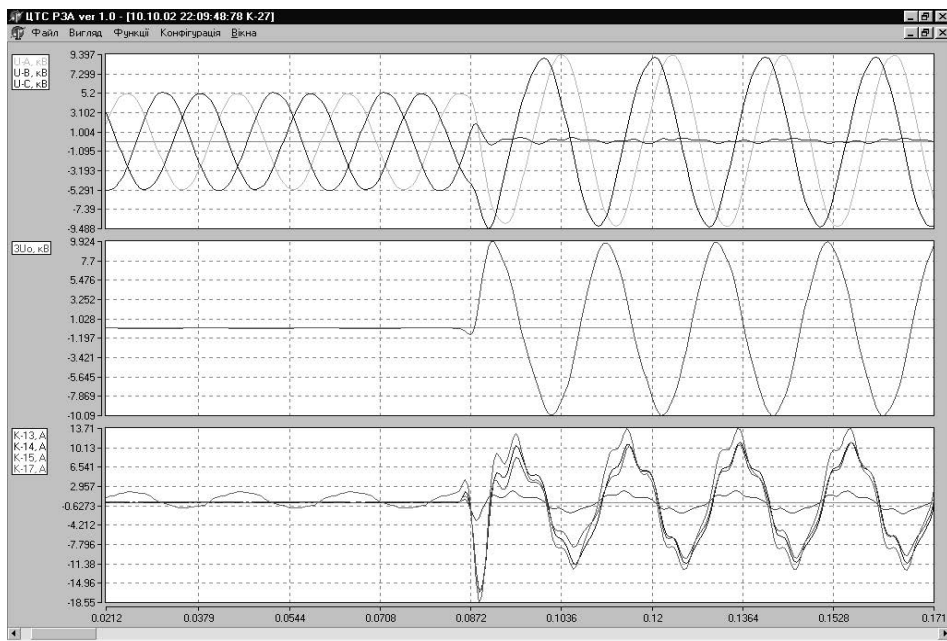


Рис.Є.13 - Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі і струмів при однофазному замиканні на землю в компенсованій нейтраллі.

Дослідження спотворень гармонічних сигналів при виникненні накидів.

Характерними ознаками накиду є:

1. Незмінність якісних характеристик гармонічного сигналу при  $t < t_0$  та  $t \geq t_0$ ;
2. Стрибок струму у будь-який момент фази струму від значення  $A_1(t < t_0)$  до значення  $A_2(t > t_0)$ . (Цей стрибок може на 1-2 порядки перевищувати початкове значення  $A$ ).
3. До накиду чи спаду навантаження амплітуди струмів є постійні, тобто  
- накид  $A_1 = const$ ;  $A_2 = const$ ;  $A_1 \ll A_2$ ;

- спад  $A_1 = const$ ;  $A_2 = const$ ;  $A_1 \gg A_2$ .

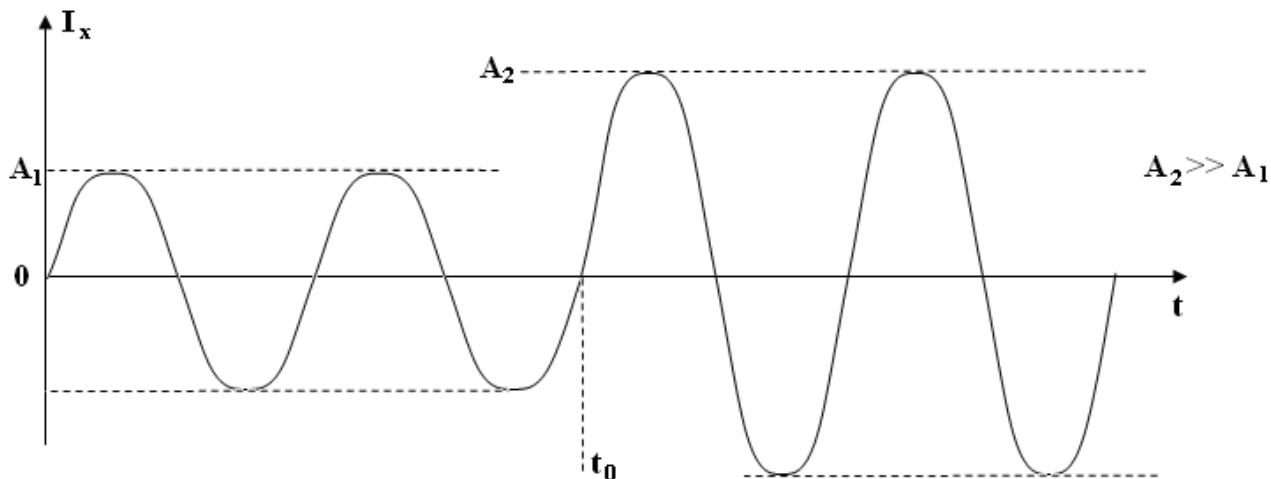


Рис.Є.14 - Модель накиду струму при включенні у момент  $t_0$  потужного споживача.

Аналогічний стрибок струму може спостерігатися при відключенні потужного споживача від електромережі (рис.Є.15).

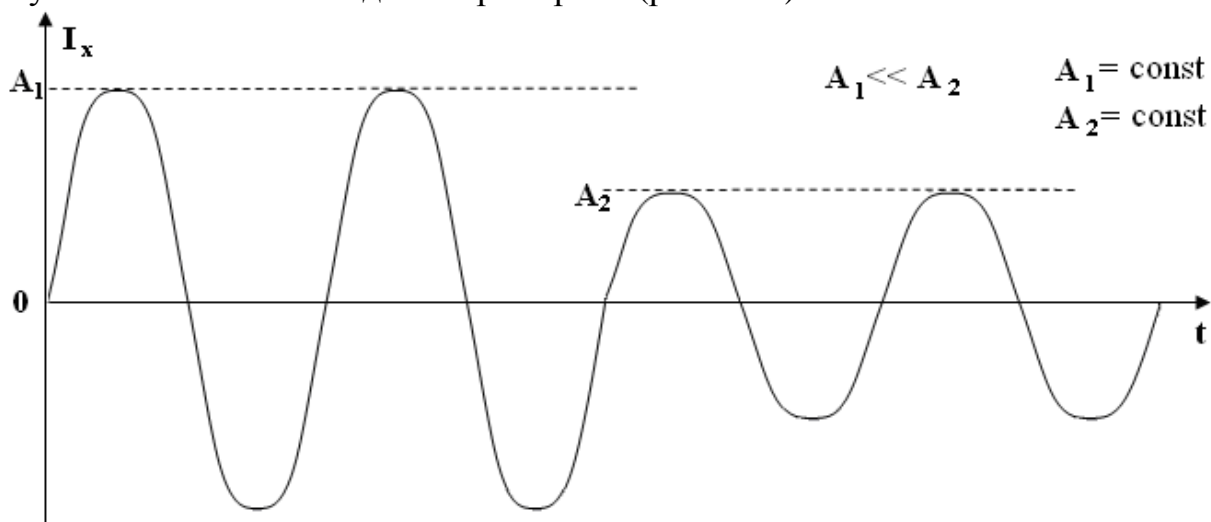


Рис.Є.15 - Модель квазістаціонарної зміни (зменшення) струму при відключенні потужного споживача.

Зміна амплітудних характеристик струму та напруги у високовольтних лініях електропередач типу накидів виникають при комутації режимів роботи енергосистем [10, 11]

При комутації режимів роботи енергосистем можуть виникати зростання струмів в кілька разів. Особливо це спостерігається при різкому підвищенні напруг в нейтралі.

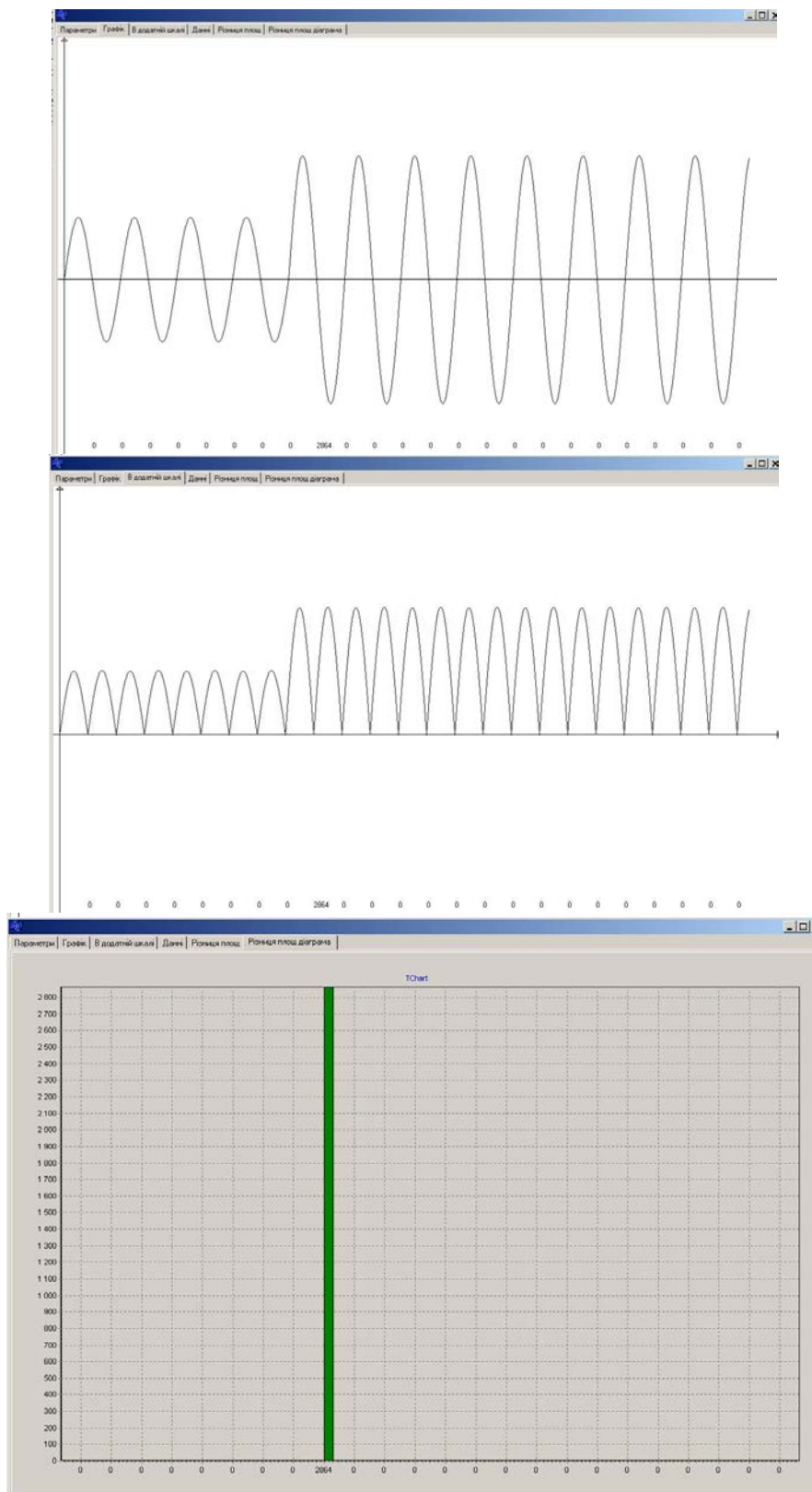
Список джерел, використаних у додатку Є.

1. Розробка алгоритмів функціонування захистів електропередач за коротких замикань на основі теорії кореляційних функцій: звіт про науково-дослідну

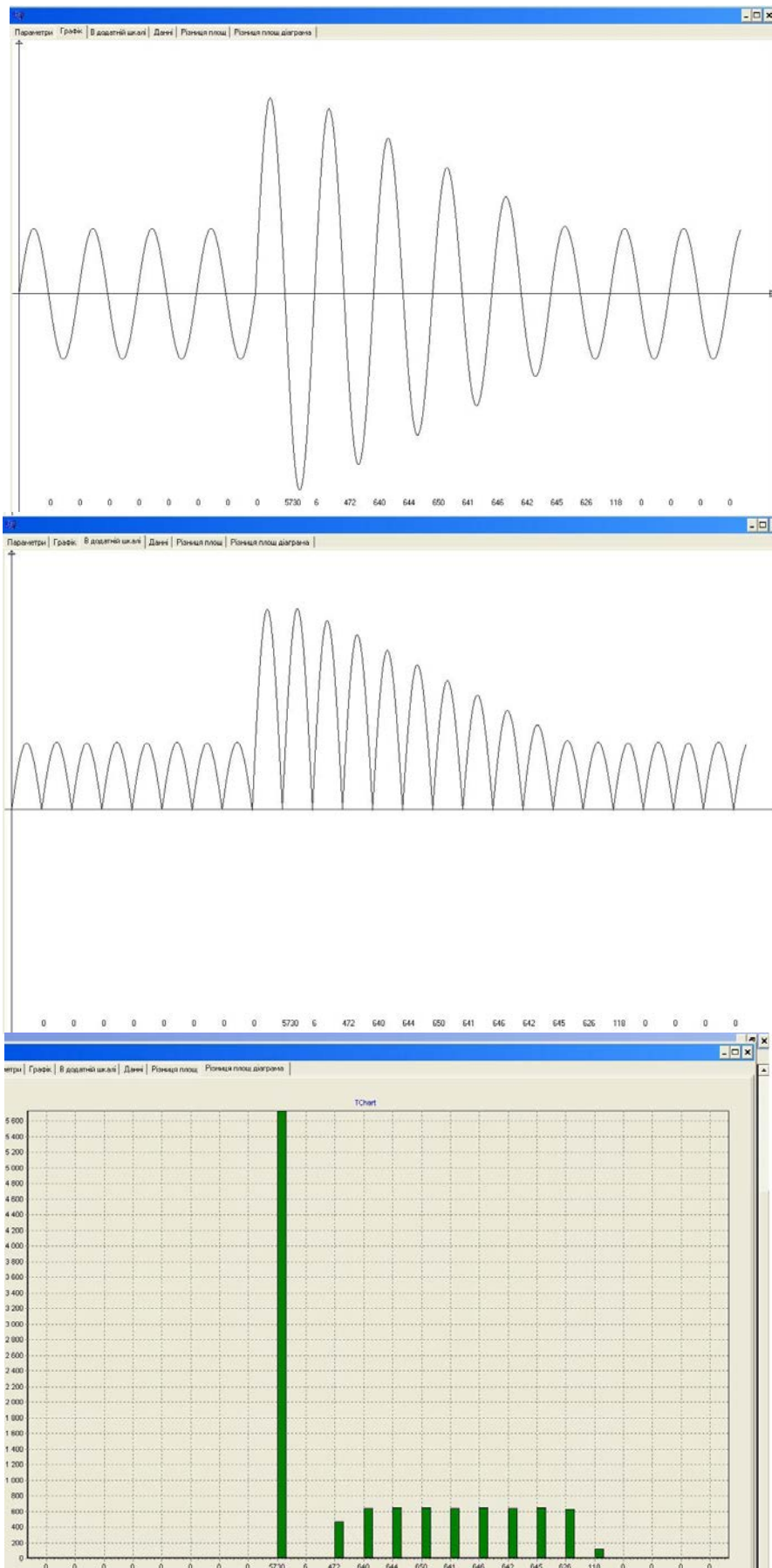
- роботу: державний реєстраційний номер 0112U007886. – Тернопіль, 2013. – 167 с.
2. Розробка математичного забезпечення захисту ліній електропередач номінальною напругою 6-35 кВ на основі теорії розпізнавання сигналів: звіт про науково-дослідну роботу: державний реєстраційний номер 0113U007679. – Тернопіль, 2014. – 71 с.
  3. Розробка теоретичних засад та алгоритмів ідентифікації запусків потужних електроприводів у високовольтних ЛЕП на основі теорії розпізнавання образів: звіт про науково-дослідну роботу: державний реєстраційний номер 0115U002340. – Тернопіль, 2015. – 64 с.
  4. Розробка структурної схеми та компонентів дослідного взірця пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань на землю у високовольтних ЛЕП: звіт про науково-дослідну роботу: державний реєстраційний номер 0116U006790. – Тернопіль, 2016. – 86 с.
  5. Авторський нагляд за розробкою схемних рішень та випробувань дослідних взірців пристрою релейного захисту в мережах 6-10 кВ: звіт про науково-дослідну роботу: державний реєстраційний номер 0117U000141. – Тернопіль, 2017. – 66 с.
  6. Люра О. П. Дослідження перехідних процесів у високовольтних лініях електропередач 6–10 Кв та розроблення мікроелектронного спецпроцесора релейного захисту, інваріантного до зміни амплітуд фазних струмів / О.П. Люра, Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2018. - №2(45). – С.57-83.
  7. Равлик О.М. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики / О.М. Равлик, Т.М. Гречин, В.Й. Іваноньків// Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка": Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 997. – № 340. – С. 96–101.
  8. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
  9. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов / В.И.Ключев – М.:Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
  10. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Навчальний посібник / В.П.Кідиба. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 504с.
  11. Гупал А.М. Оптимальные процедуры распознавания / А.М. Гупал, И.В. Сергиенко // Кибернетика и системный анализ. – 2003. - № 1. – С.21-29.

## ДОДАТОК Ж1

Результати програмного моделювання розпізнавання накиду та короткого замикання



Результати програмного моделювання розпізнавання накиду.



Результати програмного моделювання розпізнавання короткого замикання.

## ДОДАТОК Ж2

Код програми розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах.

### MainForm.cs

```
using System;
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using System.Data;
using System.Globalization;
using System.Linq;
using System.Windows.Forms;

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    public partial class MainForm : Form
    {
        public MainForm()
        {
            InitializeComponent();
            btnTestThree.Visible = false;
        }

        private void MainForm_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            btnOneTest_Click(null, null);
        }

        private void btnOneTest_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            nudFuncPartitionCount.Value = 16;
            nudFuncScaleRate.Value = 10;

            dgvFuncP.Rows.Clear();

            dgvFuncP.Rows.Add("sin(x)", "4");
            dgvFuncP.Rows.Add("2*sin(x)", "4");
        }

        private void btnTestTwo_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            nudFuncPartitionCount.Value = 16;
            nudFuncScaleRate.Value = 10;

            dgvFuncP.Rows.Clear();

            dgvFuncP.Rows.Add("sin(x)", "4");
            dgvFuncP.Rows.Add("sin(x)*exp(-0.1*x)", "4");
        }

        private void btnTestThree_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            nudFuncPartitionCount.Value = 16;
            nudFuncScaleRate.Value = 10;

            dgvFuncP.Rows.Clear();
        }
    }
}
```

```

        dgvFuncP.Rows.Add("sin(x)", "4");
        dgvFuncP.Rows.Add("2*sin(x)", "4");
        dgvFuncP.Rows.Add("2*sin(x)*exp(-0.5*x)", "4");
        dgvFuncP.Rows.Add("2*sin(x)", "2");
        dgvFuncP.Rows.Add("sin(x)", "4");
        dgvFuncP.Rows.Add("sin(x)*exp(-0.5*x)", "2");
        dgvFuncP.Rows.Add("2*sin(x)", "4");
        dgvFuncP.Rows.Add("sin(x)", "2");
    }

    private void btnCalc_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        try
        {
            var model = new ViewModel
            {
                FunctionPartitionsCount = (uint)
nudFuncPartitionCount.Value,
                FunctionScaleRate = (uint) nudFuncScaleRate.Value,
                FunctionsWithPeriods = GetFunctionsValues()
            };

            var manager = new AppManager(model);

            var result = manager.Calculate();
            ShowResult(result);

            var excelWorker = new ExcelWorker();
            excelWorker.Process(result);

        }
        catch (Exception exception)
        {
            MessageBox.Show(exception.Message);
        }
    }

    private List<KeyValuePair<string, uint>> GetFunctionsValues()
    {
        var functions = new List<KeyValuePair<string,
uint>>(dgvFuncP.Rows.Count - 1);

        foreach (DataGridViewRow row in dgvFuncP.Rows)
        {
            if (row.Cells["Func"].Value == null)
                continue;

            functions.Add(new KeyValuePair<string, uint>(
                row.Cells["Func"].Value.ToString(),
                Convert.ToInt32(row.Cells["PeriodCount"].Value)
            ));
        }

        return functions;
    }

    private void ShowResult(MainCalcResult result)
    {
        if (result.CalculatedFunctions != null)
        {
            var dt = new DataTable();

            for (var i = 0; i < result.CalculatedFunctions.Count; i++)
            {

```

```

                dt.Columns.Add(string.Format("F{0}:{1}", i+1,
result.CalculatedFunctions[i].Function), typeof(string));
            }

            var maxRow = result.CalculatedFunctions.Select(fp =>
fp.ModulusValues).Max(v => v.Count);

            for (var i = 0; i < maxRow; i++)
            {
                var row = dt.NewRow();

                var data = new ArrayList();

                foreach (var f in result.CalculatedFunctions)
                {
                    data.Add(f.ModulusValues.Count > i
?
f.ModulusValues[i].ToString(CultureInfo.InvariantCulture)
: string.Empty);
                }

                row.ItemArray = data.ToArray();
                dt.Rows.Add(row);
            }

            dgvFuncCalc.DataSource = dt;
        }

        if (result.Deltas != null)
        {
            dgvDeltaCalc.Rows.Clear();
            result.Deltas.ForEach(v => dgvDeltaCalc.Rows.Add(v, ""));
        }

        if (result.P != null)
        {
            dgvPCalc.Rows.Clear();
            result.P.ForEach(v => dgvPCalc.Rows.Add(v, ""));
        }
    }
}
}

```

## MainCalcInput.cs

```

using System.Collections.Generic;

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    internal class MainCalcInput
    {
        public uint FunctionPartitionsCount { get; set; }

        public uint FunctionScaleRate { get; set; }

        public List<KeyValuePair<string, uint>> FunctionsWithPeriods { get; set; }
    }
}

```

## MainCalcResult.cs

```

using System.Collections.Generic;

```



```

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    internal class MainCalcResult
    {
        /// <summary>
        /// Function => List (FunctionPartitionsCount * PeriodCount)
        /// </summary>
        public List<CalculatedFunctionResult> CalculatedFunctions { get; set; }

        public List<double> Deltas { get; set; }

        public List<double> P { get; set; }

        public int FunctionPartitionsCount { get; set; }
    }
}

```

## MainCalc.cs

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text.RegularExpressions;

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    internal class MainCalc
    {
        private MainCalcInput InputData { get; set; }

        private readonly List<CalculatedFunctionResult> _calculatedFunctions;
        private readonly List<double> _deltas;
        private readonly List<double> _p;

        public MainCalc(MainCalcInput inputData)
        {
            InputData = inputData;

            _calculatedFunctions = new List<CalculatedFunctionResult>();
            _deltas = new List<double>();
            _p = new List<double>();
        }

        public MainCalcResult Calculate()
        {
            CalculateFunctions();
            CalculateDiff();

            return new MainCalcResult
            {
                CalculatedFunctions = _calculatedFunctions,
                Deltas = _deltas,
                P = _p,
                FunctionPartitionsCount = (int)InputData.FunctionPartitionsCount
            };
        }

        private void CalculateFunctions()
        {
            _calculatedFunctions.Clear();

            foreach (var functionPair in InputData.FunctionsWithPeriods)

```

```

        {
            var data = CalculateValuesForFunction(functionPair.Key,
functionPair.Value);

            _calculatedFunctions.Add(data);
        }
    }

private void CalculateDiff()
{
    _deltas.Clear();
    _p.Clear();

    // make our data flat - we dont need to know exact function
    var flatData = _calculatedFunctions.SelectMany(f =>
f.ModulusValues).ToList();

    var partitionCount = (int)InputData.FunctionPartitionsCount;
    for (var currentIndex = 0; currentIndex < flatData.Count;
currentIndex++)
    {
        double diff = 0;

        if (currentIndex > partitionCount)
            diff = Math.Abs(flatData[currentIndex] -
flatData[currentIndex-partitionCount]);

        _deltas.Add(diff);

        var diffSq = Math.Round(Math.Pow(diff, 2), 10);
        if(currentIndex > 0)
            _p.Add(_p[currentIndex - 1] + diffSq);
        else
            _p.Add(diffSq);
    }
}

private CalculatedFunctionResult CalculateValuesForFunction(string
function, uint periods)
{
    var result = new CalculatedFunctionResult { Function = function };

    // calculate X for function
    var xPoints =
DividePiToPoints((int)InputData.FunctionPartitionsCount, (int)periods);

    var modulusValues = new List<double>(xPoints.Count);

    var mathEvaluator = new MathFunctionEvaluator(function);
    var invokeData = new List<double>(modulusValues.Count);

    // invoke function for each X => f(x)
    // make f(x) absolute
    xPoints.ForEach(rp =>
invokeData.Add(Math.Abs(mathEvaluator.Invoke(rp))));

    // scale f(x) to Scale rate
    var skaleKoff = InputData.FunctionScaleRate;

    modulusValues.AddRange(invokeData.Select(d => Math.Round(skaleKoff *
d, 10)));

    result.ModulusValues = modulusValues;
}

```

```

        // calc max function
        var regex = new
Regex(@"(?<sinus>(?!<koefficient>\d{0,5})(?!<operator>\*)sin\((.*)\)\)*?(?!<expon
ent>exp\((.*)\))?", RegexOptions.Compiled);
        var match = regex.Match(function);
        var isExp = match.Groups["exponent"].Success;

        var baseFunctionValues = new List<double>();

        if (isExp)
        {
            var baseFunction = string.Format("{0}{1}{2}",
match.Groups["koefficient"].Value, match.Groups["operator"].Value,
            match.Groups["exponent"].Value);
            //var baseFunction = match.Groups["exponent"];
            //var mathEvaluatorBf = new
MathFunctionEvaluator(baseFunction.Value);
            var mathEvaluatorBf = new MathFunctionEvaluator(baseFunction);
            invokeData.Clear();
            xPoints.ForEach(rp =>
invokeData.Add(mathEvaluatorBf.Invoke(rp)));

                baseFunctionValues.AddRange(invokeData.Select(d =>
Math.Round(skaleKoff * d, 10)));
            }
            else
            {
                var maxValue = modulusValues.Max();
                for(var i = 0; i < modulusValues.Count; i++)
                {
                    baseFunctionValues.Add(maxValue);
                }
            }

            result.BaseFunctionValues = baseFunctionValues;
            return result;
        }

        private static List<double> DividePiToPoints(int pointsCount, int
periodsCount)
        {
            var result = new List<double>(pointsCount * periodsCount);

            var resultForPi = new List<double>(pointsCount);

            var step = Math.PI / (pointsCount);

            for (var i = 0; i < pointsCount; i++)
            {
                resultForPi.Add(step * i);
            }

            for (var i = 0; i < periodsCount; i++)
            {
                result.AddRange(resultForPi.Select(t => t + Math.PI * i));
            }

            return result;
        }
    }
}

```

```

using System;
using System.Linq;

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    internal class AppManager
    {
        private readonly ViewModel _viewModel;

        private string _modelValidationError;

        public AppManager(ViewModel viewModel)
        {
            _viewModel = viewModel;
        }

        public MainCalcResult Calculate()
        {
            ThrowExceptionIfNotValidModel();

            var mainCalc = new MainCalc(new MainCalcInput
            {
                FunctionPartitionsCount = _viewModel.FunctionPartitionsCount,
                FunctionScaleRate = _viewModel.FunctionScaleRate,
                FunctionsWithPeriods = _viewModel.FunctionsWithPeriods
            });

            return mainCalc.Calculate();
        }

        private void ValidateModel()
        {
            _modelValidationError = string.Empty;

            if (_viewModel.FunctionPartitionsCount < 1)
            {
                _modelValidationError = "FunctionPartitionsCount > 0";
                return;
            }

            if (_viewModel.FunctionScaleRate < 1)
            {
                _modelValidationError = "FunctionScaleRate > 0";
                return;
            }

            if (_viewModel.FunctionsWithPeriods == null ||
!_viewModel.FunctionsWithPeriods.Any()
            {
                _modelValidationError = "Потрібно задати  $\phi$ -і";
                return;
            }

            if (_viewModel.FunctionsWithPeriods.Any(f => f.Value == 0 || f.Value
> 50))
            {
                _modelValidationError = "Період  $\phi$ -і повинен бути в діапазоні: 1-
50";
            }
        }

        public void ThrowExceptionIfNotValidModel()
        {

```

```

        ValidateModel();
        if (!string.IsNullOrEmpty(_modelValidationError))
            throw new Exception(_modelValidationError);
    }
}

```

## DoubleExtensions.cs

```

using System;
using System.Globalization;

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    public static class DoubleExtensions
    {
        public static string ToPiString(this double value)
        {
            if (value.Equals(0))
                return "0";

            var remainder = (int)(value % Math.PI);

            var koeficient = remainder == 0
                ? (int) (value/Math.PI)
                : (int) (2 * value/Math.PI);

            var koeficientStr = koeficient != 1
                ? koeficient.ToString(CultureInfo.InvariantCulture)
                : "";

            return remainder == 0
                ? string.Format("{0}\u03C0", koeficientStr)
                : string.Format("{0}\u03C0/2", koeficientStr);
        }
    }
}

```

## ExcelWorker.cs

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Globalization;
using System.Linq;
using Microsoft.Office.Interop.Excel;

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    internal class ExcelWorker
    {
        protected Application ExcelApp;

        public ExcelWorker()
        {
            ExcelApp = new Application();
        }

        public void Process(MainCalcResult excelData)
        {

```

```

        if(excelData.CalculatedFunctions == null || excelData.Deltas == null
|| excelData.P == null)
            return;

        if (ExcelApp == null)
        {
            throw new Exception("EXCEL could not be started. Check that your
office installation and project references are correct.");
        }

        var workBook =
ExcelApp.Workbooks.Add(XlWBATemplate.xlWBATWorksheet);
        var workSheet = (Worksheet)workBook.Worksheets[1];

        if (workSheet == null)
        {
            throw new Exception("Worksheet could not be created. Check that
your office installation and project references are correct.");
        }

        workSheet.Name = "Позрахунок";

        WriteHeader(workSheet);

        WriteDataToExcel(workSheet, 2, 1,
excelData.CalculatedFunctions.SelectMany(f => f.ModulusValues).ToList());

        WriteDataToExcel(workSheet, 2+excelData.FunctionPartitionsCount, 2,
excelData.Deltas.Skip(excelData.FunctionPartitionsCount));

        WriteDataToExcel(workSheet, 2 + excelData.FunctionPartitionsCount,
3, excelData.P.Skip(excelData.FunctionPartitionsCount));

        DrawMainChart(workSheet, excelData);

        DrawPChart(workSheet, excelData);

        ExcelApp.Visible = true;
    }

    private void WriteHeader(Worksheet workSheet)
    {
        var titleRange = workSheet.Range["A1", "C1"];
        var titleData = new object[] { "Ф-і", "Дельта", "P" };
        titleRange.Font.Bold = true;
        titleRange.Value2 = titleData;
    }

    private void WriteDataToExcel(Worksheet worksheet, int startRow, int
targetColumn, IEnumerable<double> data)
    {
        var currentRow = startRow;
        foreach (var d in data)
        {
            var cell = (Range)worksheet.Cells[currentRow, targetColumn];
            cell.Value2 = d;

            currentRow++;
        }
    }

    private void DrawMainChart(Worksheet worksheet, MainCalcResult
excelData)
    {

```

```

ChartObjects xlCharts = worksheet.ChartObjects(Type.Missing);

var myChart = xlCharts.Add(200, 50, 800, 250);
var currentChart = myChart.Chart;

var seriesCollection =
(SeriesCollection)currentChart.SeriesCollection();

var functionSerie = seriesCollection.NewSeries();
functionSerie.Name = "Φ-і";
functionSerie.Values = worksheet.Range["A2", string.Format("A{0}",
excelData.Deltas.Count + 1)];
functionSerie.ChartType = XlChartType.xlLine;
functionSerie.Border.LineStyle = XlLineStyle.xlDash;

var deltaSerie = seriesCollection.NewSeries();
deltaSerie.Name = "Дельта";
deltaSerie.Values = worksheet.Range["B2", string.Format("B{0}",
excelData.Deltas.Count + 1)];
deltaSerie.ChartType = XlChartType.xlLineMarkers;

var baseFunctionSerie = seriesCollection.NewSeries();
baseFunctionSerie.Name = "Базові Φ-і";
baseFunctionSerie.Values =
excelData.CalculatedFunctions.SelectMany(f => f.BaseFunctionValues).ToArray();
baseFunctionSerie.ChartType = XlChartType.xlLine;
baseFunctionSerie.Border.LineStyle = XlLineStyle.xlDashDotDot;

currentChart.Legend.Position =
XlLegendPosition.xlLegendPositionBottom;
currentChart.Legend.IncludeInLayout = false;

var xAxis = (Axis)currentChart.Axes(XlAxisType.xlCategory);
xAxis.HasTitle = true;
xAxis.AxisTitle.Left = 825;
xAxis.AxisTitle.Text = "Z2";
xAxis.TickLabelSpacing = excelData.FunctionPartitionsCount;
xAxis.TickMarkSpacing = excelData.FunctionPartitionsCount;
xAxis.AxisBetweenCategories = false;
xAxis.CategoryNames = GenerateCategoryLabels(excelData).ToArray();

var yAxis = (Axis)currentChart.Axes(XlAxisType.xlValue);
yAxis.HasTitle = true;
yAxis.AxisTitle.Top = 0;
yAxis.AxisTitle.Text = "Zi";
yAxis.MinimumScale = 0;
yAxis.MaximumScale =
Math.Max(excelData.CalculatedFunctions.SelectMany(f => f.ModulusValues).Max(),
excelData.CalculatedFunctions.SelectMany(f =>
f.BaseFunctionValues).Max());
yAxis.TickLabelPosition =
XlTickLabelPosition.xlTickLabelPositionNone;
yAxis.MajorGridlines.Delete();
}

private void DrawPChart(Worksheet worksheet, MainCalcResult excelData)
{
ChartObjects xlCharts = worksheet.ChartObjects(Type.Missing);

var myChart = xlCharts.Add(200, 350, 800, 250);
var currentChart = myChart.Chart;

var seriesCollection =
(SeriesCollection)currentChart.SeriesCollection();

```

```

        var pSerie = seriesCollection.NewSeries();
        pSerie.Name = "P";
        pSerie.Values = worksheet.Range["C2", string.Format("C{0}",
excelData.P.Count + 1)];

        currentChart.Legend.Position =
XlLegendPosition.xlLegendPositionBottom;
        currentChart.Legend.IncludeInLayout = false;
        currentChart.HasTitle = false;
        //currentChart.ChartTitle.Delete();

        currentChart.ChartType = XlChartType.xlLine;

        var xAxis = (Axis)currentChart.Axes(XlAxisType.xlCategory);
        xAxis.HasTitle = true;
        xAxis.AxisTitle.Left = 825;
        xAxis.AxisTitle.Text = "Z2";
        xAxis.TickLabelSpacing = excelData.FunctionPartitionsCount;
        xAxis.TickMarkSpacing = excelData.FunctionPartitionsCount;
        xAxis.AxisBetweenCategories = false;
        xAxis.CategoryNames = GenerateCategoryLabels(excelData).ToArray();

        var yAxis = (Axis)currentChart.Axes(XlAxisType.xlValue);
        yAxis.HasTitle = true;
        yAxis.AxisTitle.Top = 0;
        yAxis.AxisTitle.Text = "Zi";
        yAxis.MinimumScale = 0;
        yAxis.MaximumScale = excelData.P.Max();
        yAxis.TickLabelPosition =
XlTickLabelPosition.xlTickLabelPositionNone;
        yAxis.MajorGridlines.Delete();
    }

    private IEnumerable<string> GenerateCategoryLabels(MainCalcResult
excelData)
    {
        var resultDouble = new List<double>();

        var steps =
excelData.Deltas.Count/excelData.FunctionPartitionsCount;

        for (var i = 0; i < steps; i++)
        {
            resultDouble.Add(i * Math.PI/2);
        }

        // generate labels, count = excelData.Deltas.Count
        // we will show only Steps labels
        var result = new string[excelData.Deltas.Count];

        for (var i = 0; i < steps; i++)
        {
            result[i * excelData.FunctionPartitionsCount] =
resultDouble[i].ToPiString();
        }

        return result;
    }
}
}

```

**MathEvaluator.cs**



```

using System;
using System.CodeDom.Compiler;
using System.IO;
using System.Reflection;
using Microsoft.CSharp;

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    public class MathFunctionEvaluator
    {
        private readonly Delegate _parsedFunction;

        public double Invoke(double x)
        {
            if (_parsedFunction == null)
                throw new NullReferenceException("No function to invoke");
            return (double)_parsedFunction.DynamicInvoke(x);
        }

        private const string Begin =
            @"using System;
            namespace MyNamespace
            {
                public static class LambdaCreator
                {
                    public static Func<double,double> Create()
                    {
                        return (x)=>";

        private const string End = @"";
        }
    }

    public MathFunctionEvaluator(string input)
    {
        var normalized = PrepareInput(input);
        var provider = new CSharpCodeProvider();
        var parameters = new CompilerParameters { GenerateInMemory = true };
        parameters.ReferencedAssemblies.Add("System.dll");

        var results = provider.CompileAssemblyFromSource(parameters, Begin +
normalized + End);
        try
        {
            var cls =
results.CompiledAssembly.GetType("MyNamespace.LambdaCreator");
            var method = cls.GetMethod("Create", BindingFlags.Static |
BindingFlags.Public);
            _parsedFunction = (method.Invoke(null, null) as Delegate);
        }
        catch (FileNotFoundException)
        {
            throw new ArgumentException();
        }
    }

    private string PrepareInput(string input)
    {
        return
input.ReplaceMath().ReplacePow().ReplaceMultipling().ReplaceToDoubles();
    }
}
}

```

## StringExtensions.cs

```
using System.Text.RegularExpressions;

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    public static class StringExtensions
    {
        public static string ReplaceMultiplying(this string input)
        {
            return Regex.Replace(input, @"(\d+)(x)", @"$1*$2");
        }

        public static string ReplacePow(this string input)
        {
            var result = input.ReplacePow(@"(\d*x)\^( \d+\.?\d*)");
            return result.ReplacePow(@"\((([^\^]+)\)\)^( \d+\.?\d*)");
        }

        private static string ReplacePow(this string input, string toReplace)
        {
            return Regex.Replace(input, toReplace, "Math.Pow($1,$2)");
        }

        public static string ReplaceToDoubles(this string input)
        {
            return Regex.Replace(input, @"(\d+)(?:[^\.] \d+)", "$1.0");
        }

        public static string ReplaceMath(this string input)
        {
            return
                input.ReplaceMath("sin", @"Math.Sin")
                    .ReplaceMath("cos", @"Math.Cos")
                    .ReplaceMath("ctg", @"1.0/Math.Tan")
                    .ReplaceMath("tg", @"Math.Tan")
                    .ReplaceMath("exp", @"Math.Exp");
        }

        private static string ReplaceMath(this string input, string name, string
dotNetName)
        {
            return Regex.Replace(input, name, dotNetName,
RegexOptions.IgnoreCase);
        }
    }
}
```

## ViewModel.cs

```
using System.Collections.Generic;

namespace ElectricalShortCircuitCalcApp
{
    internal class ViewModel
    {
        public uint FunctionPartitionsCount { get; set; }

        public uint FunctionScaleRate { get; set; }

        public List<KeyValuePair<string, uint>> FunctionsWithPeriods { get; set; }
    }
}
```

```
}  
}
```

### **CalculatedFunctionResult.cs**

```
using System.Collections.Generic;  
  
namespace ElectricalShortCircuitCalcApp  
{  
    internal class CalculatedFunctionResult  
    {  
        public string Function { get; set; }  
        public List<double> ModulusValues { get; set; }  
        public List<double> BaseFunctionValues { get; set; }  
    }  
}
```

## ДОДАТОК 31

Аналіз характеристик пристроїв релейного захисту високовольтних ліній електропередач

Одним з найпоширеніших пристроїв захисту високовольтного електротехнічного обладнання є реле струму (РС) [1], гістерезисна характеристика якого показана на рис.31.1.

Гістерезисну характеристику РС визначають коефіцієнтом повернення:

$$k_p = \frac{U_p}{U_c},$$

де  $U_p = U_{ex}$ , яке є меншим від величини вхідного струму, за якого РС спрацьовує -  $\dot{O}_p < \dot{O}_c$ ;

$U_p = U_{ex}$  - уставка значення струму, при якому спрацьовує РС.

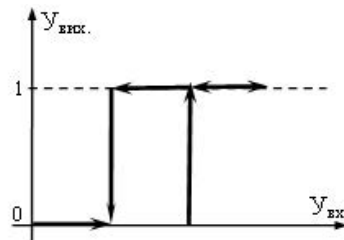
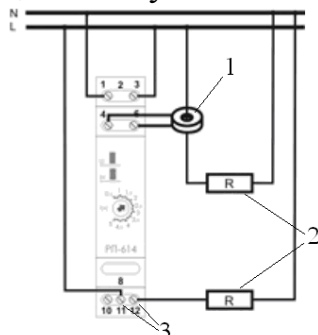


Рис.31.1 - Гістерезисна характеристика реле струму.

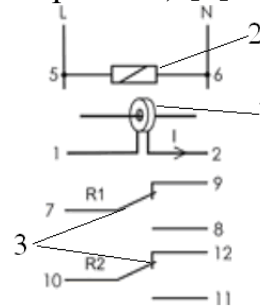
На практиці існують і розрізняють реле максимальної дії  $k_p < 1$  та реле мінімальної дії  $k_p > 1$  [1].

Відомі пристрої релейного захисту високовольтних ліній електропередач у вигляді реле струму, які містить трансформатор струму, вихід якого підключений до порогового елемента типу електромагнітного реле, виходом якого є керуючі контакти силового вимикача.

На рис.31.2 показані приклади структурних схем реле струму типу PR614 та EPP620, які випускаються групою F&F ПП "Електросвіт" [3].



Реле струму PR614

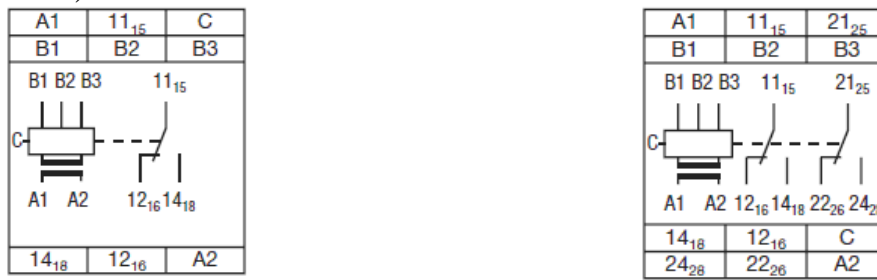


Реле струму EPP620

Рис.31.2 – Структурні схеми реле струму

Схема підключення реле струму PR614: 1 – трансформатор струму, 2 – електромагнітне реле, 3 - контакти силового вимикача

Аналогічні структурні рішення релейного захисту реалізовані фірмою АВВ [4] (рис.31.3)



Реле струму AC/DC CM-SRS.1

Реле струму AC/DC CM-SRS.2

Рис.31.3 - Структурні схеми реле струму фірми АВВ.

Недоліком таких пристроїв є: необхідність багаторазового налаштування порогового рівня спрацювання реле струму при зміні конфігурації та режимів роботи обладнання ЛЕП, а також обмежені функціональні можливості, обумовлені тим, що пристрій не дозволяє автоматично розпізнавати накиди та короткі замикання в ЛЕП, коли вхідна амплітуда зростання струму у фазі при коротких замиканнях (наприклад, у віддаленому участку ЛЕП) менша вхідної амплітуди зростання струму при включенні потужного споживача (наприклад, електроприводу чи відключенні паралельної лінії постачання електроенергії потужному електроспоживачеві).

Всі цифрові пристрої релейного захисту, незалежно від призначення, мають схожу структуру, яка наведена на рис.31.4 [1, 2]. Процесор являється основним елементом цифрового захисту, в якому реалізований алгоритм роботи конкретного захисту. Іноді застосовується один або декілька процесорів в залежності від призначення пристрою та фірми виробника. Відома фірма АВВ надає перевагу багатопроцесорним системам типу RLV, RHV, SACSE, в яких кожен процесор виконує конкретні завдання алгоритму і ці процесори працюють паралельно [5].

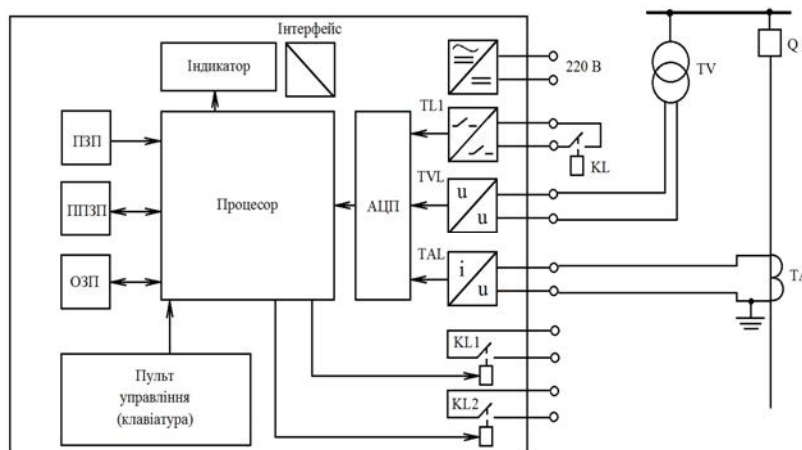


Рис.31.4 - Структурна схема цифрового пристрою релейного захисту:

ТА – трансформатор струму; TV – трансформатор напруги; Q – вимикач; KL – вихідне реле іншого пристрою; TL1 – перетворювач бінарних сигналів; TVL, TAL – вхідні перетворювачі аналогових сигналів, напруг та струмів; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; ПЗП – постійний запам’ятовувальний пристрій; ОЗП – оперативний запам’ятовувальний пристрій; ППЗП – перепрограмований запам’ятовувальний пристрій; KL1, KL2 – вихідні реле.

Вхідною інформацією є аналогові сигнали – струми, напруги, температура тощо та бінарні – положення комутаційних апаратів, стан вихідних реле інших пристроїв релейного захисту та автоматики.

Вихідними сигналами цифрових захистів є традиційно бінарні сигнали. Ці сигнали надходять після спрацювання цифрового захисту в колах керування та в колах сигналізації електроенергетичної системи.

Мікроконтролерні засоби релейного захисту мають наступні основні переваги [1, 2, 5, 6]:

- реалізація програмним шляхом характеристик спрацювання будь-якої складності та можливість оперативного алгоритму опрацювання сигналів;
- універсальність застосування при вирішенні різних задач захисту від перевантажень та коротких замикань у технологічному обладнанні ЛЕП.

Досвід експлуатації такого класу пристроїв релейного захисту дозволив встановити також ряд негативних особливостей та функціональних обмежень:

- зниження надійності та довговічності, обумовлене характеристиками безвідмовності базових компонентів мікроконтролерних реалізацій: АЦП, мікропроцесора, інтерфейсів вводу/виводу та живлення;
- значна концентрація в одному пристрої багатьох важливих функцій моніторингу стану промислового обладнання ЛЕП, наприклад потужних трансформаторів.

#### Список джерел, використаних у додатку З1

1. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Навчальний посібник / В.П.Кідиба. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 504с.
2. Люра О. П. Дослідження перехідних процесів у високовольтних лініях електропередач 6–10 Кв та розроблення мікроелектронного спецпроцесора релейного захисту, інваріантного до зміни амплітуд фазних струмів / О.П. Люра, Н.Я. Возна, Я.М. Николаичук // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2018. - №2(45). – С.57-83.
3. [www.es.ua](http://www.es.ua) – офіційний сайт групи F&F ПП "Електросвіт" / Компоненти автоматики і телемеханіки, 2014. – с.23 (реле струму PR614), с.24 (реле струму EPP620).
4. <https://myvolt.ua/rele-kontrolya-toka-abb-cm-srs12>.
5. Метод розпізнавання та ідентифікації накидів та замикань на землю у високовольтних лініях електропередач / Н.Я.Возна, О.П.Люра, І.О.Сабадаш, І.І.Островка // Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. - 2018. - №28(1). - С.79-84.
6. Люра О.П. Пристрої релейного захисту та компоненти спецпроцесора визначення квадратично-імпульсної функції / О.П.Люра, Н.Я.Возна // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства". - Надвірна, 2018. – С.130-134.

## ДОДАТОК 32

### Розрахунок системних характеристик компонентів пристрою РНКЗ

В таблиці 32.1 приведені оцінки системних характеристик структурної, апаратної та часової складності електронних компонентів пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань.

Таблиця 32.1 - Системні характеристики електронних компонентів пристрою релейного захисту

Тип компонента	Системні характеристики складності		
	Апаратна, $\nu$ вентилів	Структурна, одиниць	Часова складність, $\nu$ мікротактів
Двохпівперіодний випрямляч	5	87,4	0,01
Аналого-цифровий перетворювач	47	310,8	7
Регістр зсуву	960	1924	16
Логічний елемент "Виключаюче АБО"	2	68	1
Інтегруючий квадратор	177	249,2	35

Системні характеристики компонентів пристрою релейного захисту розраховуються згідно виразів:

1). Двохпівперіодний випрямляч:

$A = 4A_D + A_R$ , де  $A_D$  - апаратна складність напівпровідникового діода,  $A_R$  - апаратна складність резистора. Тобто  $A = 4 + 1 = 5$ ;

$$k_c = 4k_{cD} + k_{cR} + k_{cz} = 4 \cdot 14,6 + 15 + 14 = 87,4;$$

$$\tau = 0,01\nu.$$

2). Аналого-цифровий перетворювач:

$A = A_G + A_L + A_{ЦАП} + A_K + A_{ЛЕ}$ , де  $A_{\bar{A}} = 2$  апаратна складність генератора,  $A_L = 8A_T = 16$  - апаратна складність лічильника,  $A_T = 2$ ;  $A_{ЦАП} = 24$  - апаратна складність ЦАП;  $A_K = 4$  - апаратна складність компаратора;  $A_{ЛЕ} = 1$  - апаратна складність логічного елемента "І".

$$A = 2 + 16 + 24 + 4 + 1 = 47;$$

$$k_c = k_{cG} + k_{cL} + k_{cЦАП} + k_{cK} + k_{cЛЕ} = 40 + 60 + 186 + 13,6 + 11,2 = 310,8;$$

$$\tau = \tau_{\bar{A}} + \tau_{\bar{E}} + \tau_{\bar{O}\bar{A}\bar{I}} + \tau_K + \tau_{\bar{E}\bar{A}} = 1 + 2 + 1 + 2 + 1 = 7\nu.$$

3). Багаторозрядний регістр зсуву:

$$A = 60k \cdot A_T = 60 \cdot 8 \cdot 2 = 960\nu;$$

$$k_c = 60 \cdot k_{cT} + k_{cz} = 60 \cdot 30 + 124 = 1924\nu;$$

$$\tau = 8 \cdot 2 = 16\nu.$$

4). Логічний елемент "Виключаюче АБО":

$$A = 2\nu;$$

$$k_c = k_{c/IIII} + k_{c/IIII} + k_{cz} = 68;$$

$$\tau = 1\nu.$$

5). Інтегруючий квадратор:

$A = A_{JI} + A_{\Sigma} + A_R + A_{JE}$ , де  $A_{JI} = k \cdot A_T = 8 \cdot 2 = 16$  - апаратна складність лічильника на Т-тригерах,  $A_{\Sigma} = 2k \cdot A_{\Sigma} = 2 \cdot 8 \cdot 8 = 128\nu$  - апаратна складність суматора,  $A_R = 2k \cdot A_T = 2 \cdot 8 \cdot 2 = 32\nu$  - апаратна складність регістра пам'яті на D-тригерах,  $A_{JE} = 1\nu$  - логічний елемент "І".

$$A = 16 + 128 + 32 + 1 = 177\nu;$$

$$k_c = k_{cJI} + k_{c\Sigma} + k_{cR} + k_{cJE} = 60 + 163 + 15 + 11,2 = 249,2;$$

$$\tau = \tau_{\dot{E}} + \tau_{\Sigma} + \tau_R + \tau_{\dot{E}\dot{A}} = 16 + 16 + 2 + 1 = 35\nu.$$



## ДОДАТОК 33

Схеми стенду для лабораторних випробувань дослідного взірця ПРЗ.6-10.

Виконання лабораторних випробувань дослідного взірця ПРЗ.6-10 виконується відповідно до двох етапів:

1. Лабораторні випробування базових компонентів ПРЗ.6-10:

- трансформатор струму (перевіряється відповідність вхідних та вихідних сигналів);
- двохпівперіодний випрямляч (перевіряється осцилограма формування двохпівперіодного випрямлення синусоїдального сигналу),
- аналого-цифровий перетворювач (встановлюється відповідність формування унітарних кодів до амплітуди вхідних сигналів),
- багаторозрядний регістр зсуву (БРЗ) (встановлюється відповідність затримки заданого числа унітарних кодів у БРЗ на основі D-тригерів),
- логічний елемент "Виключаюче АБО" (встановлюється правильність виконання логічної операції XOR на виході логічного елемента),
- інтегруючий квадратор (встановлюється правильність накопичення суми кодів квадратів на виході компонента),
- елемент порівняння з пороговою уставкою (перевіряється правильність виконання порогової операції по модулю та формування сигналу його перевищення).

2. Лабораторні випробування дослідного взірця ПРЗ.6-10 (виконується шляхом формування вихідного ідентифікаційного сигналу накиду або замикання на землю, що формується лабораторним стендом імітаційного моделювання.

Випробування компонентів та дослідного взірця ПРЗ.6-10 виконуються за допомогою комплекту вимірювальних приладів:


- цифровий вольтметр: 4.5-30В LED, діапазон вимірювання 0 – 99,9 В;
- цифровий амперметр: АМ1, діапазон вимірювання 0,05-5,5 А;
- осцилограф С1-99;
- ПК для опрацювання результатів експериментів;
- лабораторний стенд імітаційного моделювання накидів та коротких замикань.

Лабораторні випробування базових компонентів ПРЗ.6-10 трансформатора струму, двохпівперіодного випрямляча виконується за допомогою цифрового вольтметра, амперметра та осцилографа.

Випробування БРЗ, логічного елемента "Виключаюче АБО" та інтегруючого квадратора виконується за допомогою ПК.

За результатами проведених лабораторних випробувань базових компонентів та дослідного взірця ПРЗ.6-10 складаються та затверджуються відповідні акти згідно ДСТУ 3974-2000.

### 33.1. Випробування двохпівперіодного випрямляча

На рис.33.1: латр – трансформатор змінної напруги, V – цифровий вольтметр,  - кристал двохпівперіодного випрямляча, O - осцилограф, R<sub>н</sub> – регульований резистор навантаження.

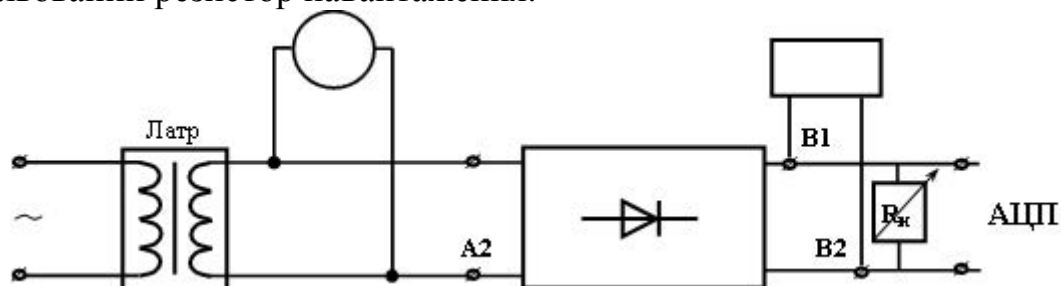



Рис.33.1. Структурна схема стенду випробування двохпівперіодного випрямляча.

Випробування виконуються наступним чином: до виходів A1, A2 регульованого трансформатора зажимами під'єднується цифровий вольтметр V та входи кристалу двохпівперіодного випрямляча, виходи B1, B2 якого з'єднуються з входами осцилографа та регульованим резистором навантаження., значення якого відповідає вхідному опоріві кристала АЦП та використовується для задання уставки порогового спрацювання пристрою. Шляхом регулювання вихідної напруги у діапазоні 0,5 В реєструється пропорційна зміна випрямленої напруги на екрані осцилографа. При невідповідності вихідних параметрів двоівперіодного випрямляча зміні вхідної напруги, виконується відбраковка випробовуваного кристалу.

### 33.2. Випробування АЦП.

На рис.3.2: регульований трансформатор струму, V – цифровий вольтметр,  - двохпівперіодний випрямляч, O – осцилограф, АЦП – кристал АЦП, ПК – персональний комп'ютер.

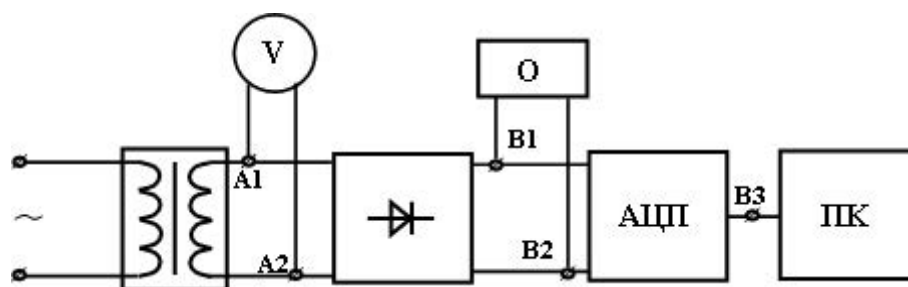


Рис.33.2. Структурна схема стенду випробування АЦП.

Випробування виконуються наступним чином: зміною напруги на виході латера 1, яка відображається цифровим вольтметром V, який з'єднаний з входами двохпівперіодного випрямляча A1, A2, виходи якого B1, B2 з'єднані з входами АЦП та осцилографом, на якому демонструється випрямлений струм. Вихід АЦП B3 з'єднаний з інформаційним входом ПК, на дисплеї якого

відображаються цифрові коди, що відповідають значенням цифрового вольтметра V.

### 33.3. Випробовування багатоканального регістра зсуву.

На рис.33.3: ПК – персональний комп'ютер, БРЗ – багатоканальний регістр зсуву, логічний елемент "Виключаюче АБО".

БРЗ та логічний елемент "Виключаюче АБО" реалізовані на кристалі ПЛІС фірми Analog Devices.

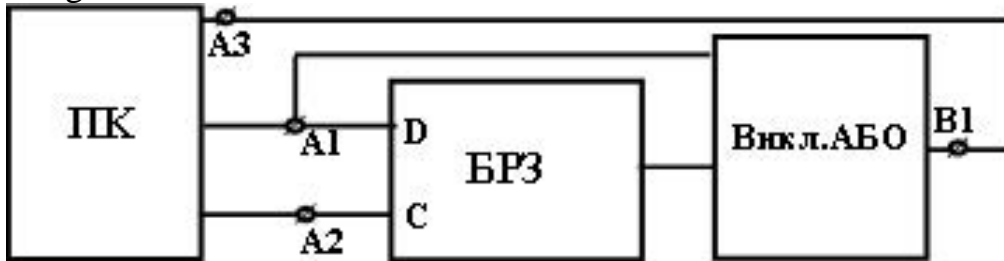


Рис.33.3. Структурна схема стенду випробування багатоканального регістра зсуву.

Випробовування виконуються під дією прикладної програми формування  $2^k$ -розрядних унітарних кодів та імпульсів синхронізації, які через з'єднання A1 поступають на інформаційний D-вхід БРЗ, через з'єднання A2 на вхід синхронізації БРЗ (C) поступають сигнали зсуву. З виходу B1 знімаються імпульсні потоки модульної різниці ( $\Delta_i = |x_i - x_{i-j}|$ ), які поступають на вхід A3 ПК.

### 33.4. Випробовування інтегруючого квадратора.

На рис.3.4: ПК – персональний комп'ютер, ІК – інтегруючий квадратор.

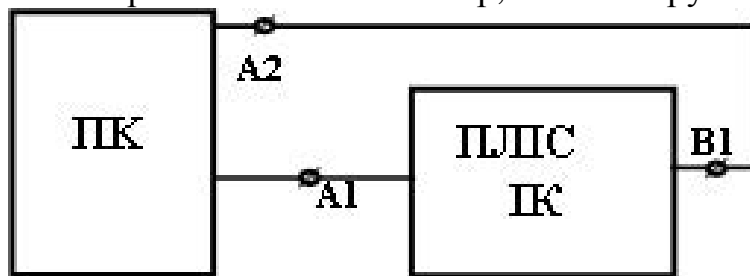


Рис.33.4. Структурна схема стенду випробування інтегруючого квадратора.

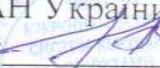
Випробовування виконуються наступним чином: згідно прикладної програми на з'єднанні A1 входу кристалу ПЛІС, у якому синтезована структура інтегруючого квадратора, формується потік імпульсів унітарного коду  $[\Delta_i]$ , з виходу B1 якого на вході A2 ПК формується сигнал порогового спрацювання інтегруючого квадратора.

## ДОДАТОК Й

Копії програми та результатів лабораторних випробувань дослідних взірців пристрою релейного захисту ПРЗ.6-10


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

ПОГОДЖЕНО

Директор інституту  
мікропроцесорних систем керування  
об'єктами електроенергетики  
КД ЦІЗІТ НАН України,  
к.т.н., доцент  І.О. Сабадаш  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи ТНЕУ,  
д.е.н., професор

 З.-М.В. Задорожний  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 р.



## ПРОГРАМА

лабораторних випробувань дослідних взірців пристрою релейного  
захисту в мережах 6-10 кВ

В.о. директора науково-дослідного  
інституту іноваційного розвитку  
та державотворення



В.І.Письменний

Декан факультету  
комп'ютерних інформаційних технологій,  
д. т. н., професор



М.П.Дивак

Керівник НДР, д. т. н., професор



Я.М.Николайчук

## **I. ПІДСТАВА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДОСЛІДНИХ ВЗІРЦІВ ПРИСТРОЮ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В МЕРЕЖАХ 6-10 КВ**

Лабораторні випробування виконуються згідно другого етапу (Авторський супровід лабораторних випробувань дослідних взірців ПРЗ.6-10.) на основі договору та технічного завдання, погодженого з ІМСКОЕ від 01.12.2016р. № СКС-70-2016 «Авторський нагляд за розробкою схемних рішень та випробувань дослідних взірців пристрою релейного захисту в мережах 6-10 кВ».

Програма та методика проведення лабораторних випробувань розроблена на основі ДСТУ 3974-2000 (Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. – Держстандарт України. – Київ, 2001.) та Стандарту національного космічного агентства України (СОУ НКАУ 0007:2007) (Порядок проведення експериментального відпрацювання. – НКАУ. – 2007, п.8.1-8.3)

## **II. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДОСЛІДНОГО ВЗІРЦЯ ПРЗ.6-10**

**Основною метою** науково-дослідної роботи є авторський нагляд за лабораторними випробуваннями схемних рішень дослідних взірців ПРЗ.6-10.

## **III. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБІТ**

Виконання лабораторних випробувань дослідного взірця ПРЗ.6-10 виконується відповідно до двох етапів:

1. Лабораторні випробування базових компонентів ПРЗ.6-10:

- трансформатор струму (перевіряється відповідність вхідних та вихідних сигналів);
- двохперіодний випрямляч (перевіряється осцилограма формування двохперіодного випрямлення синусоїдального сигналу),
- аналого-цифровий перетворювач (встановлюється відповідність формування унітарних кодів до амплітуди вхідних сигналів),
- багаторозрядний регістр зсуву (БРЗ) (встановлюється відповідність затримки заданого числа унітарних кодів у БРЗ на основі D-тригерів),
- логічний елемент "Виключаюче АБО" (встановлюється правильність виконання логічної операції XOR на виході логічного елемента),
- інтегруючий квадратор (встановлюється правильність накопичення суми кодів квадратів на виході компонента),
- елемент порівняння з пороговою уставкою (перевіряється правильність виконання порогової операції по модулю та формування сигналу його перевищення).

2. Лабораторні випробування дослідного взірця ПРЗ.6-10 (виконується шляхом формування вихідного ідентифікаційного сигналу накиду або замикання на землю, що формується лабораторним стендом імітаційного моделювання).

Випробування компонентів та дослідного взірця ПРЗ.6-10 виконуються за допомогою комплекту вимірювальних приладів:

- цифровий вольтметр: VM1, виробник RSM Electric, Туреччина, діапазон вимірювання 150-300 В;
- цифровий амперметр: AM1, виробник RSM Electric, Туреччина, діапазон вимірювання 0,05-5,5 А;
- осцилограф Atten ADS1102CAL;
- ПК для опрацювання результатів експериментів;
- лабораторний стенд імітаційного моделювання накидів та коротких замикань.

Лабораторні випробування базових компонентів ПРЗ.6-10 трансформатора струму, двохперіодного випрямляча виконується за допомогою цифрового вольтметра, амперметра та осцилографа.

Випробування БРЗ, логічного елемента "Виключаюче АБО" та інтегруючого квадратора виконується за допомогою ПК.

За результатами проведених лабораторних випробувань базових компонентів та дослідного взірця ПРЗ.6-10 складаються та затверджуються відповідні акти згідно ДСТУ 3974-2000.



ЗАТВЕРДЖЕНО

Проректор з наукової роботи ТНЕУ  
д.е.н., професор  
З.-М.В. Задорожний  
«           2017 р.

АКТ

попередніх випробувань компонентів дослідного зразка ПРЗ.6-10

Авторський нагляд за розробкою схемних рішень та випробувань дослідних взірців  
(назва НДР)

пристрою релейного захисту в мережах 6-10 кВ

СКС-70-2016. № держреєстрації 0117U000141

(шифр, номер державної реєстрації)

Комісія у складі:

голови: Я.М.Николайчук, керівник теми зав.каф. СКС ТНЕУ

(ініціали, прізвище, посада, організація)

членів комісії: Н.Я.Возна, відп. викон. теми, доц.каф. СКС ТНЕУ

(ініціали, прізвище, посада, організація)

В.П.Кідиба, гол.інженер ІМСКОЕ

(ініціали, прізвище, посада, організація)

що працювала на підставі розпорядження директора ІМСКОЕ №6 від 30.09 2017 року

(назва, дата і номер документа щодо призначення комісії)

у період з " 20 " вересня 2017 р. по " 30 " вересня 2017 р. провела попередні  
випробування компонентів дослідного зразка ПРЗ 6.10

Випробування проведені м.Львів, спеціалізована лабораторія ІМСКОЕ

(місце проведення випробувань)

за програмами і методиками, які розроблені ТНЕУ

(назва виконавця НДР)

погоджені І.О.Сабадаш, директор ІМСКОЕ

(ініціали, прізвище, посада, організація)

і затверджені З.-М.В. Задорожний, проректор з наукової роботи ТНЕУ

(ініціали, прізвище, посада, організація)

1. Мета випробувань: попередні випробування компонентів ПРЗ.6-10

2. Результати випробувань (за усіма пунктами програми попередніх  
випробувань): схемотехнічні рішення компонентів дослідного зразка відповідають  
вимогам ТЗ за договором № СКС-70-2016

3. Рекомендації комісії з попередніх випробувань: додатково у склад структури дослідного  
зразка ПРЗ 6.10 ввести резисторний дільник потенціалу на вході АЦП для можливості  
плавного регулювання порогу спрацювання

4. Висновки комісії щодо придатності компонентів до подання на подальші випробування  
компоненти пристрою ПРЗ 6.10 придатні для проведення подальших  
випробувань

Додатки: \_\_\_\_\_

Голова комісії \_\_\_\_\_

(підпис)

Я.М.Николайчук

Члени комісії \_\_\_\_\_

(підпис)

В.П.Кідиба

(підпис)

Н.Я.Возна

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор Інституту  
мікропроцесорних систем керування  
об'єктами електроенергетики

к.т.н., доцент

I.O.Сабадаш

«        »

2017 р.

АКТ

про закінчення робіт із виготовлення і налагодження дослідного зразка  
ПРЗ.6-10 для подання його до попередніх випробувань

Авторський нагляд за розробкою схемних рішень та випробувань

(назва НДР)

дослідних взірців пристрою релейного захисту в мережах 6-10 кВ.

№ СКС-70-2016

Ми, що нижче підписалися, представники Інституту мікропроцесорних

(організація-виконавець НДР, посада, прізвище, ініціали)

систем керування об'єктами електроенергетики, гол.інженер, Кідиба В.П.

та керівник НДР, провідний науковий співробітник, Николайчук Я.М.

Склали цей акт про те, що внаслідок виготовлення, налагодження  
лабораторних випробувань дослідного зразка пристрою релейного захисту  
ПРЗ.6-10

Встановлено:

дослідний зразок та робоча документація, розроблені і виготовлені  
відповідно до план-графіку повністю

Висновки дослідний зразок ПРЗ.6-10 може бути поданий на попередні  
випробування

Головний інженер Інституту  
мікропроцесорних систем керування  
об'єктами електроенергетики  
к.т.н., доцент



В.П.Кідиба

Керівник НДР,  
д.т.н., професор



Я.М.Николайчук



## ДОДАТОК К

Розробка програми та верифікація алгоритмів побудови ОКМ для відображення технологічних станів ОУ на тестових та експериментальних сигналах.

1. Програмні засоби, які використовуються для розробки системи

Система побудови образно-кластерної моделі стану об'єкту управління (ОУ) складається з двох частин – серверної та клієнтської.

Для реалізації серверної частини використано мову програмування Python (версія 3.4). Python - інтерпретована об'єктно-орієнтована мова програмування високого рівня з строгою динамічною типізацією. Структури даних високого рівня разом із динамічною семантикою та динамічним зв'язуванням роблять її привабливою для швидкої розробки програм, а також як засіб поєднання існуючих компонентів. Python підтримує модулі та пакети модулів, що сприяє модульності та повторному використанню коду. Інтерпретатор Python та стандартні бібліотеки доступні як у скомпільованій так і у вихідній формі на всіх основних платформах (Windows, Linux, MacOS). В мові програмування Python підтримується декілька парадигм програмування, зокрема: об'єктно-орієнтована, процедурна, функціональна та аспектно-орієнтована. Серед основних її переваг можна назвати такі:

- чистий синтаксис;
- переносимість програм (що властиве більшості інтерпретованих мов);
- стандартний дистрибутив має велику кількість корисних модулів (включно з модулем для розробки графічного інтерфейсу);
- можливість використання Python в діалоговому режимі (дуже корисне для експериментування та розв'язання простих задач);
- стандартний дистрибутив має просте, але разом із тим досить потужне середовище розробки;
- зручний для розв'язання математичних та інших наукових задач (має засоби роботи з комплексними числами, може оперувати з цілими числами довільної величини тощо);
- відкритий код (можливість редагувати його іншими користувачами).

Елегантний синтаксис Python, динамічна обробка типів, а також те, що це інтерпретована мова, роблять її ідеальною для написання скриптів та швидкої розробки прикладних програм у багатьох галузях на більшості платформ. Інтерпретатор мови Python може бути розширений функціями та типами даних, розробленими на C чи C++ (або на іншій мові, яку можна викликати із C). Python також зручна як мова розширення для прикладних програм, що потребують подальшого налагодження.

Крім стандартних модулів Python для розробки серверної частини системи також використано наступні бібліотеки:

- NumPy – розширення мови Python, що додає підтримку великих багатовимірних масивів і матриць, разом з великою бібліотекою

високорівневих математичних функцій для операцій з цими масивами (<http://numpy.org>);

- Matplotlib – бібліотека на мові програмування Python для візуалізації даних двовимірною 2D графікою (3D графіка також підтримується) (<http://matplotlib.org>).

Клієнтська частина системи реалізована як веб-сторінка, побудована з використанням мови розмітки гіпертекстових документів HTML (англ. HyperText Markup Language) та каскадної таблиці стилів (англ. Cascading Style Sheets або скорочено CSS — спеціальна мова, що використовується для опису сторінок, написаних мовами розмітки даних). Така реалізація клієнтської частини дає можливість проводити моніторинг стану ОУ використовуючи практично будь-який браузер інтернет-сторінок з будь-якого сучасного пристрою, який має можливість доступу до локальних мереж або мережі Інтернет (стаціонарні комп'ютери, ноутбуки, нетбуки, планшети, смартфони та інші цифрові пристрої). Тобто, при правильному налаштування каналу доступу до сервера (наприклад через VPN) через Інтернет буде можливість проводити моніторинг системи перебуваючи практично у будь-якій точці світу.

Для реалізації безпосередньо моделі стану ОУ використовується зображення у форматі SVG (Scalable Vector Graphics – з англ. «масштабована векторна графіка» — специфікація мови розмітки, що базується на XML, та формат файлів для двовимірної векторної графіки, як статичної, так і анімованої та інтерактивної).

## 2. Принцип роботи програми.

На сервері, до якого під'єднаний груповий контролер (на який поступає інформація від сенсорів) запускається програма–скрипт на мові Python (файл smile.py). Вказана програма циклічно опрацьовує інформацію (набори даних) від сенсорів (змінна SENSOR\_QTY містить їх кількість, в даному випадку  $SENSOR\_QTY = 8$ ) і, на підставі проведення ряду розрахунків для кожного набору даних, вираховуються наступні характеристики: математичне сподівання вибіркоче, математичне сподівання зважене, математичне сподівання ковзне, дисперсія, середнє квадратичне відхилення, значення для побудови логіко-статистичних інформаційних моделей (ЛСІМ1-ЛСІМ5), ...

Значення по кожній групі обчислених характеристик є базовими значеннями для побудови кінцевої матриці (у програмі змінна FINAL\_MATRIX). Відповідно, ця кінцева матриця є джерелом для побудови безпосередньо моделі стану ОУ.

Результатом завершення кожного циклу програми-скрипта smile.py є векторне графічне зображення у форматі SVG – файл face\_real.svg.

Для того, щоб безпосередньо побачити екран моніторингу системи, достатньо запустити у браузері файл index.html, який реалізує інтерфейс екрану моніторингу за станом ОУ та характеристиками системи.

Параметр `<meta http-equiv="Refresh" content="11" />` у файлі index.html визначає частоту оновлення екрану моніторингу у секундах (в даному випадку

він за коментований, оскільки в реальній системі його потрібно синхронізувати із частотою циклу обробки інформації від сенсорів у програмі скрипті smile.py).

Результатами оновлення екрану моніторингу є «свіжий» елемент-зображення моделі стану ОУ (файл face\_real.svg) та графіки, які відображають обчислені характеристики стану ОУ, які вбудовуються в код сторінки файлу index.html.

### 3. Опис файлів та каталогів.

Каталоги:

- \css, \js, \images – технічні каталоги, містять інформацію про каскадні таблиці стилів, скрипти на javascript та графічні елементи, які використовуються при побудові екрану моніторингу – файлу index.html;

- \charts\png – використовуються програмою-скриптом smile.ru для зберігання графіків за результатами обчислення характеристик стану ОУ і, відповідно, файлом index.html на клієнтській частині для побудови екрану моніторингу.

Файли:

- smile.py – основний файл серверної частини – програма-скрипт, яка опрацьовує інформацію від сенсорів, обчислює значення характеристик стану ОУ та будує кінцеві графіки для екрану моніторингу;

- index.html – основний файл клієнтської частини, який реалізує екран моніторингу на базі результуючих обчислень та графіків програми-скрипта smile.py;

- face\_real.svg – файл із векторним зображенням, у якому відображена актуальна модель стану ОУ на поточний момент;

- face\_good.svg, face\_bad.svg, face\_alarm.svg – файли-шаблони відповідно для станів ОУ (норма, перед аварійний стан, аварія), елементи яких використовуються для побудови актуальної моделі стану для файлу face\_real.svg;

- файли у графічних форматах в каталозі \charts\png – файли із графіками відповідно (вбірккові математичні сподівання: mean1.png – mean8.png; ковзні математичні сподівання: meanj1.png – meanj8.png; вагові математичні сподівання: meanv1.png – meanv8.png; значення для ЛСІМ1: lsim11.png – lsim18.png);

- templatemo\_style.css – файл, який використовується разом з каскадними таблицями стилів (CSS) для побудови інтерфейсу екрану моніторингу стану ОУ.

### 4. Організація графічного інтерфейсу програмного продукту

Графічний інтерфейс користувача (ГІК) - тип інтерфейсу, який дозволяє користувачам взаємодіяти з електронними пристроями через графічні зображення та візуальні вказівки.

Для початку роботи з програмою використовується головне вікно (рис.К.1).

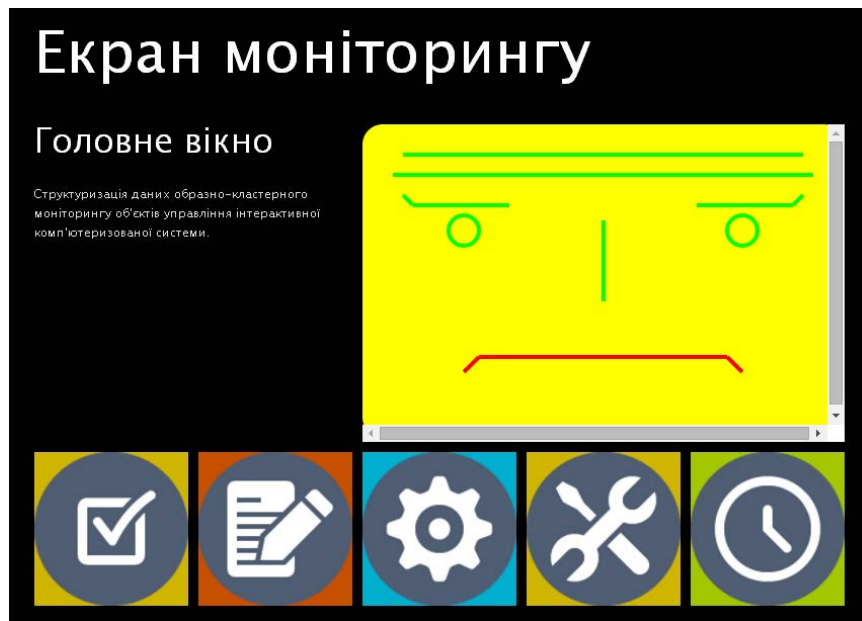


Рис.К.1 - Головне вікно програми.

Екранна форма введення даних для визначення математичних сподівань показана на рис.К.2 – К.7.

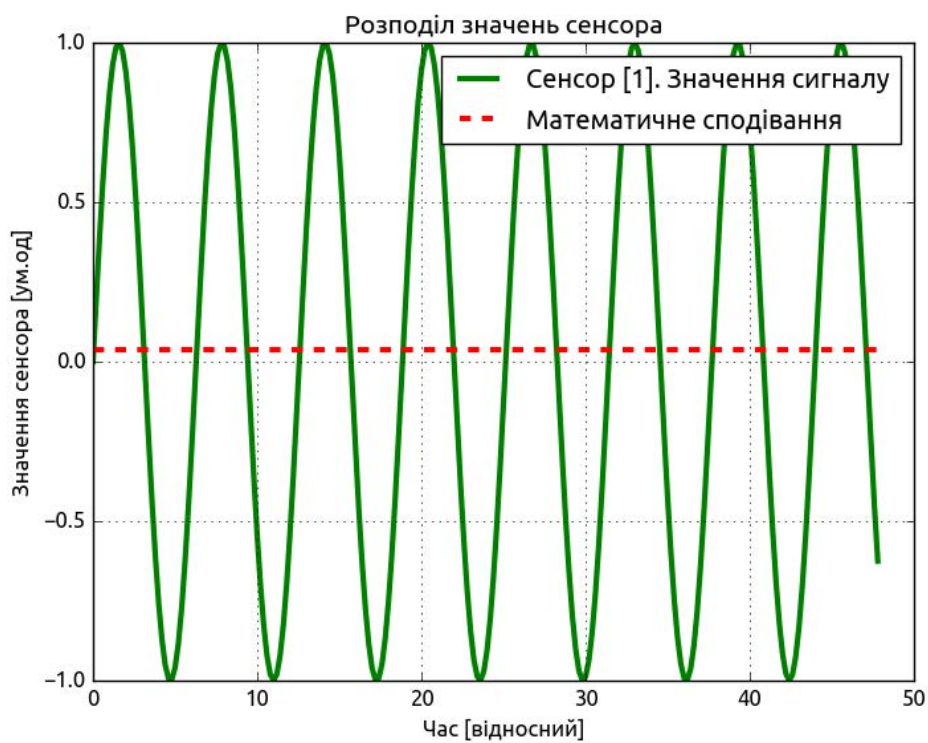


Рис. К.2 - Математичні сподівання сенсора 1.

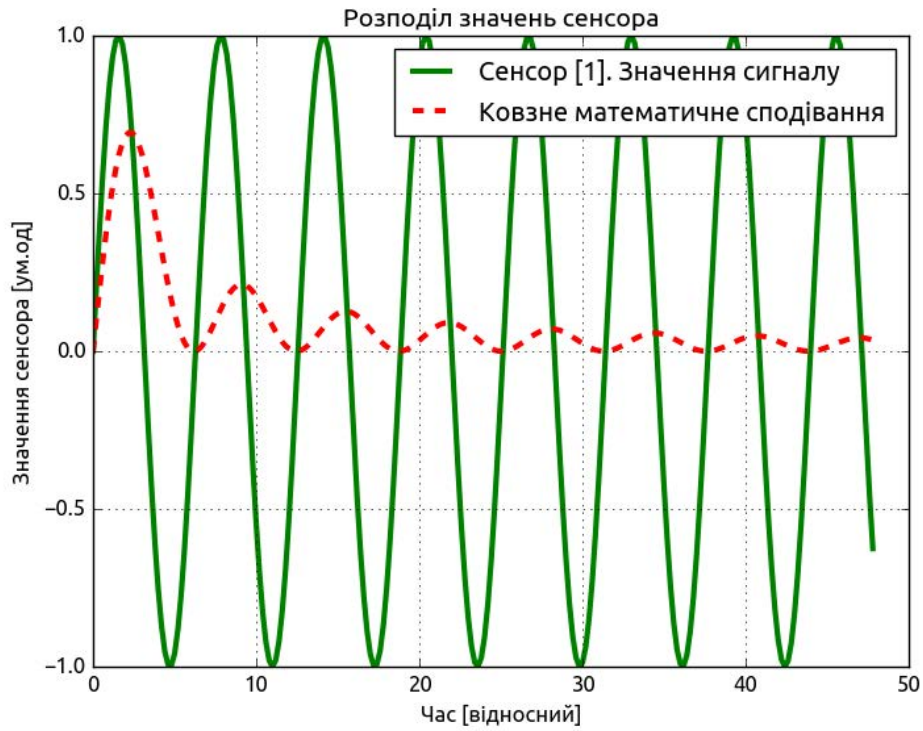


Рис. К.3 - Ковзне математичне сподівання сенсора 1.

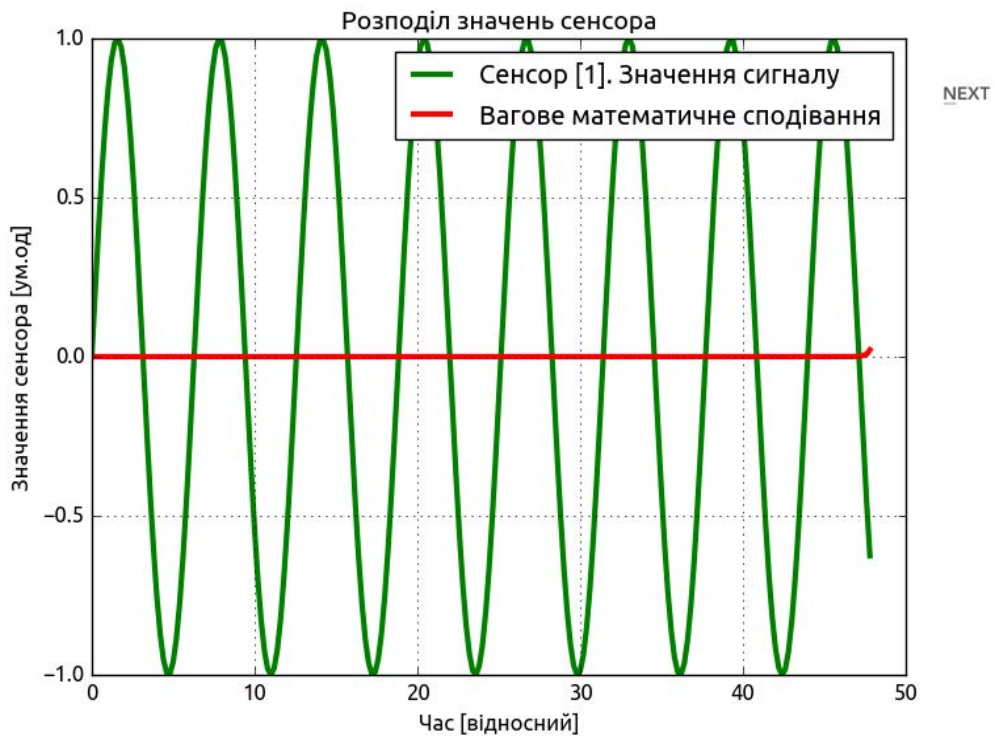


Рис. К.4 - Вагове математичне сподівання сенсора 1.

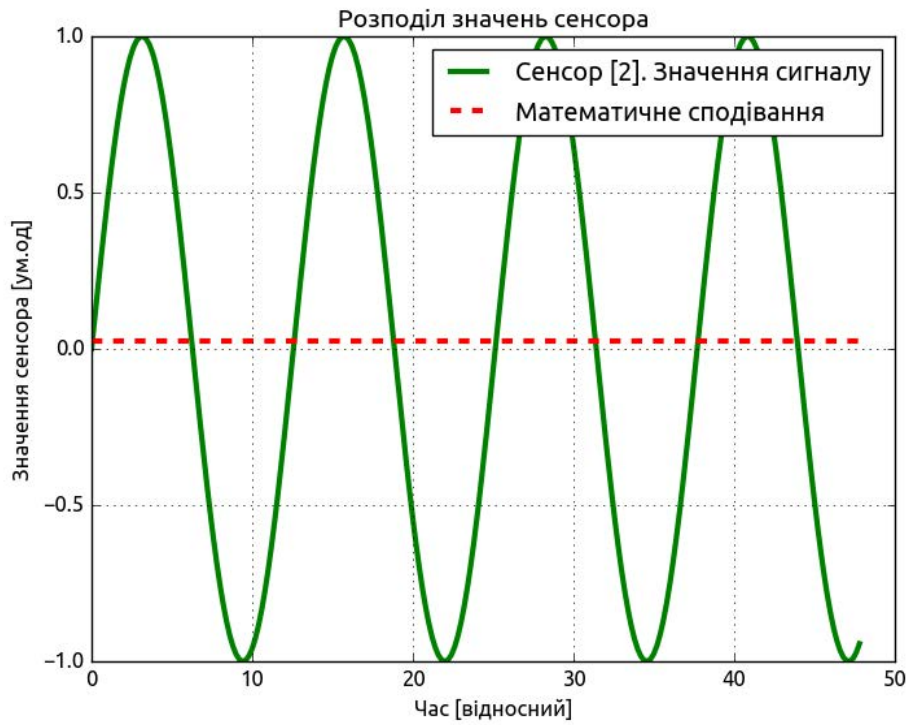


Рис. К.5 - Математичне сподівання сенсора 2.

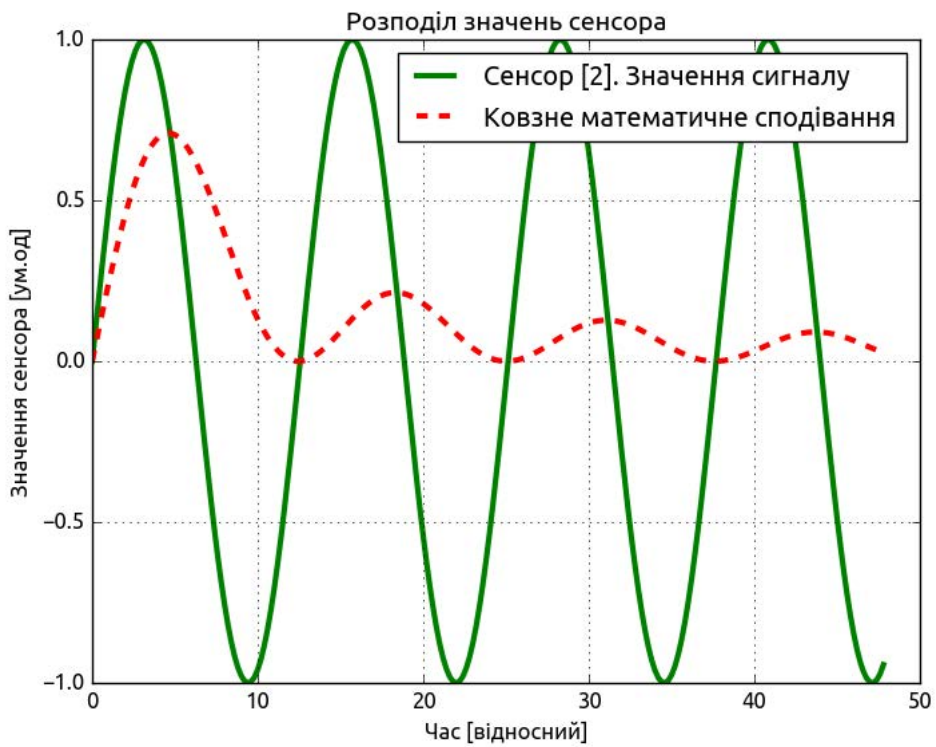


Рис. К.6 - Ковзне математичне сподівання сенсора 2.



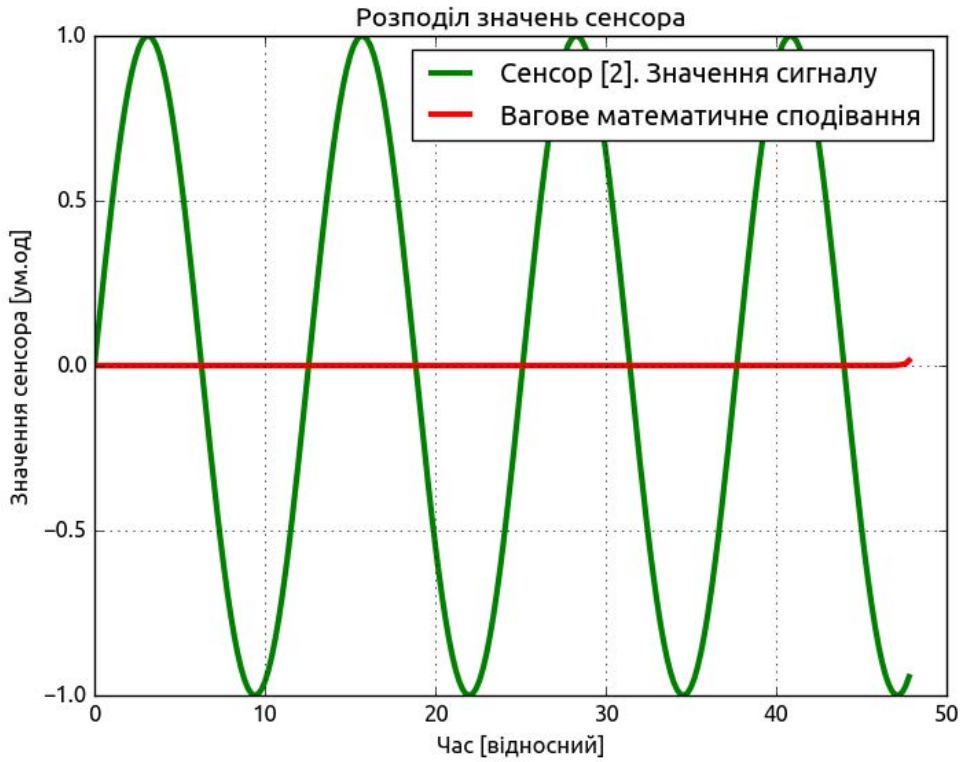


Рис. К.7 - Вагове математичне сподівання сенсора 2.

Екранна форма введення даних для визначення логіко-статистичних інформаційних моделей на рис.К.8 – К.11.



Рис. К.8 - Реалізація ЛСІМ-1.

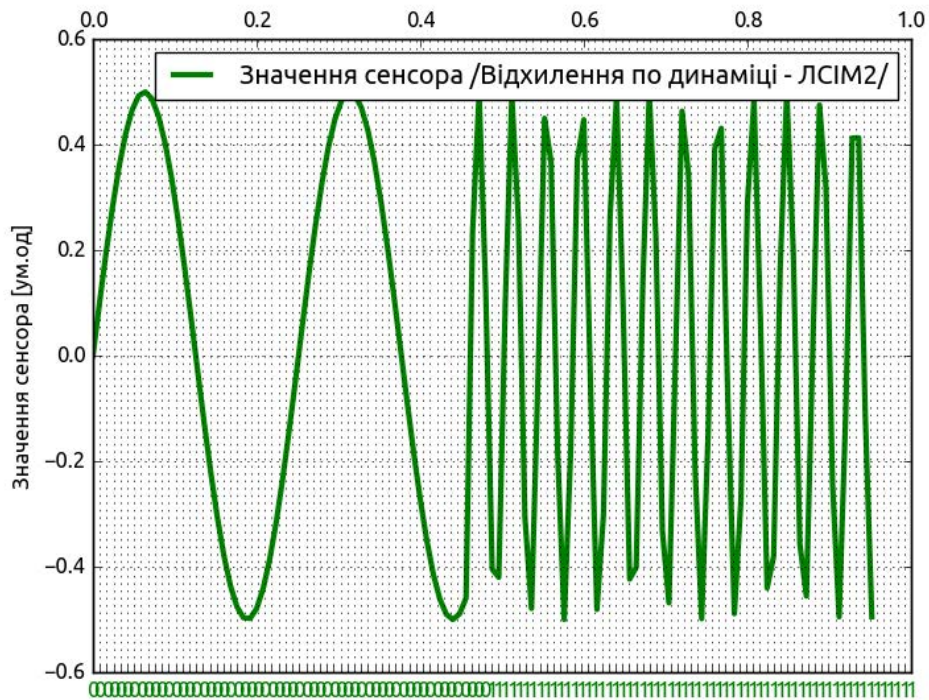


Рис. К.9 - Реалізація ЛСІМ-3.

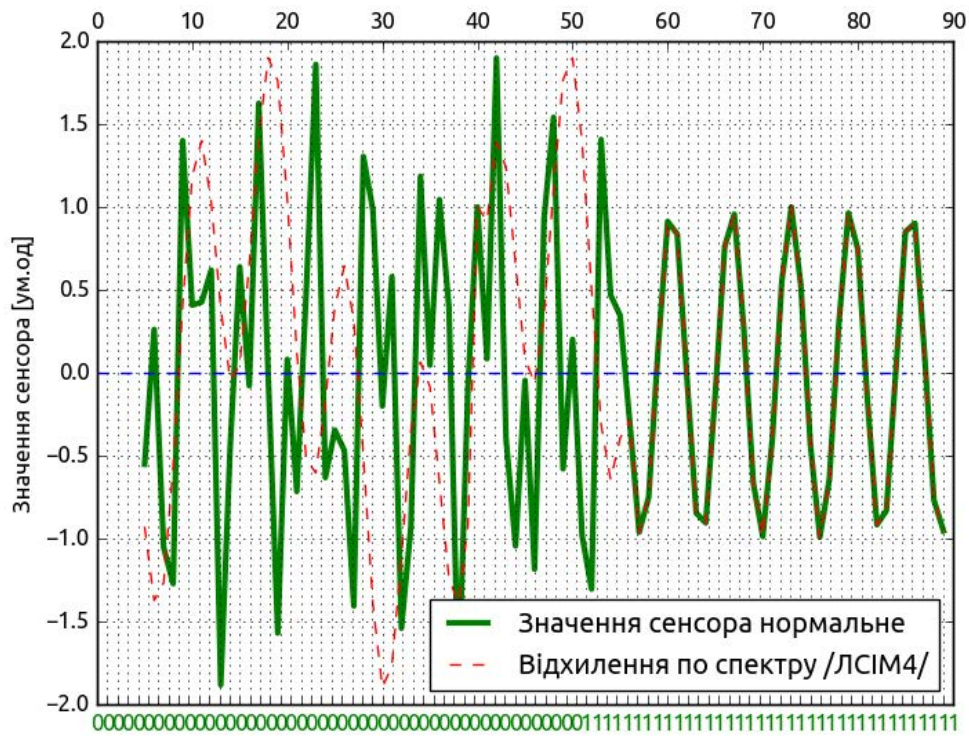


Рис. К.10 - Реалізація ЛСІМ-4.



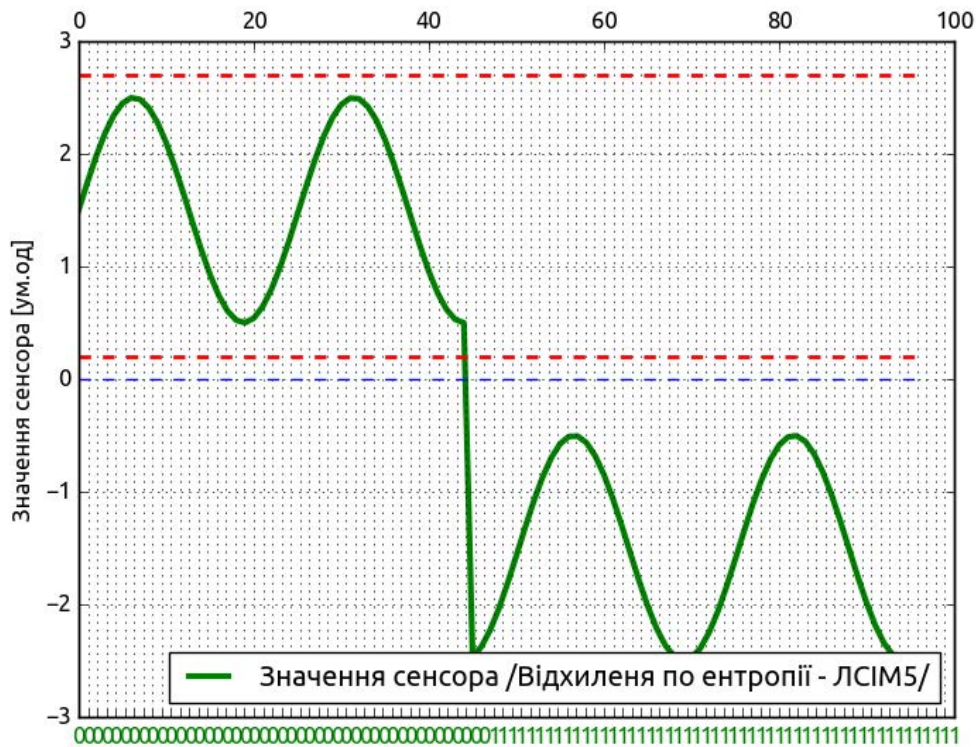


Рис. К.11 - Реалізація ЛСІМ-5.

### 5. Код програми.

```
#!/usr/bin/env python

import random
import math
import os
import time
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib
from matplotlib import rc

SENSOR_QTY = 8
SENSOR_MIN_VALUE = 0
SENSOR_MAX_VALUE = 256
ATTEMPTS = 256
DELTA = 5 #
VALUES_FILE_NAME = 'sensors_values.txt'
SHOW_CHART = False
START_WEIGHT = 0.6
SMILE_FILE_NAME = 'face_real.svg'
TIME_TO_WAIT = 7
# 26/04/2017 Потрібно задати межі математичного сподівання для кожного з 8 датчиків
MS_DELTA = [[-0.04,0.04], [-0.07,0.07], [-0.09,0.06], [-0.06,0.09], [-0.05,0.05], [-0.03,0.095], [-0.095,0.095], [-0.075,0.075]]
FINAL_MATRIX = [[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
```

```

[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]]

```

# function saves chat to defined file using defined file format

```

def save_chart(name="", fformat='png'):
    img_dir = os.getcwd()
    os.chdir('./charts/%s' % fformat)
    plt.savefig('%s.%s' % (name, fformat), fformat='png')
    os.chdir(img_dir)

```

def calc\_weights(qty):

```

    "Функція обчислює вагові коефіцієнти в залежності."
    Kv = []
    D = 1 - START_WEIGHT
    Kv.append(START_WEIGHT)
    for i in range(qty - 2):
        k = D - D/2
        Kv.append(k)
        D = D - k

    Kv.append(D)
    Kv = Kv[::-1]
    return Kv

```

# function generates sensors values and write them to defined CSV-file

```

def gen_sensors_values(fname, attempts, sqty, minval, maxval):
    f = open(fname, 'w')
    for j in range(sqty):
        if j == (sqty - 1):
            f.write('sensor%i' % j)
        else:
            f.write('sensor%i,' % j)
    f.write('\n')
    for i in range(attempts):
        for j in range(sqty):
            val = random.randint(minval, maxval)
            if j == (sqty - 1):
                f.write('%i' % val)
            else:
                f.write('%i,' % val)
        f.write('\n')
    f.close()

```

# Calculate MEANs(Mx, MM, MW) and build appropriate chart

```

def NewDrawMean(sensor_no):
    fig = plt.figure()
    fig(figsize = (9, 3))
    fig.dpi = 85
    # можна спробувати fig.set_size_inches(1024,768)
    x = np.arange(0.0, 48.0, 0.2)

```

```

y = np.sin(x / sensor_no)
MS = y.mean()
# -- MM
plt.plot(x, y, label = u'Сенсор [%i]. Значення сигналу' % sensor_no, linewidth = 3, color =
'g')
MM = []
sum = 0
i = 0
for j in range(len(y)):
    sum = sum + y[j]
    i = i + 1
    ## -- 26/04/2017
    ##MM.append(sum/(i+1))
    MM.append(sum/(i))
    ## -- Перевірити !!!
plt.plot(x, MM, 'k--', label = u'Ковзне математичне сподівання', linewidth = 3, color = 'r')
plt.xlabel(u'Час [відносний]', fontsize=12)
plt.ylabel(u'Значення сенсора [ум.од]', fontsize=12)
plt.title(u'Розподіл значень сенсора', fontsize=14)
plt.legend()
plt.grid(True)
save_chart(name='meanj%i' % sensor_no)
if SHOW_CHART:
    plt.show()
plt.close()

## -- MW
fig = plt.figure()
fig(figsize = (9, 3))
fig.dpi = 85
plt.plot(x, y, label = u'Сенсор [%i]. Значення сигналу' % sensor_no, linewidth = 3, color =
'g')
MW = []
weights = calc_weights(len(y))
sum = 0
for i in range(len(y)):
    sum = sum + y[i]
    MW.append(sum/(i+1) * weights[i])
plt.plot(x, MW, label = u'Вагове математичне сподівання', linewidth = 3, color = 'r')
plt.xlabel(u'Час [відносний]', fontsize=12)
plt.ylabel(u'Значення сенсора [ум.од]', fontsize=12)
plt.title(u'Розподіл значень сенсора', fontsize=14)
plt.legend()
plt.grid(True)
save_chart(name='meanv%i' % sensor_no)
if SHOW_CHART:
    plt.show()
plt.close()

## -- Mx
fig = plt.figure()
fig(figsize = (9, 3))

```

```

fig.dpi = 85
plt.plot(x, y, label = u'Сенсор [%i]. Значення сигналу' % sensor_no, linewidth = 3, color =
'g')
x = [0, 48]
y = [MS, MS]
plt.plot(x, y, 'k--', label = u'Математичне сподівання', linewidth = 3, color = 'r')
plt.xlabel(u'Час [відносний]', fontsize=12)
plt.ylabel(u'Значення сенсора [ум.од]', fontsize=12)
plt.title(u'Розподіл значень сенсора', fontsize=14)
plt.legend()
plt.grid(True)
save_chart(name='mean%i' % sensor_no)
if SHOW_CHART:
    plt.show()
plt.close()

if (MS >= MS_DELTA[sensor_no - 1][0]) and (MS <= MS_DELTA[sensor_no - 1][1]):
    return 0
else:
    return 1

# Calculate LSIM1 and build appropriate chart
def NewDrawLSIM1(sensor_no):
    tiks_array = []
    delta = 0.2
    XX = np.arange(0.0, 48.0)
    #XX = np.arange(0.0, 5.0, 0.1)
    YY = np.multiply((np.sin( 0.2 * np.pi * XX * sensor_no)), (np.exp(-XX))) * 10
    for y in YY:
        if ((y > delta) or (y < ((-1) * (delta)))):
            tiks_array.append(1)
        else:
            tiks_array.append(0)
    fig = plt.figure()
    ax2 = fig.add_subplot(111)
    plt.plot(XX, YY, label = u'Сенсор [%i] /Відхилення по амплітуді - ЛСІМ1/' % sensor_no,
linewidth = 3, color = 'g')
    plt.xlabel(u' ', fontsize=12)
    plt.ylabel(u'Значення сенсора [ум.од]', fontsize=12)
    locator = matplotlib.ticker.LinearLocator(len(tiks_array))
    ax2.set_xticklabels(tiks_array, color='green')
    ax2.xaxis.set_major_locator(locator)
    ax2.grid()

    plt.legend()
    #plt.grid(True)
    ax1 = ax2.twinx()

    x = [0, len(tiks_array)]
    y = [delta, delta]
    plt.plot(x, y, 'k--', label = "", linewidth = 2, color = 'r')

```

```

y = [-delta, -delta]
plt.plot(x, y, 'k--', label = "", linewidth = 2, color = 'r')

```

```

save_chart(name='lsim1%i' % sensor_no)
if SHOW_CHART:
    plt.show()
plt.close()

```

```

# Calculate LSIM2 and build appropriate chart
def NewDrawLSIM2(sensor_no):

```

```

    # -- Calculate Cxx depending of j, YY, delta
    def calc_Cxx(j, YY, delta):
        n = len(YY) - delta
        sum = 0
        print('J = {}, N = {}'.format(j, n + j))
        for i in range(j, n + j + 1):
            print('i:= {}, --> x[i] = {}, x[i-j] = {}'.format(i, YY[i], YY[i - j]))
            sum = sum + ((YY[i] - YY[i - j]) ** 2)

        return sum / n
    # -- end of calc_Cxx

```

```

    tiks_array = []
    YY = []
    delta = 0.2
    XX = np.arange(0.0, 24.0, 0.2)
    for x in XX:
        if (x <= 11.5):
            y = 0.5 * np.sin(x)
            tiks_array.append(0)
        else:
            y = 0.5 * np.sin(6*x)
            tiks_array.append(1)
        YY.append(y)

```

```

    # -- 09/05/2017
    YY0 = []
    for i in range(len(XX)):
        y = math.sin(XX[i])
        YY0.append(y)

```

```

    delta_j = 64
    Cxx = []
    C2xx = []
    for j in range(delta_j):
        c = calc_Cxx(j, YY, delta_j)
        Cxx.append(c)
        c2 = calc_Cxx(j, YY0, delta_j)
        C2xx.append(c2)

```

```

    # -- end 09/05/2017

```

```

fig = plt.figure()
ax2 = fig.add_subplot(111)
plt.plot(XX, YY, label = u'Значення сенсора /Відхилення по динаміці - ЛСІМ2/',
linewidth = 3, color = 'g')
#plt.text(XX[-1] - 0.5, YY[-1]+0.05, u'LSIM2', style='normal', fontsize=14, color = 'g')
plt.xlabel(u' ', fontsize=12)
plt.ylabel(u'Значення сенсора [ум.од]', fontsize=12)
locator = matplotlib.ticker.LinearLocator(len(ticks_array))
ax2.set_xticklabels(ticks_array, color='green')
ax2.xaxis.set_major_locator(locator)
ax2.grid()

#plt.title(u'Розподіл значень сенсора', fontsize=14)
plt.legend()
#plt.grid(True)
ax1 = ax2.twinx()

x = [0, len(ticks_array)]

save_chart(name='lsim2%i' % sensor_no)
if SHOW_CHART:
    plt.show()

```

```

# Calculate LSIM2 and build appropriate chart
def DrawLSIM2(values):

```

```

    ticks_array = []
    YY = []
    delta = 0.2
    XX = np.arange(0.0, 24.0, 0.2)
    for x in XX:
        if (x <= 11.5):
            y = 0.5 * np.sin(x)
            ticks_array.append(0)
        else:
            y = 0.5 * np.sin(6*x)
            ticks_array.append(1)
    YY.append(y)

```

```

fig = plt.figure()
ax2 = fig.add_subplot(111)
plt.plot(XX, YY, label = u'Значення сенсора /Відхилення по динаміці - ЛСІМ2/',
linewidth = 3, color = 'g')
#plt.text(XX[-1] - 0.5, YY[-1]+0.05, u'LSIM2', style='normal', fontsize=14, color = 'g')
plt.xlabel(u' ', fontsize=12)
plt.ylabel(u'Значення сенсора [ум.од]', fontsize=12)
locator = matplotlib.ticker.LinearLocator(len(ticks_array))
ax2.set_xticklabels(ticks_array, color='green')
ax2.xaxis.set_major_locator(locator)
ax2.grid()

#plt.title(u'Розподіл значень сенсора', fontsize=14)
plt.legend()

```

```

plt.grid(True)
ax1 = ax2.twinx()

x = [0, len(tiks_array)]

save_chart(name='lsim2')
if SHOW_CHART:
    plt.show()

# Calculate LSIM4 and build appropriate chart - NOT USED
def DrawLSIM4old(values):
    tiks_array = []
    YY = []
    delta = 0.2
    XX = np.arange(0.0, 24.0, 0.1)
    for x in XX:
        if (x <= 11.9):
            y = 4 * (np.sin(x/4) * np.sin(4 * x))
        else:
            y = 4 * np.sin(x)
        YY.append(y)

    for x in XX:
        if (x <= 11.9):
            tiks_array.append(0)
        else:
            tiks_array.append(1)

    fig = plt.figure()
    ax2 = fig.add_subplot(111)
    plt.plot(XX, YY, label = u'Значення сенсора /ЛСІМ4/', linewidth = 3, color = 'g')
    #plt.text(XX[-1] - 0.5, YY[-1]+0.05, u'LSIM5', style='normal', fontsize=14, color = 'g')
    plt.xlabel(u' ', fontsize=12)
    plt.ylabel(u'Значення сенсора [ум.од]', fontsize=12)
    locator = matplotlib.ticker.LinearLocator(len(tiks_array))
    ax2.set_xticklabels(tiks_array, color='green')
    ax2.xaxis.set_major_locator(locator)
    ax2.grid()

    #plt.title(u'Розподіл значень сенсора', fontsize=14)
    plt.legend(loc = 'lower right')
    #plt.grid(True)
    ax1 = ax2.twinx()

    x = [0, len(tiks_array)]
    y = [-4, -4]
    plt.plot(x, y, 'k--', label = "", linewidth = 2, color = 'r')
    y = [4, 4]
    plt.plot(x, y, 'k--', label = "", linewidth = 2, color = 'r')
    y = [0, 0]
    plt.plot(x, y, 'k--', label = "", linewidth = 1, color = 'b')

```

```

save_chart(name='lsim4')
if SHOW_CHART:
    plt.show()

```

# Calculate LSIM4 and build appropriate chart

```
def DrawLSIM4(values):
```

```

    def func(x, y = 0):
        if y == 0:
            return 1.0 if x == 0 else math.sin(x) + math.sin(4 * x)
        else:
            return 1.0 if x == 0 else math.sin(x)

```

```
tiks_array = []
```

```
YY = []
```

```
YY2 = []
```

```
delta = 0.2
```

```
XX = np.arange(-35.0, 50.0, 1.0)
```

```
for x in XX:
```

```

    if (x <= 15.0):
        y = func(x)
        y2 = func(x * 0.2)
    else:
        y = y2 = func(x, 1)

```

```
    YY.append(y)
```

```
    YY2.append(y2)
```

```
for x in XX:
```

```

    if (x <= 12.0):
        tiks_array.append(0)
    else:
        tiks_array.append(1)

```

```
#print(tiks_array)
```

```
fig = plt.figure()
```

```
ax2 = fig.add_subplot(111)
```

```
plt.plot(XX, YY, label = u'Значення сенсора нормальне', linewidth = 3, color = 'g')
```

```
plt.plot(XX, YY2, 'r--', label = u'Відхилення по спектру /ЛСІМ4/')
```

```
#plt.text(XX[-1] - 0.5, YY[-1]+0.05, u'LSIM5', style='normal', fontsize=14, color = 'g')
```

```
plt.xlabel(u' ', fontsize=12)
```

```
plt.ylabel(u'Значення сенсора [ум.од]', fontsize=12)
```

```
locator = matplotlib.ticker.LinearLocator(len(tiks_array))
```

```
ax2.set_xticklabels(tiks_array, color='green')
```

```
ax2.xaxis.set_major_locator(locator)
```

```
ax2.grid()
```

```
#plt.title(u'Розподіл значень сенсора', fontsize=14)
```

```
plt.legend(loc = 'lower right')
```

```
#plt.grid(True)
```

```
ax1 = ax2.twinx()
```



```

x = [0, len(tiks_array)]
y = [0, 0]
plt.plot(x, y, 'k--', label = "", linewidth = 1, color = 'b')

save_chart(name='lsim4')
if SHOW_CHART:
    plt.show()

# Calculate LSIM5 and build appropriate chart
def DrawLSIM5(values):
    tiks_array = []
    YY = []
    delta = 0.2
    XX = np.arange(0.0, 24.0, 0.25)
    for x in XX:
        if (x <= 11.0):
            y = np.sin(x) + 1.5
        else:
            y = np.sin(x) - 1.5
        YY.append(y)

    for y in YY:
        if (y > 0):
            tiks_array.append(0)
        else:
            tiks_array.append(1)

    fig = plt.figure()
    ax2 = fig.add_subplot(111)
    plt.plot(XX, YY, label = u"Значення сенсора /Відхилення по ентропії - ЛСІМ5/", linewidth
= 3, color = 'g')
    #plt.text(XX[-1] - 0.5, YY[-1]+0.05, u'LSIM5', style='normal', fontsize=14, color = 'g')
    plt.xlabel(u' ', fontsize=12)
    plt.ylabel(u"Значення сенсора [ум.од]", fontsize=12)
    locator = matplotlib.ticker.LinearLocator(len(tiks_array))
    ax2.set_xticklabels(tiks_array, color='green')
    ax2.xaxis.set_major_locator(locator)
    ax2.grid()

    #plt.title(u'Розподіл значень сенсора', fontsize=14)
    plt.legend(loc = 'lower right')
    #plt.grid(True)
    ax1 = ax2.twinx()

    x = [0, len(tiks_array)]
    y = [delta, delta]
    plt.plot(x, y, 'k--', label = "", linewidth = 2, color = 'r')
    y = [delta + 2.5, delta + 2.5]
    plt.plot(x, y, 'k--', label = "", linewidth = 2, color = 'r')
    y = [0, 0]
    plt.plot(x, y, 'k--', label = "", linewidth = 1, color = 'b')

```

```

save_chart(name='lsim5')
if SHOW_CHART:
    plt.show()

# function draws the result smile-face screen based on defined params
def draw_smile(matrix):

    f = open(SMILE_FILE_NAME, 'w')
    header_str = "<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
<!DOCTYPE svg PUBLIC "-//W3C//DTD SVG 1.1//EN"
"http://www.w3.org/Graphics/SVG/1.1/DTD/svg11.dtd">
<svg version="1.1"
    baseProfile="full"
    xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
    xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink"
    xmlns:ev="http://www.w3.org/2001/xml-events"
    width="100%" height="100%">
<rect fill="yellow" x="0" y="0" width="475" height="310" rx="20"/>

    if sum(matrix[0]) == 0:
        forehead1_str = "<line x1="40" y1="30" x2="435" y2="30" style="stroke: #00ff00;
stroke-width: 4px;" />"
    else:
        forehead1_str = "<line x1="40" y1="30" x2="435" y2="30" style="stroke-dasharray:
15 10; stroke: #ff0000; stroke-width: 4px;" />"

    if sum(matrix[1]) == 0:
        forehead2_str = "<line x1="30" y1="50" x2="445" y2="50" style="stroke: #00ff00;
stroke-width: 4px;" />"
    else:
        forehead2_str = "<line x1="30" y1="50" x2="445" y2="50" style="stroke-dasharray:
15 10; stroke: #ff0000; stroke-width: 4px;" />"

    if sum(matrix[2]) == 0:
        eyebrows_str = "<line x1="50" y1="80" x2="145" y2="80" style="stroke: #00ff00;
stroke-width: 4px;" />
<line x1="40" y1="70" x2="50" y2="80" style="stroke: #00ff00; stroke-width: 4px;" />
<line x1="330" y1="80" x2="425" y2="80" style="stroke: #00ff00; stroke-width: 4px;" />
<line x1="425" y1="80" x2="435" y2="70" style="stroke: #00ff00; stroke-width: 4px;" />
""
    else:
        eyebrows_str = "<line x1="50" y1="80" x2="145" y2="80" style="stroke: #ff0000;
stroke-width: 4px;" />
<line x1="40" y1="90" x2="50" y2="80" style="stroke: #ff0000; stroke-width: 4px;" />
<line x1="330" y1="80" x2="425" y2="80" style="stroke: #ff0000; stroke-width: 4px;" />
<line x1="425" y1="80" x2="440" y2="95" style="stroke: #ff0000; stroke-width: 4px;" />
""

    if sum(matrix[2]) == 0:
        eyes_str = "<circle cx="100" cy="105" r="15" style="fill:none; stroke: #00ff00;
stroke-width:4px;" />
<circle cx="375" cy="105" r="15" style="fill:none; stroke: #00ff00; stroke-width:4px;" />

```

```

"""
    else:
        eyes_str = """<circle cx="100" cy="105" r="15" style="fill:none; stroke: #ff0000;
stroke-width:4px;" />
<circle cx="375" cy="105" r="15" style="fill:none; stroke: #ff0000; stroke-width:4px;" />
"""

        if sum(matrix[3]) == 0:
            nose_str = """<line x1="238" y1="95" x2="238" y2="175" style="stroke: #00ff00;
stroke-width: 4px;" />"""
        else:
            nose_str = """<line x1="238" y1="95" x2="238" y2="175" style="stroke: #ff0000;
stroke-width: 4px;" />
<line x1="223" y1="190" x2="238" y2="175" style="stroke: #ff0000; stroke-width: 4px;" />
<line x1="238" y1="175" x2="253" y2="190" style="stroke: #ff0000; stroke-width: 4px;" />
"""

        if sum(matrix[4]) == 0:
            mouth_str = """<line x1="115" y1="230" x2="360" y2="230" style="stroke: #00ff00;
stroke-width: 4px;" />
<line x1="100" y1="215" x2="115" y2="230" style="stroke: #00ff00; stroke-width: 4px;" />
<line x1="360" y1="230" x2="375" y2="215" style="stroke: #00ff00; stroke-width: 4px;" />
"""
        elif (sum(matrix[4]) > 0) and (sum(matrix[4]) < SENSOR_QTY):
            mouth_str = """<line x1="115" y1="230" x2="360" y2="230" style="stroke: #ff0000;
stroke-width: 4px;" />
<line x1="100" y1="245" x2="115" y2="230" style="stroke: #ff0000; stroke-width: 4px;" />
<line x1="360" y1="230" x2="375" y2="245" style="stroke: #ff0000; stroke-width: 4px;" />
"""
        elif sum(matrix[4]) == SENSOR_QTY:
            mouth_str = """<line x1="115" y1="260" x2="238" y2="215" style="stroke: #000000;
stroke-width: 4px;" />
<line x1="238" y1="215" x2="360" y2="260" style="stroke: #000000; stroke-width: 4px;" />
"""
        else:
            mouth_str = ""???""

        footer_str = '</svg>'
        f.write(header_str + '\n')
        f.write(forehead1_str + '\n')
        f.write(forehead2_str + '\n')
        f.write(eyebrows_str + '\n')
        f.write(eyes_str + '\n')
        f.write(nose_str + '\n')
        f.write(mouth_str + '\n')
        f.write(footer_str)
        f.close()

# main starts here
font = {'family': 'Ubuntu',
        'weight': 'normal'}

```

```

rc('font', **font)

#gen_sensors_values(VALUES_FILE_NAME, ATTEMPTS, SENSOR_QTY,
SENSOR_MIN_VALUE, SENSOR_MAX_VALUE)

if __name__ == '__main__':
    tf = pd.read_csv(VALUES_FILE_NAME)
    #DrawMean(tf[tf.columns[0]])
    #DrawMeanJ(tf[tf.columns[0]])
    #DrawMeanV(tf[tf.columns[0]])
    #DrawLSIM1(tf[tf.columns[0]])
    #DrawLSIM2(tf[tf.columns[0]])
    #DrawLSIM4(tf[tf.columns[0]])
    #DrawLSIM5(tf[tf.columns[0]])
    for i in range(SENSOR_QTY):
        FINAL_MATRIX[4][i] = NewDrawMean(i + 1)
        NewDrawLSIM1(i + 1)
        #NewDrawLSIM2(i + 1)

    print(FINAL_MATRIX)
    for i in range(len(FINAL_MATRIX)):
        print(i, '-> ', FINAL_MATRIX[i], '; ', sum(FINAL_MATRIX[i]))

    draw_smile(FINAL_MATRIX)

    #while True:
    #    random.seed()
    #    params = []
    #    for i in range(6):
    #        params.append(random.randint(0,1))
    #    draw_smile(params)
    #    time.sleep(TIME_TO_WAIT)

```

## ДОДАТОК Л

Структури відомих аналого-цифрових перетворювачів паралельного типу в базисах Радемахера і Хаара-Крестенсона та їх системні характеристики.

Відома структура аналого-цифрового перетворювача паралельного типу (рис.Л.1) [1], який містить шину вводу вхідного аналогового потенціалу  $U_x$ , яка з'єднана з входами лінійки компараторів, вхідну шину еталонного потенціалу  $U_0$ , з'єднану з входом послідовно з'єднаних взірцевих резисторів  $R$ , відповідні  $i$ -ті виходи яких з'єднані з відповідними входами  $i$ -тих компараторів  $K$ , однофазні виходи яких з'єднані з першими входами  $i$ -тих та другими входами  $i+1$ -их логічних елементів "Виключаюче АБО", виходи яких з'єднані з відповідними входами діодного дешифратора, виходи якого є виходами аналого-цифрового перетворювача у паралельному двійковому коді ТЧБ Радемахера.

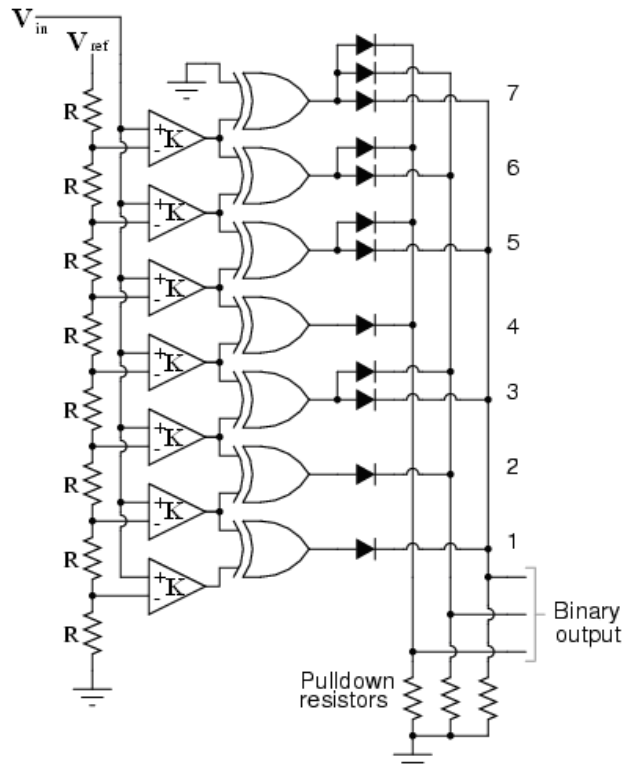


Рис.Л.1 - Структура АЦП паралельного типу базису Радемахера з шифратором на діодних вентилях.

У структурі такого паралельного АЦП вхідний аналоговий сигнал на виходах компараторів перетворюється у прямий паралельний код унітарного ТЧБ, який на виходах лінійки логічних елементів "Виключаюче АБО" перетворюється у прямий розрядно-позиційний код ТЧБ Хаара. На виході діодного шифратора потенціал  $U_x$  перетворюється у прямий позиційний двійковий код ТЧБ Радемахера.

Недоліком такого АЦП є висока апаратна складність та низька швидкодія, обумовлена наявністю великого числа ( $2^k$ , де  $k$  - розрядність АЦП) структурно-складних елементів "Виключаюче АБО", які містять 4-5 логічних елементів "І", "АБО", "НЕ" [2], в яких не менше трьох логічних елементів з'єднані послідовно, тому вихідний сигнал формується не менше, як за три мікротакти переключення логічних вентилів. Тобто апаратна та часова складність лінійки логічних елементів "Виключаючого АБО" у такому АЦП відповідає оцінкам:

$$A_1 = 2^k \cdot (4 \div 5)V - \text{апаратна складність};$$

$$\tau_1 = 3\nu - \text{часова складність},$$

де  $A$  - апаратна складність одного мікроелектронного вентиля ( $V$ ), а  $\nu$  - тривалість мікротакту його переключення.

Велика апаратна складність такого АЦП обумовлена також значною кількістю вентиляльних діодів у шифраторі розрядно-позиційного коду ТЧБ Хаара у вихідний двійковий код ТЧБ Радемахера, кількість яких складає  $2^k \times k/2$  [3].

Системні характеристики структур компонентів РКС та пристроїв обчислювальної техніки розраховуються згідно таблиць експертних оцінок (табл. 2.1, 2.2, 2.4) [4, 5] та аналітичних виразів апаратної, часової та структурної складностей.

Тобто, системні характеристики такого АЦП становлять:

$$A = 2^k \cdot (A_R + A_K + A_{XOR} + \frac{k}{2} \cdot A_V)\nu - \text{апаратна складність};$$

$$\tau = (\tau_R + \tau_K + \tau_{XOR} + \tau_V)\nu - \text{часова складність},$$

$$k_c = 2^k (k_R + k_K + k_{XOR} + k_V) + k_z - \text{структурна складність},$$

$$F = 2^k (f_R + f_K + f_{XOR} + f_V) - \text{інформативність структури пристрою};$$

$$k_e = F/k_c - \text{інформаційно-структурна складність},$$

де  $A_i$  - апаратна складність одного мікроелектронного елемента, а  $\tau_i$  - тривалість мікротакту його переключення,  $k$  - розрядність пристрою,  $k_i$  - структурна складність компонента,  $f_i$  - інформативність компонента,  $k_z$  - структурна складність входу-виходів,  $R$  - резистор,  $K$  - компаратор,  $XOR$  - логічний елемент "Виключаюче АБО",  $V$  - вентиль.

При  $k = 3$  отримуємо:

$$A = 2^3 \cdot (0,1 + 3 + (4 \div 5) + 1,5) = 68,8 \div 76,8V ;$$

$$\tau = 0 + 5 + 3 + 1 = 9\nu ,$$

$$k_c = 2^3 (15 + 13,6 + 128 + 14,6) + 96 = 1465,6 ,$$

$$F = 2^3 (1 + 5 + 5 + 1) = 96 ,$$

$$k_e = 96/1465,6 = 0,066 .$$

Наприклад, для 10-ти бітного АЦП відомого аналога, число елементів у лінійці логічних елементів "Виключаюче АБО" складає

$1024 \cdot (4 \div 5) = 4096 \div 5120$  логічних вентилів, а діодних вентилів у шифраторі двійкових кодів  $1024 \cdot 5 = 5120$ .

Відома також структура аналого-цифрового перетворювача (рис.Л.2) [6], у якому застосовані парафазні компаратори ( $k_{PK}$ ), виходи яких з'єднані з входами відповідних  $i$ -тих та  $i+1$ -х логічних елементів "І", виходи яких з'єднані з відповідними входами діодного шифратора та регістра пам'яті (RG), виходи якого є виходами аналого-цифрового перетворювача у паралельному двійковому коді ТЧБ Радемахера.

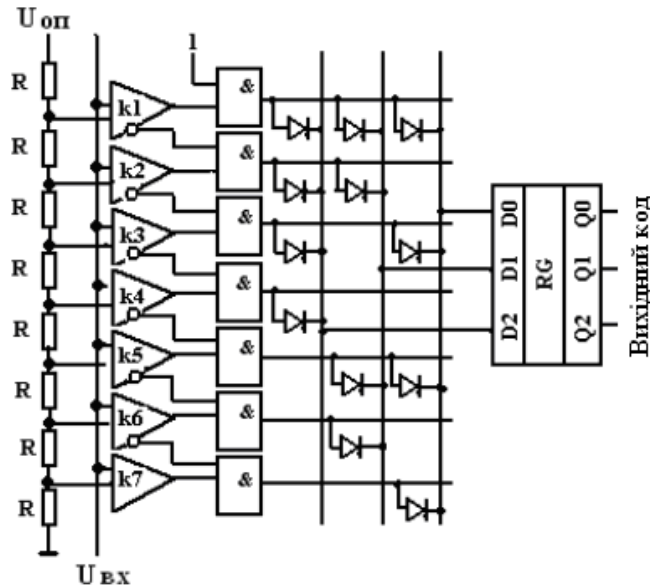


Рис.Л.2 - Структура АЦП базису Радемахера на основі парафазних компараторів.

Розрахунок системних характеристик такого АЦП виконується згідно наступних виразів:

$$A = 2^k \cdot (A_R + A_{PK} + A_{\&} + k/2 \cdot A_V) + k \cdot A_T - \text{апаратна складність};$$

$$\tau = \tau_R + \tau_{PK} + \tau_{\&} + \tau_V + \tau_T - \text{часова складність};$$

$$k_c = 2^k (k_R + k_{PK} + k_{\&} + \frac{k}{2} \cdot k_V) + k \cdot k_T + k_z - \text{структурна складність};$$

$$F = 2^k (f_R + f_{PK} + f_{\&} + f_V + f_T) - \text{інформативність структури пристрою};$$

$$k_e = F/k_c - \text{інформаційно-структурна складність},$$

$$\text{де } \tau_{PK} = 2\nu; \tau_T = 2\nu.$$

Тобто системні характеристики такої структури АЦП при  $k = 3$  наступні:

$$A = 2^3 \cdot (0,1 + 5 + 1 + 3/2 \cdot 1) + 3 \cdot 2 = 67V;$$

$$\tau = 0 + 2 + 1 + 1 + 2 = 6\nu;$$

$$k_c = 2^3 (15 + 18,8 + 11,2 + 3/2 \cdot 14,6) + 3 \cdot 30 + 229 = 854,2;$$

$$F = 2^3 (1 + 10 + 5 + 1 + 2) = 152;$$

$$k_e = 152/854,2 = 0,178.$$

При  $k = 8$  апаратна складність АЦП складає:

$$A = 2^8 \cdot (0,1 + 5 + 1 + 8/2 \cdot 1) + 8 \cdot 2 = 2602V$$

Недоліком такого АЦП є велика апаратна та структурна складність, обумовлена наявністю діодного шифратора з великим числом вентильно-діодних елементів та складною структурою.

Загальним недоліком відомих структур АЦП є обмежені функціональні можливості, обумовлені формуванням вихідних двійкових кодів ТЧБ Радемахера, які ускладнюють структуру пристроїв та знижують швидкодію виконання операцій додавання та перемноження кодів у процесорах кореляційного, спектрального та ентропійного опрацювання сигналів за рахунок наявності наскрізних переносів між розрядами в арифметиці двійкових кодів. Тому перспективний розвиток отримують швидкодіючі АЦП паралельного типу, що формують вихідні коди в базисі Хаара-Крестенсона [7].

Структура такого швидкодіючого АЦП (рис.Л.3) [8], який є компонентом цифрового автокорелятора, перетворює паралельний унітарний код у паралельний розрядно-позиційний код ТЧБ Хаара та паралельний розрядно-позиційний код ТЧБ Хаара-Крестенсона системи числення залишкових класів.

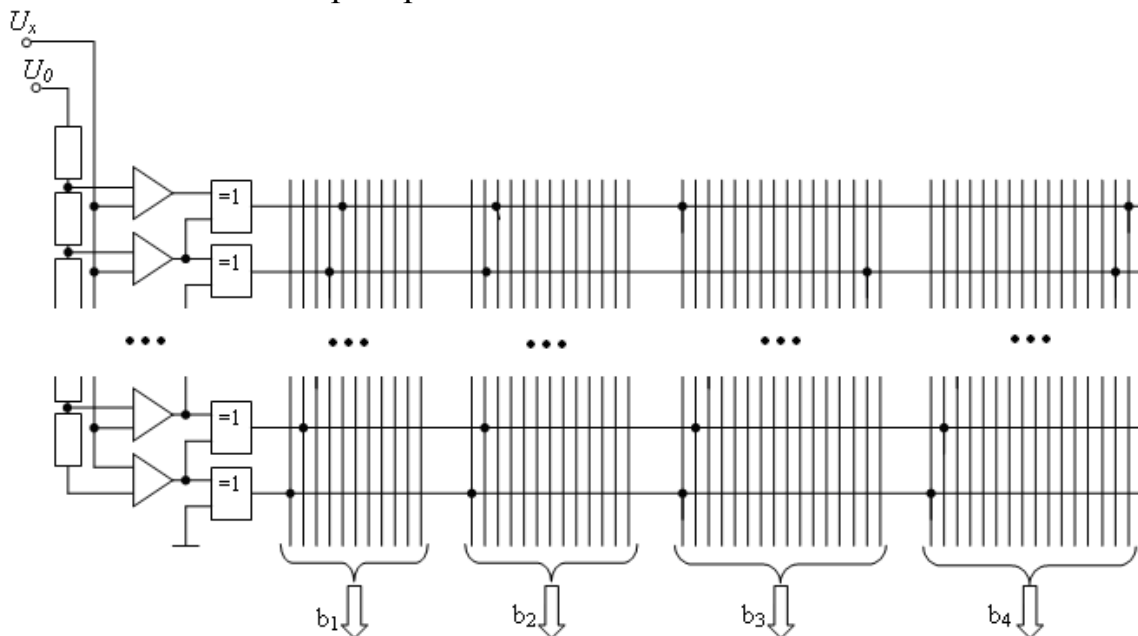


Рис.Л.3 - Структура АЦП з матричним шифратором кодів Хаара-Крестенсона.

Пристрій містить шину вводу вхідного аналогового потенціалу  $U_x$ , яка з'єднана з входами лінійки компараторів  $k$ , другу вхідну шину еталонного потенціалу, з'єднану з входом послідовно з'єднаних взірцевих резисторів  $R$ , відповідні  $i$ -ті виходи яких з'єднані з відповідними входами шифратора, який в кожному  $i$ -му розряді містить логічний елемент "Виключне АБО", виходи яких з'єднані з вентилями шифратора коду Хаара-Крестенсона у системі залишкових класів.

Недоліком такого АЦП є велика апаратна складність та низька швидкодія, яка обумовлена реалізацією шифратора паралельного унітарного коду у паралельний код Хаара-Крестенсона на основі лінійних логічних елементів



"Виключаюче АБО" та матриці шифратора з великою кількістю діодних вентилів розміщених на пересіченні шин кодів Хаара-Крестенсона.

При розрядності даного АЦП рівній  $k$ , апаратна складність шифратора на вентильних діодних повторювачах буде рівна:

$$A_{uu} = \left[ 2^k (4 \div 5) + 2^k \left( \sum_{i=1}^n P_i \right) \right] V,$$

де перший доданок визначає апаратну складність лінійки логічних елементів "Виключаюче АБО", а другий доданок – число вентилів діодної матриці, яке розраховується згідно набору взаємно простих модулів  $(P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n)$  системи залишкових класів ТЧБ Крестенсона, виходячи з умов однозначного кодування даних у двійкових кодах та кодах системи залишкових класів згідно виразів:

$$\prod_{i=1}^n P_i > 2^k; \sum_{i=1}^n \hat{E}[\log_2 P_i] \geq k + 1,$$

де  $\hat{E}[\bullet]$  - цілочисельна функція з округленням до більшого цілого, яка для однозначного кодування визначає двійкову розрядність модулів  $P_i$ ;  $n$  – число взаємнопростих модулів.

Тобто, числове значення добутку модулів повинно перевищувати число рівнів квантування АЦП  $2^k$ , а сума розрядностей двійкових кодів  $P_i$  повинна бути не менша  $k + 1$ .

Наприклад: такій першій умові, при  $k = 10$  біт відповідає набір модулів та їх добуток:  $P_1 = 32$ ,  $P_2 = 33$ ;  $P_1 \cdot P_2 = 1056 > 1024$ , а другій умові -  $(6 + 6) = 12$  біт.

Оскільки у ТЧБ Хаара-Крестенсона вихідні коди модульних залишків представляються  $P_i$ -розрядними кодами Хаара, то число вентилів у шифраторі такого типу для  $k=10$  буде рівним  $1024 \cdot (32 + 33) = 66560V$ , загальне число вентилів з врахуванням апаратної складності лінійки логічних елементів "Виключаюче АБО" буде становити:  $1024 \cdot (4 \div 5) + 66560 = 70656 \div 71680 + 66565 = 137221 \div 138245V$ .

При застосуванні набору модулів  $P_1 = 7$ ,  $P_2 = 12$ ,  $P_3 = 13$  їх добуток буде рівний  $1092 > 1024$ , сума розрядів двійкових модулів  $3 + 4 + 4 = 11$ , а сума  $P_i$ -розрядних кодів Хаара  $(7 + 12 + 13) = 32$ .

Отже, для такого набору модулів АЦП з вихідним кодом Хаара-Крестенсона, апаратна складність шифратора становитиме:

$$\begin{aligned} A_{uu} &= \left[ 2^{10} \cdot (4 \div 5) + 2^{10} (7 + 12 + 13) \right] = 1024 \cdot (4 \div 5) + 1024 \cdot 32 = \\ &= 70656 \div 71680 + 32768 = 103424 \div 104448v. \end{aligned}$$

Швидкодія такого АЦП оцінюється згідно виразу:

$$\tau_{АЦП1} = \tau_{k_1} + \tau_{ЛЕ1} + \tau_v,$$

де  $\tau_{k_1} = 5v$  - тривалість переключення однофазного компаратора;

$\tau_{\text{ЛЕ}_1} = 3U$  - тривалість переключення логічного елемента "Виключаюче АБО";

$\tau_V = 1U$  - тривалість переключення діодного вентиля.

Тобто, швидкодія такого АЦП визначається сумарною затримкою сигналів:

$$\tau_{\text{АЦП}_1} = 5 + 3 + 1 = 9U \text{ (мікротактів).}$$

Швидкодія такого АЦП не залежить від зміни параметрів  $k$  та  $n$ .

Відповідно структурна та інформаційна складність даного АЦП визначається згідно виразів:

$$k_c = 2^k (k_R + k_K + k_{\text{XOR}} + n \cdot k_V) + k_z;$$

$$F = 2^k (f_R + f_K + f_{\text{XOR}} + n \cdot f_V);$$

$$k_e = F/k_c,$$

де  $n$  - кількість модулів системи залишкових класів;

$k_z$  - структурна складність зв'язків.

$$\text{Тобто: } k_c = 2^{10} (15 + 13,6 + 128 + 2 \cdot 14,6) + 572 = 1024 \cdot 185,8 + 572 = 190831;$$

$$F = 2^{10} (1 + 5 + 5 + 2 \cdot 1) = 1024 \cdot 13 = 13312;$$

$$k_e = 13312 / 190831 = 0,07.$$

Список джерел, використаних у додатку Л.

1. <http://radiomaster.ru/articles/view/100/>.
2. Шило В.Л. Популярныe цифрове микросхемы: Справочник - 2-е изд., исправленное / В.Л.Шило - М: Радио и связь, 1989. – 352 с.
3. System Complexity Criteria and Synthesis of High-Performance Multifunctional Parallel ADC in Rademacher's and Haar-Krestenson's Theoretical and Numerical Bases / N.Vozna, Ya.Nykolaichuk, O.Zastavnyy, V.Pikh // Proceedings of the 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CADSM'2017. - PP. 218-221.
4. Возна Н.Я. Основи теорії структуризації поліфункціональних елементів складних систем // Н.Я. Возна- Вісник Хмельницького національного університету.- Хмельницький, 2015.- №2 (223) - С.204-208.
5. Возна Н.Я. Структуризація поліфункціональних даних: теорія, методи та засоби / Н.Я.Возна // Монографія - Тернопіль: ТНЕУ, 2018.- 436 с.
6. <http://refdb.ru/look/2134312-pall.html>.
7. Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці: Монографія / за заг. редакцією Я.М. Николайчука. – Тернопіль: "Бескиди", 2017. – 919 с.
8. Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці: Монографія / за заг. редакцією Я.М. Николайчука. – Тернопіль: "Бескиди", 2017. – 919 с.

## ДОДАТОК М

### Принципи роботи удосконалених пристроїв

#### 1. Високопродуктивний АЦП у базисі Хаара-Крестенсона

АЦП у базисі Хаара-Крестенсона працює наступним чином: вхідний аналоговий потенціал  $U(x)$  подається на першу вхідну шину 1, яка з'єднана з першими входами парафазних компараторів 2; еталонний потенціал  $U_0$  подається на вхід другої шини 3, яка з'єднана з входом лінійки взірцевих резисторів 4, на виходах яких формуються квантовані значення взірцевого потенціалу, які у компараторах 2 порівнюються з потенціалом  $U(x)$  першої вхідної шини. При цьому на прямих виходах компараторів формується прямий паралельний унітарний код Хаара, а на інверсних виходах компараторів формується зворотній паралельний унітарний код Хаара, який відповідає виміряному цифровому значенню вхідного потенціалу  $U(x)$ , а на виходах перших логічних елементів "І-НЕ" відповідно формується зворотній паралельний код Хаара, який поступає на відповідні входи других логічних елементів "І-НЕ", на виходах яких формується прямий паралельний код Хаара-Крестенсона системи залишкових класів.

2. Багаторозрядний комбінаційний суматор пірамідального типу з парафазними інформаційними зв'язками

Двійкові  $n$ -розрядні коди подаються на відповідні входи  $(a_0b_0, a_1b_1, a_2b_2, \dots, a_{n-1}b_{n-1})$  вхідної шини 1. Парафазні виходи вхідної шини 1 з'єднані з відповідними входами однорозрядних неповних суматорів 2.1, 2.2 та 2.3 комбінаційної структури 2. Прямі виходи суми всіх однорозрядних суматорів 2.2 та 2.4 з'єднані з відповідними входами  $(S_0, S_1, S_2, \dots, S_{n-1})$  вихідної шини 3. Інверсні виходи переносів всіх суматорів (2.3 та 2.4) комбінаційної структури 2 з'єднані між собою та входом інвертора 2.5, вихід якого є  $S_n$ -им виходом вихідної шини комбінаційного суматора.

При поступленні на вхідну шину 1  $n$ -розрядних кодів двійкових чисел  $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1})$  та  $(b_0, b_1, b_2, \dots, b_{n-1})$  на її виходах формуються однорозрядні двійкові коди  $(\overline{a_0a_0}, \overline{a_1a_1}, \overline{a_2a_2}, \dots, \overline{a_{n-1}a_{n-1}})$  та  $(\overline{b_0b_0}, \overline{b_1b_1}, \overline{b_2b_2}, \dots, \overline{b_{n-1}b_{n-1}})$ , які поступають на відповідні однорозрядні входи комбінаційної структури 2.

При цьому на виходах лінійки однорозрядних суматорів (2.2, 2.4) формується  $n$ -розрядний двійковий код суми вхідних кодів, який поступає на входи  $(S_0, S_1, S_2, \dots, S_{n-1})$  вихідної шини 3, а на виходах інверсних переносів суматорів (2.3, 2.4) формується інверсний сигнал переносу, який поступає на вхід логічного елемента НЕ (2.5) на виході якого формується старший біт суми  $S_n$ , що поступає на вихідну шину 3.

3. Багаторозрядний комбінаційний суматор пірамідального типу з однофазними інформаційними зв'язками

Двійкові  $n$ -розрядні коди подаються на відповідні входи  $(a_0b_0, a_1b_1, a_2b_2, \dots, a_{n-1}b_{n-1})$  вхідної шини 1. Виходи вхідної шини 1 з'єднані з відповідними входами однорозрядних неповних суматорів 2.1, 2.2 комбінаційної структури 2. Прямі виходи суми всіх однорозрядних суматорів 2.1 та 2.2 з'єднані з відповідними входами  $(S_0, S_1, S_2, \dots, S_{n-1})$  вихідної шини 3. Інверсні виходи переносів всіх суматорів (2.2) комбінаційної структури 2 з'єднані між собою та входом інвертора 2.3, вихід якого є  $S_n$ -им виходом вихідної шини комбінаційного суматора.

При поступленні на вхідну шину 1  $n$ -розрядних кодів двійкових чисел  $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1})$  та  $(b_0, b_1, b_2, \dots, b_{n-1})$  на її виходах формуються двійкові коди, які поступають на відповідні входи комбінаційної структури 2.

При цьому на виходах лінійки однорозрядних суматорів (2.1, 2.2) формується  $n$ -розрядний двійковий код суми вхідних кодів, який поступає на входи  $(S_0, S_1, S_2, \dots, S_{n-1})$  вихідної шини 3, а на виходах інверсних переносів суматорів (2.2) старшого розряду комбінаційної структури 2 формується інверсний сигнал переносу, який поступає на вхід логічного елемента "НЕ" (2.3), на виході якого формується старший біт суми  $S_n$ , що поступає на вихідну шину 3.

#### 4. Багаторозрядний суматор з прискореним переносом

Суматор з прискореним переносом працює наступним чином: вхідні  $n$ -розрядні двійкові коди  $(a_0b_0, a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3); (a_4b_4, a_5b_5, a_6b_6, a_7b_7); \dots \dots (a_{n-4}b_{n-4}, a_{n-3}b_{n-3}, a_{n-2}b_{n-2}, a_{n-1}b_{n-1})$  вхідної  $2n$ -розрядної шини 1 одночасно поступають на відповідні інформаційні входи всіх  $m$ -розрядних суматорів 2 з нульовими входами переносу. Виходи переносу першого  $m$ -розрядного суматора поступають на відповідні прямі та інверсні керуючі входи мультиплексора 4 (рис.6.23) [1], парафазні виходи якого поступають на відповідні парафазні входи наступного мультиплексора 4. Утворені вихідні коди кожного, починаючи з другого  $m$ -розрядного суматора 2, одночасно поступають на відповідні інформаційні входи відповідних мультиплексорів 4 та інформаційні входи відповідних інкрементних суматорів 3 (рис.6.24), сигнали інформаційних виходів яких поступають на відповідні  $m$ -розрядні інформаційні входи мультиплексорів 4. У результаті виконується операція додавання двох  $n$ -розрядних двійкових чисел з затримкою сигналів на 5 мікротактів у кожній парі послідовно з'єднаних  $m$ -розрядних суматорів 2 з нульовим входом переносу на основі пірамідальної структури, поданої на (рис.6.18) з реалізацією компонентів на основі однорозрядних неповних суматорів (рис.Н.4) та суматорів 3 з входом логічної одиниці на основі інкрементного суматора зі структурою поданою на (рис. 6.24) [1].

## 5. Пристрій визначення Хеммінгової віддалі у кодах базису Радемахера

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, логічних елементів "І" 9 та другий вхід 20 накопичувального суматора 17. Вхідні аналогові сигнали  $x(t)$   $y(t)$  поступають на входи пристрою 2, 4, які у вигляді потенціалів  $U_y$  та  $U_x$  поступають на перші входи відповідних компараторів 3, 5, 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 3 та 5 формуються відповідні паралельні унітарні коди вхідних потенціалів  $U_y$  та  $U_x$ , які поступають на входи відповідних логічних елементів "АБО" 8 та "І" 9. Логічні елементи "АБО" 8 формують паралельні унітарні коди більшого з двох цифрових значень  $x_i$  або  $y_i$ , а на виходах логічних елементів І 9 формуються паралельні 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  $\bar{x}_i$  та  $y_i$  поступають на входи багаторозрядного двійкового суматора 15 з парафазними входами та наскрізними переносами (рис.Н.9) [2], 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.

## 6. Перемножувач унітарних кодів у базисі Хаара-Кресстенсона

Перед початком кожного циклу множення всі Д-тригери модульних лічильників пристрою, окремою мікрокомандою скидаються в "0", крім нульового тригера, який встановлюється в стан "1" (на структурній схемі не показано). При синхронному поступанні кожної пари імпульсів унітарних кодів чисел, що перемножуються, на вхідні шини (1, 3) у модульних лічильниках першої (2) і другої (4) групи накопичуються коди залишків системи залишкових класів базису Хаара-Кресстенсона, які одночасно поступають на входи відповідних модульних матричних перемножувачів (5), на виходах яких формуються добутки у вигляді кодів Хаара-Кресстенсона, згідно виразу

$(a_i \cdot b_i) \bmod P_i = d_i; i \in \overline{1, k}$ , де  $a_i$  та  $b_i$  поточні залишки чисел  $X$  та  $Y$  згідно виразів  $a_i = \text{res } X(\bmod P_i); b_i = \text{res } Y(\bmod P_i)$ .

Після закінчення циклу перемноження на виході матричних модульних перемножувачів (5) формується код добутку  $d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_k$  у системі числення залишкових класів базису Крестенсона, який шифратором (6) перетворюється у двійковий код базису Радемахера.

Принцип роботи пристрою полягає у тому, що в числоімпульсному множилному пристрої унітарні коди паралельно записуються у модульні лічильники системи залишкових класів теоретико-числового базису Хаара-Крестенсона, паралельно перемножуються у матричних модульних перемножувачах, а результати дешифруються з системи залишкових класів в двійкову систему числення. При цьому, як показано на рис.М.1 модульний лічильник базису Хаара-Крестенсона реалізується на основі регістра зсуву на Д-тригерах зі зворотнім зв'язком  $T_{P-1} - T_0$ .

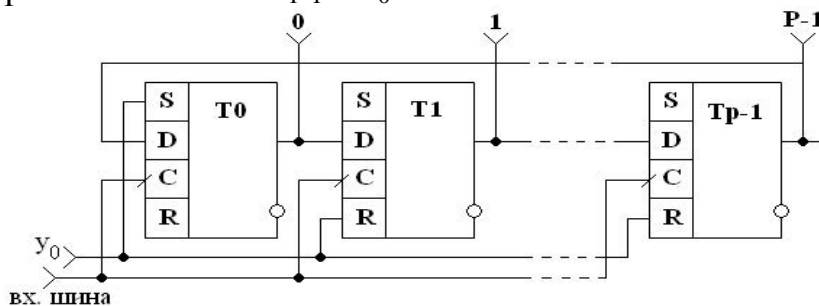


Рис.М.1 - структурна схема модульного лічильника

На початку циклу перемноження мікрокомандою  $y_0$  всі Д-тригери  $T_1 - T_{P-1}$  по R-входах встановлені в стан "0", а тригер  $T_0$  по S-входу в стан "1". У процесі поступання імпульсів унітарного коду на входну шину, яка з'єднана з C-входами синхронізації всіх Д-тригерів на прямих виходах тригерів формуються модульні коди залишків  $a_j, b_j$  Хаара-Крестенсона з розрядністю  $P_i$ . Таким чином у процесі поступання вхідних імпульсів унітарного коду на модульні лічильники на їх виходах з часовою затримкою  $2\nu$ , де  $\nu$  - тактова частота переключення логічних елементів кристала на якому реалізується пристрій.

Структура модульного матричного перемножувача, на входи якого поступають коди Хаара-Крестенсона з першої і другої груп модульних лічильників забезпечує виконання операції модульного множення також за інтервал часу  $2\nu$  згідно таблиці та структури показаної на рис.6.28 для  $P=7$ .

$P=7$

$a_i \backslash b_i$	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5	6
2	0	2	4	6	1	3	5
3	0	3	6	2	5	1	4
4	0	4	1	5	2	6	3
5	0	5	3	1	6	4	2
6	0	6	5	4	3	2	1

Приклад реалізації модульного матричного перемножувача для  $P=7$ , показаний на рис.6.28, швидкодія якого визначається двома послідовно включеними логічними інвенторами, що складає  $2v$ .

#### 7. Швидкодіючий різницево-модульний квадратор у кодах Хаара-Крестенсона

Вхідні аналогові сигнали  $x(t)$  та  $y(t)$  поступають на входи АЦП паралельного типу (1), на виходах яких формуються цифрові дані  $x_i$  та  $y_i$  у вигляді паралельних кодів Хаара-Крестенсона у системі взаємно простих модулів ( $P_1...P_k$ ). На початку циклу роботи пристрою на першій вхідній шині (2) формується сигнал синхронізації, по фронту наростання якого у відповідні модульні регістри (3) записуються коди Хаара-Крестенсона вхідних чисел  $x_i$ ,  $y_i$ . При цьому, на перші та другі входи різницево-модульних матриць (4) 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 (5), на виходах яких формуються коди модульних квадратів, які поступають на вихідну шину пристрою (6).

Часова складність, яка визначає швидкодію запропонованого пристрою розраховується згідно виразу  $\tau_2 = \tau_{АЦП} + \tau_T + \tau_M + \tau_K$ , де  $\tau_{АЦП} = 4v$  - затримка сигналів АЦП;  $\tau_D = 2v$  - затримка сигналів на 2 мікротакти при переключенні D-тригерів регістрів (3);  $\tau_I = 1v$  - затримка сигналів на 1 мікротакт у різницево-модульних матрицях (4);  $\tau_K = 1v$  - затримка сигналів на 1 мікротакт у модульних квадраторах (5).

Отже, загальна затримка сигналів у розробленому спецпроцесорі визначення квадратів модульних різниць між двома вхідними аналоговими сигналами, незалежно від розрядності вхідних чисел, складає:  $\tau_2 = 4 + 2 + 1 + 1 = 8v$ . Тобто при тактовій частоті роботи вентилів ПЛІС 500 МГц формування вихідних кодів різницевих квадратів буде здійснюватися з частотою 125 МГц, що в порівнянні з відомим пристроєм [3], при кодуванні вхідних чисел в діапазонах 8, 10, 12, 16, 24 підвищення швидкодії відповідно складає 10,7, 13,25, 15,75, 20,75, 28,75 разів.

#### 8. Матричний перемножувач

При подачі на синхронізуючий вхід (3) першого регістра пам'яті (2) вхідні коди (X і Y) перемножуваних чисел записуються у D-тригери, на прямих виходах першого регістра пам'яті (2) формуються прямі коди перемножуваних чисел, які поступають на відповідні прямі входи матриці однорозрядних суматорів (4), на однофазних виходах якої формується код добутку вхідних двійкових чисел, який по сигналу синхронізації третього входу пристрою (6) записується у другий регістр пам'яті (5), на парафазних виходах якого формується вихідний код добутку двох двійкових чисел.

## 9. Поточковий перемножувач

В поточковому перемножувачі багаторозрядних двійкових чисел регістр R1 виконує операцію перетворення  $n$ -розрядних біт-орієнтованих кодів множників  $x$  та  $y$  у паралельний  $2n$ -розрядний двійковий код. Часова складність  $T_{\text{тр}}=2$  мікротакти, тобто занесення кодів  $(x, y)$  в регістр R1 здійснюється за  $4n$  мікротактів. Регістр пам'яті R2 призначений для запису та зберігання кодів множників на часовий інтервал занесення вхідних кодів  $(x, y)$  у регістр зсуву R1. Матриця однорозрядних суматорів виконує операцію перемноження кодів  $(x, y)$ , на виході якої формується  $2n$ -розрядний вихідний код добутку на інтервалі часу  $(k_1 \times n) + (k_1 \times n)$ , де  $k_1$  – затримка сигналів формування наскрізних переносів; а  $k_2$  – відповідно затримка сигналів на виходах сум. Регістр R3 виконує операції запису коду добутку та його зсув на вихід пристрою на інтервалі  $2n$  мікротактів. Логічний елемент “Виключаюче АБО” реалізує операції тестування безпомилковості роботи перемножувача чи шифрування вихідних даних псевдовипадковим кодом. З метою контролю надійності роботи перемножувача на початку певного числа циклів здійснюється тестування правильності його роботи шляхом порівняння добутку заданих перемножувачів  $(x, y)$  з тестовим кодом добутку, який поступає на вхід 9 перемножувача. При цьому на виході 10 логічного елемента “Виключаюче АБО” формується  $2n$ -розрядний потік нулів, що означає про безпомилковість виконання операції множення. На початку кожного циклу перемноження сигналом входу 4 здійснюється запис прямих кодів регістра R1 у регістр R2 та прямих кодів добутків у регістр R3. У наступному циклі роботи перемножувача сигналами синхронізації Sx входу 3 тактується занесенням біт-орієнтованих кодів множників  $x$  та  $y$  в регістр R1. Одночасно цими сигналами тактується зчитування біт-орієнтованих кодів добутків на виході 10 пристрою. Одночасно з виконанням операцій вводу та виводу даних у матричній структурі суматорів MC здійснюється перемноження двійкових кодів  $x$  та  $y$  за  $(n+2n)$  мікротактів. Регістри зсуву побудовані на основі D-тригерів.

## 10. Процесор обчислення ймовірнісної ентропії

На початку кожного циклу визначення ентропії сигналом другого виходу синхронізатора (4) всі лічильники (3) скидаються у нульовий стан, а сигнали першого виходу синхронізатора (4) на інтервалі вибірки об'єму випадкових подій  $n$  тактують роботу логічних елементів "I-HE" (1.3).

На інтервалі циклу роботи пристрою у кожному лічильнику (3) накопичується відповідне число імпульсів  $N_i$ , коди яких подаються на входи відповідних шифраторів (5), на виходах яких таблично формуються коди добутків  $\frac{N_i}{n} \cdot \log_2 \left( \frac{N_i}{n} \right)$ , які поступають на відповідні входи багаторозрядного пірамідального суматора (6), з виходу (7) якого на початку



кожного циклу роботи пристрою сигналом другого виходу синхронізатора (4) зчитуються коди визначеної ентропії  $I_x$ .

Список джерел, використаних у додатку М.

1. Пат.117572 Україна МПК G06F 7/38 (2006.01) Суматор з прискореним переносом / Круліковський Б.Б., Возна Н.Я, Грига В.М., Николайчук Я.М., Давлетова А.Я. №u201701336; заявл.13.02.2017; опубл.26.06.2017, Бюл. №12/2017.

2. Пат.109142 Україна МПК G06F 7/00 (2016.01) Однорозрядний суматор / Давлетова А.Я., Круліковський Б.Б., Возна Н.Я., Николайчук Я.М. №u201602165; заявл.04.03.2016; опубл.10.08.2016, Бюл. №15/2016.

3. Пат.127093 Україна МПК G06F 7/00 (2018.01) Пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами / Сидор А.І., Круліковський Б.Б., Возна Н.Я., Николайчук Я.М. № u 2018 02782 заявл.19.03.2018; опубл.10.07.2018, Бюл. №13/2018.

## ДОДАТОК Н

Реалізація удосконалених структур швидкодіючих однорозрядних та багаторозрядних суматорів

На рис.Н.1 показані входи/виходи та позначення однорозрядних напівсуматорів (а) та повних суматорів (б) паралельного типу [1-4].

У загальному випадку функціональна структура однорозрядного напівсуматора та повного суматора паралельної дії у базисі Радемахера представлена на рис.Н.1.

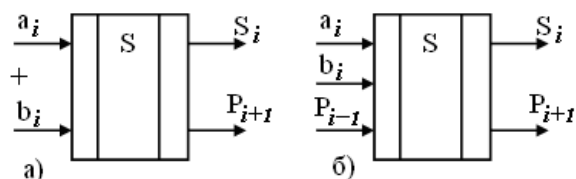


Рис.Н.1 - Вхідні та вихідні логічні сигнали напівсуматора (а) та повного суматора (б) базису Радемахера:

$a_i, b_i$  – відповідно біти  $i$ -го розряду;

$S_i$  – результат сумування в  $i$ -му розряді;

$P_{i-1}, P_{i+1}$  – відповідно переноси бітів з  $(i-1)$ -го розряду та  $i+1$ -й розряд.

Критерії оцінок складності структури однорозрядних двійкових суматорів розроблені в роботах [5-7] включають наступні системні характеристики:

$$A = \sum_{j=1}^m V_j; \quad \tau = \sum_{j=1}^m \tau_j; \quad k_c = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i, \quad \text{де } A, \tau, k_c - \text{відповідно апаратна, часова та}$$

структурна складність, а  $\alpha_i, P_i$  - параметри атрибутів структурної складності (табл.2.1, 2.2).

Аналіз структурної складності існуючих однорозрядних суматорів [8] дозволяє константувати їх певну надлишковість, яка обумовлена застосуванням традиційного критерію мінімізації кількості логічних елементів або застосування однотипних елементів, наприклад "І-НЕ", що привело до ускладнення структурних рішень (збільшення апаратної складності в 2-3 рази, а часової – у 2-5 разів) однорозрядних суматорів та значного зменшення їх швидкодії. Проведений аналіз структурної складності свідчить, що структурна складність повних однорозрядних суматорів перевищує відповідну оцінку неповних суматорів у 2-3 рази. Серед структур неповних суматорів, найбільшою структурною складністю характеризуються суматори, які реалізовані на основі логічних елементів "І-АБО-НЕ", а повні однорозрядні суматори – відповідно реалізовані на основі однотипних логічних елементів "І-НЕ". При цьому затримка сигналів у повних однорозрядних суматорах може складати 5-6 мікротактів.

Крім того, відомі структурні рішення однорозрядних суматорів не характеризуються функціональною повнотою входів та виходів. Тобто не містять входів керування, всіх прямих та інверсних входи-виходів

$(a_i, \overline{a_i}; b_i, \overline{b_i}; P_+, \overline{P_+}; S_i, \overline{S_i}; P_{++}, \overline{P_{++}})$ , де  $a_i, \overline{a_i}; b_i, \overline{b_i}$  - вхідні прямі та інверсні інформаційні сигнали;  $P_+, \overline{P_+}$  - прямі та інверсні вхідні сигнали наскрізного переносу з молодшого розряду,  $S_i, \overline{S_i}$  - прямі та інверсні виходи суми;  $P_{++}, \overline{P_{++}}$  - прямі та інверсні виходи наскрізного переносу у старший розряд. Очевидно, що досягнення функціональної повноти відомих структур однорозрядних суматорів приведе до погіршення системних характеристик апаратної, часової та структурної складності.

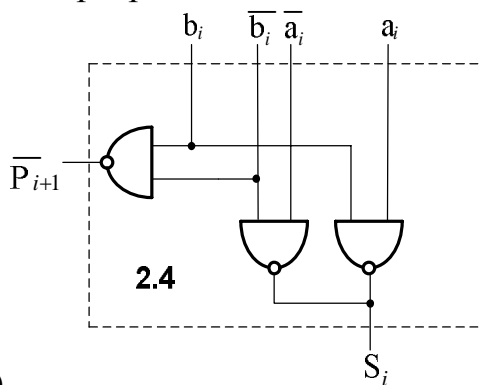
Таким чином, проведені дослідження є основою для вдосконалення структурних рішень однорозрядних суматорів з метою забезпечення максимальної функціональної, мінімальної структурної, часової та апаратної складності згідно системи критеріїв:

$$\begin{cases} F \Rightarrow \max; \\ k_c \Rightarrow \min; \\ A \Rightarrow \min; \\ \tau \Rightarrow \min. \end{cases}$$

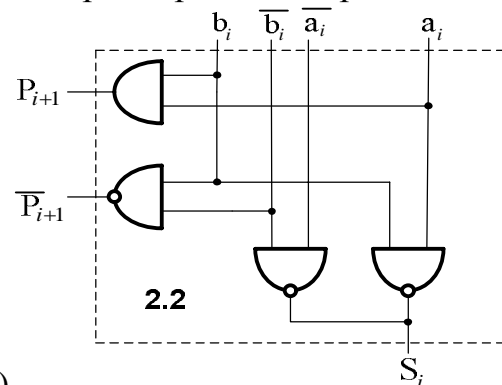
Граничною оцінкою мінімуму часової складності, яка забезпечує максимальну швидкодію однорозрядних суматорів є одночасне формування прямих та інверсних вихідних сигналів  $(S_i, \overline{S_i}; P_{++}, \overline{P_{++}})$  суми та переносу з мінімальною часовою затримкою сигналів 1 мікротакт, що визначає актуальність вирішення такої прикладної задачі для синтезу та удосконалення структур складних пристроїв та спецпроцесорів обчислювальної техніки.

Н.1. Удосконалені структури однорозрядних неповних суматорів на основі логічного елемента "Виключаюче І"

На рис.Н.2 [9] (Патент 116601) показані структури неповних однорозрядних суматорів, запропонованих у якості компонентів багаторозрядних комбінаційних суматорів з прискореними переносами [9].



a)  $A = 3v, k_c = 150,8, k_{cl} = 7,2, F = 9,$   
 $k_e = 1,25$

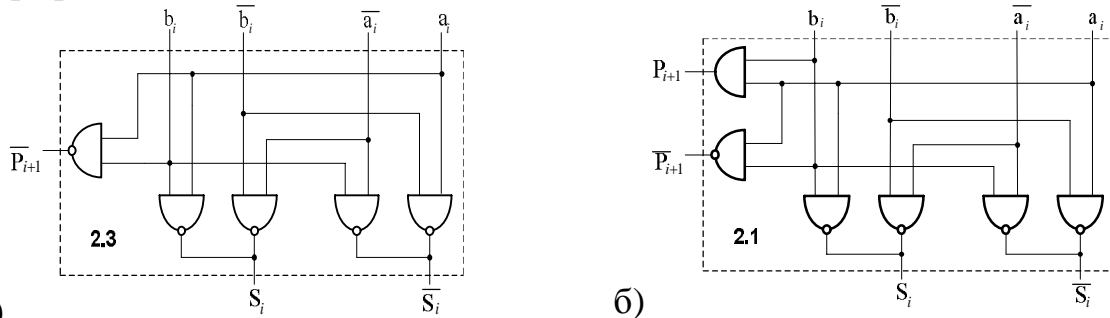


б)  $A = 4v, k_c = 194,4, k_{cl} = 7,6, F = 10,$   
 $k_e = 1,3$

Рис.Н.2 - Структури однорозрядних неповних суматорів з однорозрядними входами та виходами – компонентів пірамідальної структури комбінаційного суматора: а) з парафазними входами прямим виходом суми та інверсним

виходом переносу; б) з прямим виходом суми та прямим і інверсним виходом переносу.

На рис.Н.3 показані структури однорозрядних неповних суматорів з парафазними входами та виходами.



а)

$$A = 5v, k_c = 228,4, k_{cl} = 7,8, F = 11, k_e = 1,4$$

б)

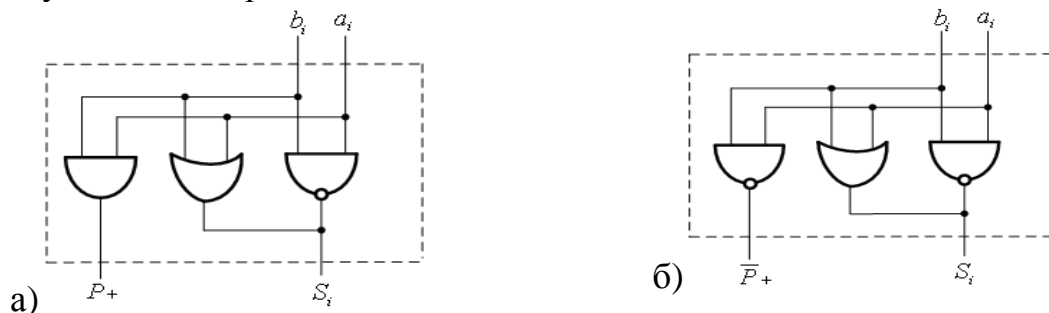
$$A = 6v, k_c = 261, k_{cl} = 8,03, F = 12, k_e = 1,5$$

Рис.Н.3 – Однорозрядні неповні суматори з парафазними входами та виходами: а) однорозрядний неповний швидкодіючий суматор з парафазними входами, парафазним виходом суми та однофазним виходом переносу; б) однорозрядний повнофункціональний неповний суматор з парафазними входами та виходами.

Розроблені та досліджені структури неповних однорозрядних суматорів характеризуються гранично максимальною швидкодією із затримкою сигналів 1 мікротакт.

Такі швидкодіючі неповні однорозрядні суматори, з гранично мінімальними системними характеристиками структурної, апаратної та часової складності з різними характеристиками функціональної повноти, є компонентами структури, запропонованого автором, багаторозрядного швидкодіючого комбінаційного суматора з пірамідальною структурою (Патент 116601) [9].

В роботі [10] запропоновано компоненти однорозрядних неповних суматорів (рис.Н.4) з прямими (а) та інверсними (б) виходами переносу, в яких застосована реалізація логічного елемента "Виключаюче І" шляхом об'єднання інверсного виходу логічного елемента "І-НЕ" з прямим виходом логічного елемента "АБО", запропонованого в [11].



а)

$$k_c = 115,2, k_{cl} = 6,8$$

б)

$$k_c = 120,4, k_{cl} = 6,9$$

Рис.Н.4 - Спрощені структури однорозрядних неповних суматорів на логічних елементах "Виключаюче І".

Досліджені структури однорозрядних неповних суматорів на логічних елементах "Виключаюче І" з гранично мінімальною структурною складністю реалізовані у структурах, запропонованих автором, повного однорозрядного суматора (Патент 124563) [12] з інверсними переносами, пірамідального комбінаційного суматора (Патент 115751, фіг.2) [10] та суматора з прискореним переносом (Патент 17572) [13].

У порівнянні з відомими структурами однорозрядних неповних суматорів з прямими входами та виходами оцінка ефективності їх структур складає:

$$k_{el a} = \frac{F}{k_c} = \frac{4}{6,8} = 0,59; \quad k_{el \acute{a}} = \frac{F}{k_c} = \frac{5}{6,9} = 0,72.$$

Реалізація структури однорозрядного неповного суматора на основі застосування логічного елемента "Виключаюче І" дозволило зменшити його структурну складність у порівнянні з відомими структурами у 2-7 разів [8].

Застосування запропонованої структури неповного однорозрядного двійкового суматора (рис.Н.4б) з виходом суми на основі логічного елемента "Виключаюче І" та формуванням інверсного сигналу переносу  $\bar{P}$  дозволило його ефективно використати у структурі багаторозрядних двійкових суматорів на основі однорозрядних повних суматорів з інверсними переносами (Патент 124563) [12], що забезпечило формування наскрізних переносів з гранично мінімальною затримкою сигналу 1 мікротакт.

Застосування логічного елемента "Виключаюче АБО" на основі парафазних входів та монтажного об'єднання вихідних інверсних виходів логічних елементів "І-НЕ" (рис.6.2б) дозволяє спростити структуру однорозрядного неповного суматора, який є компонентом структури однорозрядного неповного двійкового суматора з парафазними входами та виходами (рис.Н.3б) [9]. Такий суматор містить 5 логічних елементів "І-НЕ" та один елемент "І" і виконує операцію додавання за один мікротакт.

На діаграмах (рис.Н.5-Н.7) показані порівняльні оцінки структурної, функціональної та відносної функціонально-структурної складностей удосконалених схемотехнічних реалізацій неповних однорозрядних суматорів.

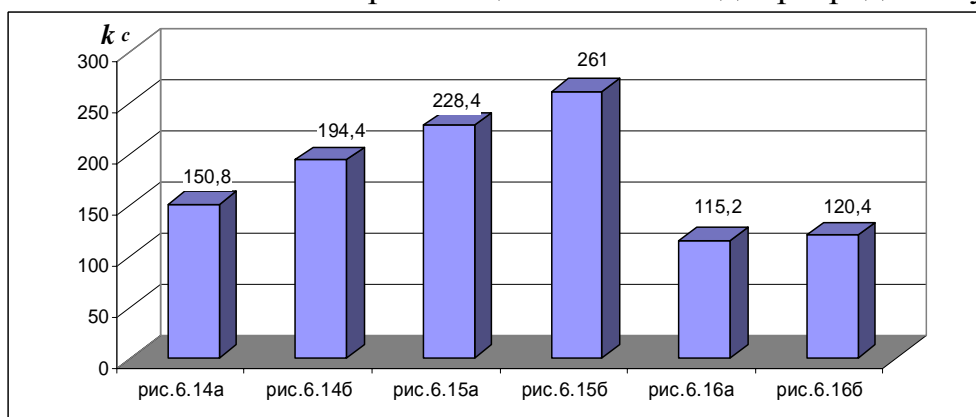


Рис.Н.5 - Оцінка структурної складності удосконалених неповних однорозрядних суматорів

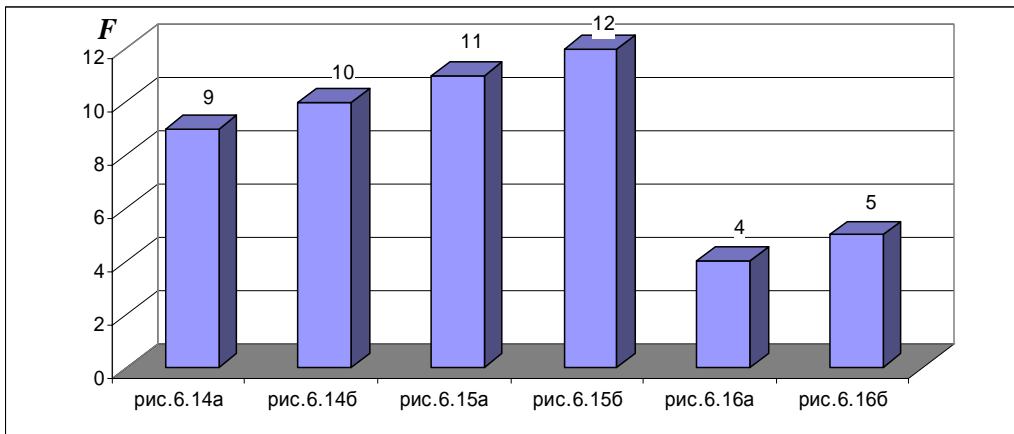


Рис.Н.6 - Оцінка функціональної складності удосконалених неповних однорозрядних суматорів.

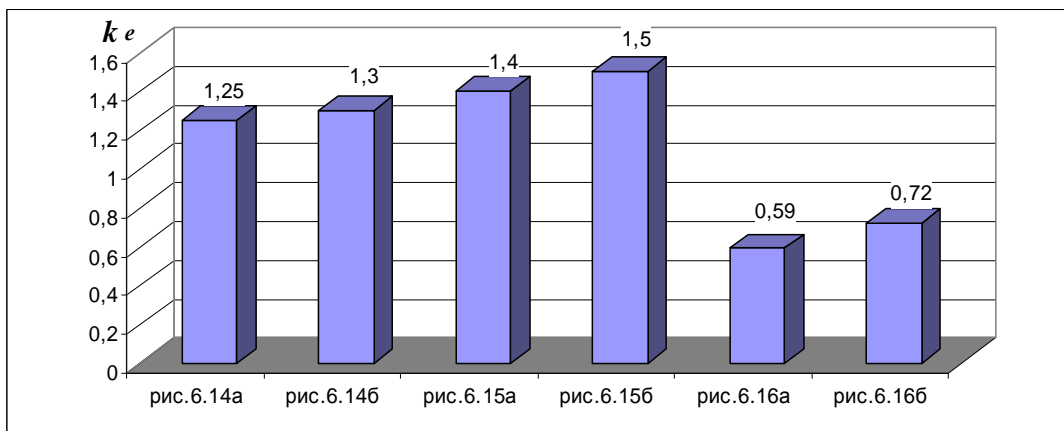


Рис.Н.7 - Оцінка функціонально-структурної складності удосконалених неповних однорозрядних суматорів.

Н.2. Методи удосконалення структурної та функціональної складності однорозрядних повних комутованих двійкових суматорів.

Базові структури неповнофункціональних однорозрядних суматорів в яких використовуються вхідні парафазні сигнали розроблені Карцевим М.А. [1].

Відсутність повного набору прямих та інверсних бітів на входах та виходах відомих однорозрядних суматорів суттєво обмежує його функціональні можливості та їх застосування у якості структурного компонента більш складних обчислювальних пристроїв, а також у принципі не дозволяє максимально підвищити його швидкодію до рівня одного мікротакту переключення одного логічного елемента у структурі однорозрядного суматора.

На рис.Н.8 [14] (Патент 109142) показано функціональне позначення запропонованого однорозрядного суматора:  $a$ ,  $b$ ,  $P$  - відповідно третій, перший та другий інформаційні входи однорозрядного суматора;  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{P}$  - відповідно четвертий, п'ятий та шостий інверсні інформаційні входи однорозрядного суматора;  $P$ ,  $S$  - відповідно перший та другий виходи переносу та суми однорозрядного суматора;  $\bar{P}+$ ,  $\bar{S}$  - відповідно третій та

четвертий інверсний вихід переносу та суми однорозрядного суматора;  $Y$  - вхід блокування результату однорозрядного суматора.

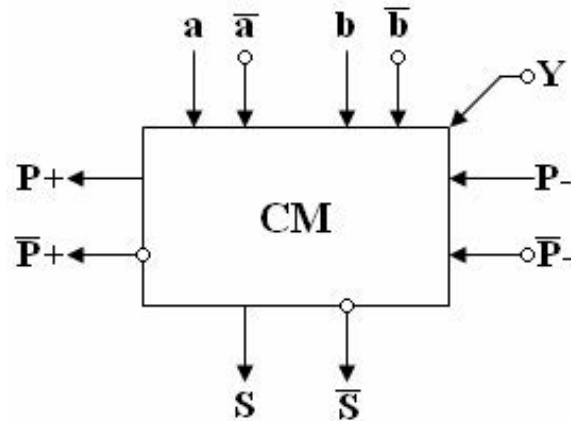


Рис.Н.8 - Функціональна схема повного суматора з керуючим входом.

В роботі [14] (Патент 109142) запропонована структура повного повнофункціонального однорозрядного суматора (рис.Н.9) [14], шляхом введення інверсних входів та виходів та логічних елементів "І-НЕ", мультиплексно-з'єднаних виходами між собою, що дозволяє забезпечити можливість збереження високої швидкодії при його застосуванні у якості компонента структурно складніших багаторозрядних матричних та багатокаскадних засобів обчислювальної техніки, в яких передбачені операції додавання двійкових чисел теоретико-числового базису Радемахера.

Такий суматор містить: 1, 2, 3 – прямі інформаційні входи; 4, 5, 6 – інверсні інформаційні входи; 7 – вхід блокування результату однорозрядного суматора; 8 – група логічних елементів "І-НЕ"; 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 – відповідно перша, друга, третя та четверта підгрупи логічних елементів "І-НЕ"; 9.1, 9.2 – перший та другий логічні повторювачі з інверсними виходами (реалізовані на основі двох послідовно з'єднаних логічних елементів "НЕ"); 10, 11 – прямий та інверсний виходи переносу, 12, 13 – прямий та інверсний виходи суми однорозрядного суматора.

У результаті запропонованої структури створено швидкодіючий однорозрядний суматор з розширеними функціональними можливостями у якості компонента багаторозрядних та багатокаскадних засобів обчислювальної техніки з часовою складністю  $\tau = 1\nu$  де  $\nu$  - тривалість переключення одного логічного вентиля, реалізованого згідно відповідної мікроелектронної технології на спеціалізованих кристалах або ПЛІС, що у 2-5 разів перевищує швидкодію відомих повно функціональних по входах і виходах однорозрядних суматорів на логічних елементах "І", "АБО", "НЕ".

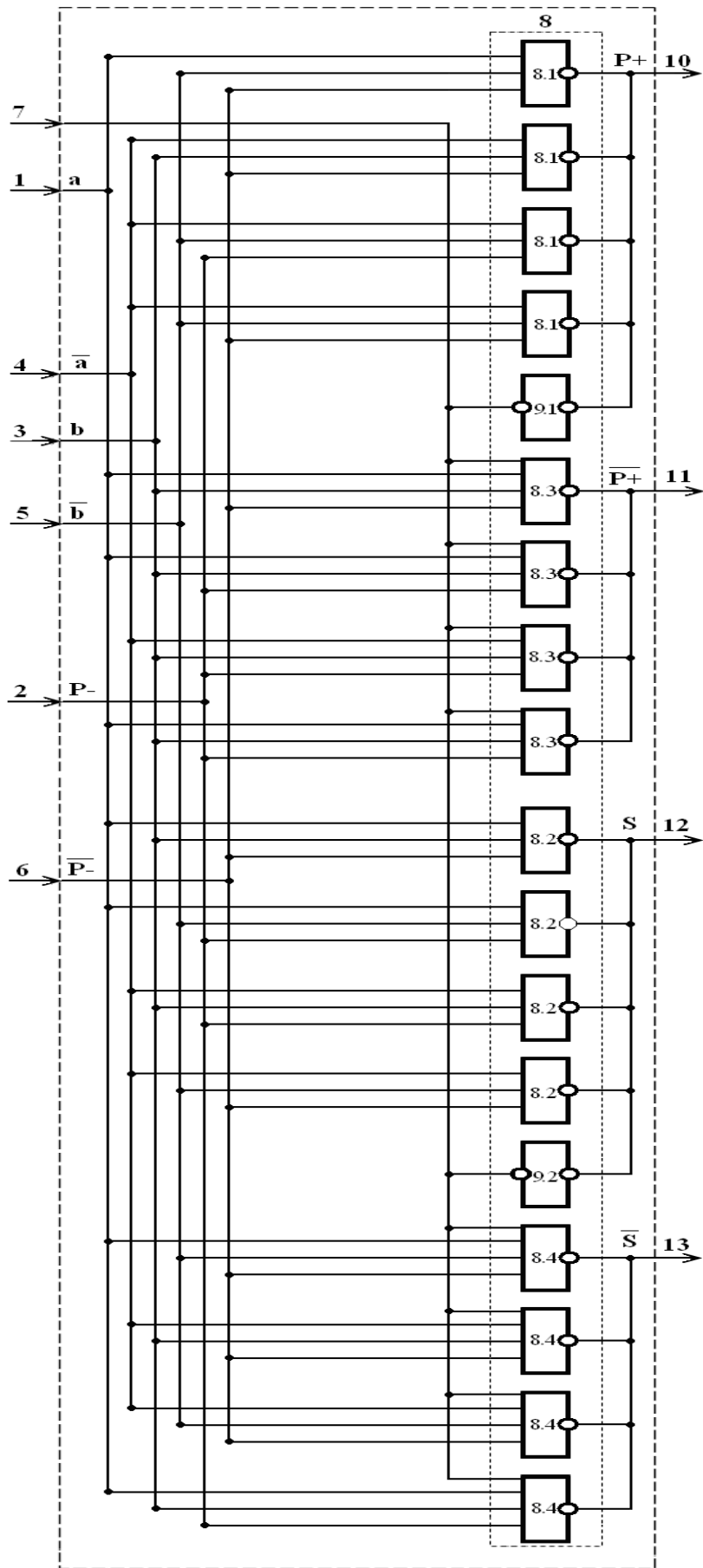


Рис.Н.9 - Структурна схема швидкодіючого однорозрядного повного суматора на логічних елементах "I-HE".



В роботі [15] (Патент 109136) запропоновано структурно удосконалений однорозрядний повнофункціональний суматор, функціональна схема якого показана на рис.Н.10.

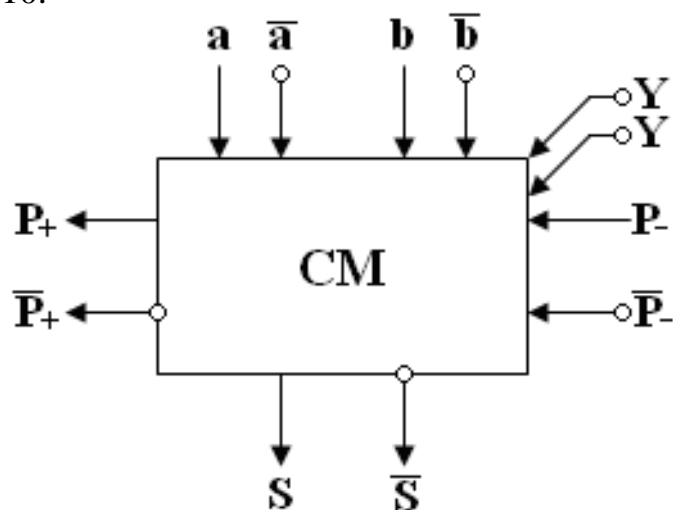


Рис.Н.10 - Функціональна схема повного суматора з двома керуючими входами.

Такий суматор (рис.Н.10) містить:  $a$ ,  $b$ ,  $P_-$  - третій, перший та другий інформаційні входи однорозрядного суматора;  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{P}_-$  - четвертий, п'ятий та шостий інверсні інформаційні входи;  $P$ ,  $S$  - перший та другий виходи переносу та суми;  $\bar{P}_+$ ,  $\bar{S}$  - третій та четвертий інверсні виходи переносу та суми;  $Y$  - входи блокування результату.

Підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей такого однорозрядного суматора досягнуто шляхом введення чотирьох груп мультиплексно-з'єднаних виходами логічних елементів "І-НЕ" та повноти прямих та інверсних вхідно-виходів, що дозволяє забезпечити принципову можливість збереження високої швидкодії при його застосуванні у якості структурного базового компонента функціонально складніших багаторозрядних матричних, пірамідальних та багатокаскадних засобів обчислювальної техніки, в яких передбачені операції додавання двійкових чисел теоретико-числового базису Радемахера

В таблиці Н.1 приведені кількісні оцінки функціональної та структурної складності функціональних схем напівсуматорів, повних та неповних суматорів (рис.Н.1, Н.8, Н.10).

Таблиця Н.1 – Оцінки структурних та функціональних характеристик схемотехнічних рішень однорозрядних суматорів.

Схема на рисунок:	Вхід	Вхід кер.	Вихід	$k_c$	$F$
Н.1а	2		2	97	4
Н.1б	3		2	119	5
Н.8	6	1	4	178,2	15
Н.10	6	2	4	197,4	20

На рис.Н.11 [15] (Патент 109136) показана структурна схема удосконаленого швидкодіючого однорозрядного суматора з максимальною швидкодією та розширеними функціональними можливостями, який містить 4 групи логічних елементів "І-НЕ" (17) для формування прямих та інверсних виходів суми та переносів, а також 2 групи логічних елементів блокування вхідних інформаційних потоків (13-16), які застосовуються у структурах матричних перемножувачів.

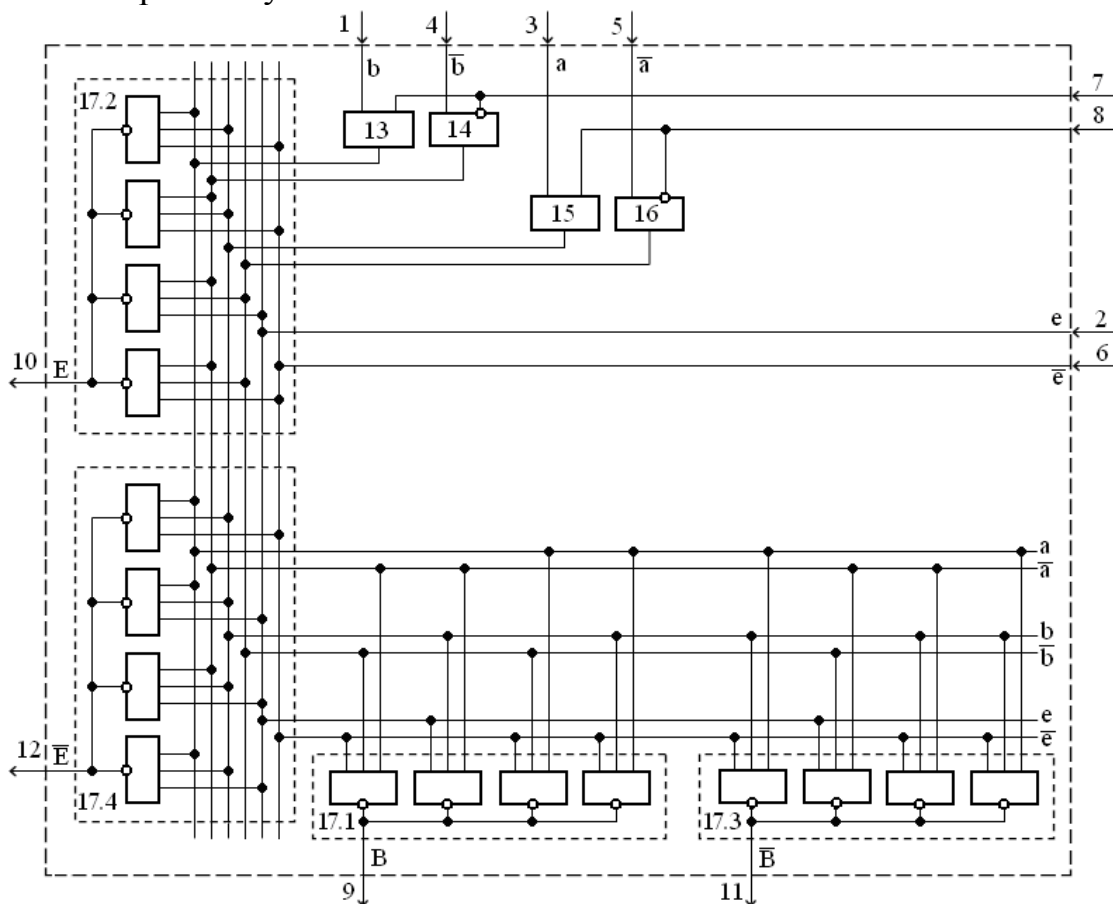


Рис.Н.11 - Структура однорозрядного повного швидкодіючого суматора з розширеними функціональними можливостями.

При вибірковій подачі на вхід 7 блокування результату однорозрядного суматора логічного значення "0" відповідно на виходах першого логічного елемента 13 і формується біт "0", а на виході першого логічного елемента 14 "АБО" формується біт "1", що приводить до блокування першого прямого  $b$  та другого інверсного  $\bar{b}$  інформаційних входів однорозрядного суматора.

При вибірковій подачі на вхід 8 логічного значення "0" відповідно на виході другого логічного елемента 15 і формується біт "0", а на виході другого логічного елемента 16 "АБО" формується біт "1", що приводить до блокування третього прямого  $a$  та інверсного  $\bar{a}$  інформаційних входів однорозрядного суматора.

При одночасній подачі на входи 7 та 8 логічних значень "0" блокуються обидва прямі  $a$ ,  $b$  та інверсні  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  інформаційні входи однорозрядного суматора.

При одночасній подачі на другий прямий  $e$  вхід переносу однорозрядного суматора логічного значення "0", а на 6 інверсний вхід переносу  $\bar{e}$  логічного значення "1" блокуються інформаційні входи переносу і однорозрядний суматор функціонально трансформується у неповний однорозрядний суматор з двома парафазними інформаційними входами  $a, \bar{a}$  та  $b, \bar{b}$ , що розширює можливість застосування такого суматора у якості граничного компонента матричних перемножувачів Брауна та мультиплексорів Бута.

У результаті запропонованого удосконалення структурного рішення однорозрядного суматора створено швидкодіючий однорозрядний суматор з розширеними функціональними можливостями у якості компонента багаторозрядних та багатокаскадних суматорів засобів обчислювальної техніки з часовою складністю  $lv$  де  $v$  - тривалість переключення одного логічного елемента чи вентиля, реалізованого згідно відповідної мікроелектронної технології на спеціалізованих кристалах або ПЛІС, що у 2-5 разів перевищує швидкодію відомих повних однорозрядних суматорів на основі логічних елементів "І", "АБО", "НЕ".

Оскільки кількість структурно та функціонально простих компонентів типу (логічних елементів, тригерів, мультиплексорів, селекторів, шифраторів, дешифраторів та інш.) у складі функціонально та алгоритмічно складних обчислювальних засобів може складати сотні тисяч і десятки мільйонів, розрахунок структурної складності доцільно здійснювати у логарифмічному масштабі згідно виразу (6.1).

Відповідно логарифмічна оцінка структурної складності такого суматора складає:  $k_{cl} = 11$  біт.

В таблиці Н.2 приведені кількісні оцінки структурної та функціональної складності розглянутих повних однорозрядних суматорів (рис. Н.9, Н.11).

Таблиця Н.2 - Оцінки кількісних показників структурної та функціональної складності запропонованих повних однорозрядних суматорів

Структура на рисунках:	Логічні елементи				Вхід	Вхід кер.	Ви вхід	Зв'язки	З'єднання	$k_c$	$F$	$k_e$
	І	АБО	НЕ	І-НЕ								
Н.9			4	16	6	1	4	83	77	1338	15	0,01
Н.11	4			16	6	2	4	90	72	1557	20	0,01

Оцінка структурної та функціональної складності запропонованих повних однорозрядних суматорів (рис.Н.9) та (рис.Н.11) становить:

- рис.Н.9:  $k_c = 1338$ ;  $F = 15$ ;  $k_e = 0,01$ ;
- рис.Н.11:  $k_c = 1557$ ;  $F = 20$   $k_e = 0,01$ .

Н.3. Структурні методи удосконалення однорозрядних повних некомутованих двійкових суматорів.

Структури відомих повних однорозрядних суматорів класифіковані та наведені у роботі [16]. Класична структура такого класу суматорів, які застосовуються у світовій практиці та його системні характеристики, наведені на рис.Н.12 [17]. Такі класичні повні однорозрядні суматори з прямими

однофазними входами та виходами містять 2 послідовно з'єднані логічні елементи "Виключаюче АБО" (1), які складаються з 4-5 логічних елементів "І", "АБО", "НЕ" [18], логічні елементи "І" (2) та "АБО" (3) та мають наступні системні характеристики:  $A = 11\nu$ ,  $\tau_c = 6\nu$ ,  $\tau_{cout} = 2 \vee 5\nu$ ,  $k_c = 449$ ,  $F = 4$ ,  $k_e = 0,009$ .

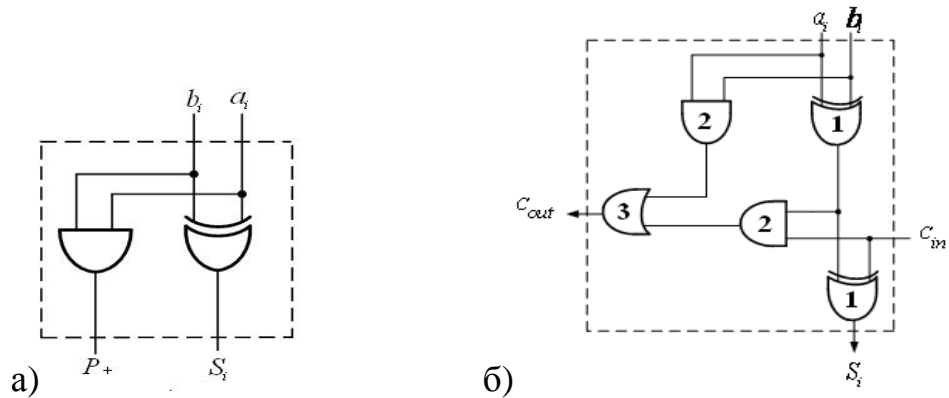


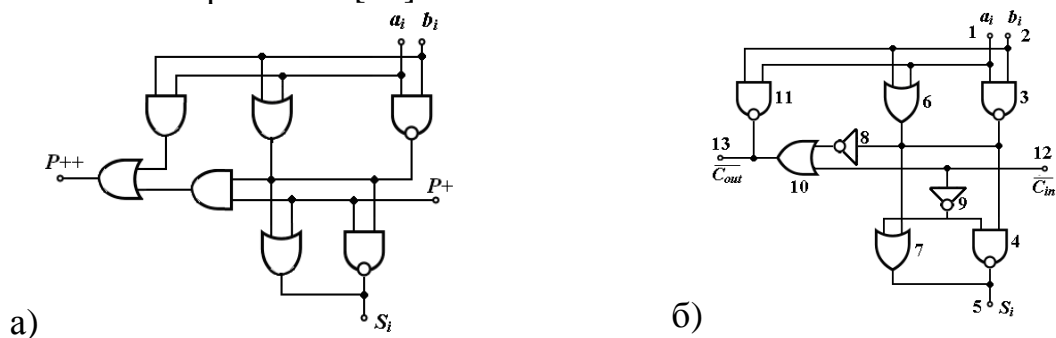
Рис.Н.12 - Класична структура неповного (а) та повного (б) однорозрядного суматора.

Такі однорозрядні повні суматори використовуються у структурах прискорювачів обчислювальних операцій ПК, мікроконтролерів та спецпроцесорів при виконанні операцій множення, додавання, піднесення до квадрату, накопичення сум, сортування масивів даних, а також при виконанні складних алгоритмів обчислень над багаторозрядними двійковими числами у задачах шифрування, томографії, факторизації та інш.

Тому основною вимогою удосконалення їх структурних рішень є досягнення максимально високої граничної швидкодії.

В роботі [12] (Патент 124563) автором запропонована структура однорозрядного повного суматора з однофазними входами та виходами на основі логічних елементів "Виключаюче І".

На основі структур однорозрядних неповних суматорів (рис.Н.4), де застосований логічний елемент "Виключаюче І", реалізована структура повного однорозрядного суматора, функціональні схеми та системні характеристики якого показані на рис.Н.13 [32].



$A = 7\nu$ ,  $\tau_S = 2\nu$ ,  $\tau_{++} = 2\nu$ ,  $k_c = 174,6$ ,  
 $F = 4$ ,  $k_e = 0,02$ .

$A = 8\nu$ ,  $\tau_S = 2\nu$ ,  $\tau_{++} = 1\nu$ ,  
 $k_c = 199,6$ ,  $F = 4$ ,  $k_e = 0,02$ .

Рис.Н.13 - Структури однорозрядного повного суматора з однофазними входами та виходами на основі логічних елементів "Виключаюче І".

Структура такого одно розрядного суматора відрізняється від відомих наявністю інверсних входів  $C_{in}$  та інверсних виходів  $C_{out}$  (рис.Н.13(б)), що забезпечує мінімально можливу затримку сигналів наскрізних переносів на 1 мікротакт, що дозволяє максимально підвищити швидкодію багаторозрядних двійкових суматорів за рахунок затримки сигналів наскрізних переносів на 1 мікротакт. Відповідно підвищується швидкодія спецпроцесорів цифрового опрацювання даних, структури яких містять велику кількість послідовно з'єднаних запропонованих однорозрядних повних суматорів.

Класична реалізація повних однорозрядних двійкових суматорів, зі структурою на рис.Н.12 [3, 4, 7, 8], які містять 2 логічних елементи "Виключаюче АБО", кожен з яких містить 4 логічні елементи (рис.6.1) [18], 2 логічні елементи "І" та один логічний елемент "АБО", в сумі складає 11 логічних елементів.

Оцінка системних характеристик запропонованого повного однорозрядного суматора (рис.Н.13(б)) у порівнянні з іншими суматорами даного класу представлена в табл.Н.3.

Таблиця Н.3 - Системні характеристики повних однорозрядних двійкових суматорів

№ п/п	Тип суматора	Наскрізні переноси	Тип вхід-виходів	Структурна складність	Апаратна складність	Часова складність $\tau_S/\tau_P$
1	Рис.Н.9	парафазні	парафазні	1338	20	1/1
2	Рис.Н.11	парафазні	парафазні	1557	20	1/1
3	Рис.Н.12	прямі	однофазні	449	11	6/2
4	Рис.Н.13а	прямі	однофазні	174,6	7	2/2
5	Рис.Н.13б	інверсні	однофазні	199,6	8	2/1

Порівняння структурної складності запропонованого повного однорозрядного суматора (рис.Н.13б) з відомими суматорами даного класу складає відповідну кількість разів:

- відносно суматора рис.Н.9:  $1338/199,6 = 6,7$ ;
- відносно суматора рис.Н.11:  $1557/199,6 = 7,8$ ;
- відносно суматора рис.Н.12:  $449/199,6 = 2,25$ ;
- відносно суматора рис.Н.13а:  $174,6/199,6 = 0,9$ .

Оцінка структурної та апаратної складності запропонованого повного однорозрядного суматора (рис.Н.13б) складає відповідно 199,6 одиниць та 8 вентилів. Тобто, структурна складність удосконаленого однорозрядного повного суматора у порівнянні з класичною реалізацією такого типу суматорів (рис.Н.12) зменшена у  $449/199,6 = 2,25$  рази, а апаратна складність зменшена у  $11/8 = 1,4$  рази. Оскільки повний однорозрядний суматор у якості обчислювального компонента масово застосовується у структурах АЛП універсальних багаторозрядних процесорів ПК та мікроконтролерів (32-128

розрядів), прискорювачах операції множення ( $32^2 - 128^2$  суматорів), а також великорозрядних процесорах шифрування даних (512-2048 біт) застосування запропонованої структури однорозрядного суматора дозволяє зменшити об'єм структурної складності на 44,5%, а апаратної - на 27%. При цьому відповідно підвищується надійність мікроелектронних компонентів обчислювальних засобів, зменшується тепловиділення, габарити та вартість кристалів.

#### Список джерел, використаних у додатку Н.

1. Kudryavtsev V.B. Structural theory of automata, semigroups, and universal algebra / V.B.Kudryavtsev, I.G.Rosenberg - IOS Press/Springer, 2005. -448 p.
2. Таненбаум Э. Архитектура компьютера 5-е изд./ Э.Таненбаум – СПб.: Питер, 2010. – 844с.
3. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е.П.Угрюмов – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 800 с.
4. Мельник А. О. Архитектура комп'ютера. / А. О.Мельник - Луцьк: Волинська обласна друкарня, 2008. - 470 с.
5. Возна Н.Я. Структуризація поліфункціональних даних: теорія, методи та засоби: Монографія / Н.Я.Возна – Тернопіль: ТНЕУ, 2018. – 378 с.
6. Возна Н.Я. Основи теорії структуризації поліфункціональних елементів складних систем // Н.Я. Возна- Вісник Хмельницького національного університету.- Хмельницький, 2015.- №2 (223) - С.204-208.
7. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем / Навчальний посібник / Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, І.Р. Пітух .-Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф". 2010. — 392 с.
8. Круліковський Б.Б. Теорія та системні характеристики елементарних компонентів та суматорів проблемно-орієнтованих спецпроцесорів / Б.Б. Круліковський, А.Я. Давлетова // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - 2015. - №29. - С.84–95.
9. Пат.116601 Україна МПК G06F 7/501 (2006.01) Комбінаційний суматор / Круліковський Б.Б., Возна Н.Я., Грига В.М., Николайчук Я.М. № а 2017 00814 заявл.30.01.2017; опубл.10.04.2018, Бюл. №7/2018.
10. Пат.115751 Україна МПК G06F 7/501 (2006.01) Комбінаційний суматор / Возна Н.Я., Круліковський Б.Б., Грига В.М., Давлетова А.Я., Николайчук Я.М. № а 2017 01347 заявл.13.02.2017; опубл.11.12.2017, Бюл. №23/2017
11. Пат.115861 Україна МПК (2006) G06F 7/00 Однорозрядний напівсуматор / Давлетова А.Я., Николайчук Я.М. №u201612463; заявл.07.12.2016; опубл.25.04.2017, Бюл. №8/2017.
12. Пат. 124563 Україна МПК G06F 7/00 (2018.01) Повний однорозрядний суматор / Николайчук Я.М., Грига В.М., Возна Н.Я., Давлетова А.Я. № u 2017 11720 заявл.30.11.2017; опубл.10.04.2018, Бюл. №7/2018.
13. Пат.117572 Україна МПК G06F 7/38 (2006.01) Суматор з прискореним переносом / Круліковський Б.Б., Возна Н.Я, Грига В.М., Николайчук Я.М., Давлетова А.Я. №u201701336; заявл.13.02.2017; опубл.26.06.2017, Бюл. №12/2017.

14. Пат.109142 Україна МПК G06F 7/00 (2016.01) Однорозрядний суматор / Давлетова А.Я., Круліковський Б.Б., Возна Н.Я., Николайчук Я.М. №u201602165; заявл.04.03.2016; опубл.10.08.2016, Бюл. №15/2016.
15. Пат.109136 Україна МПК G06F 7/00 (2006.01) Однорозрядний суматор / Круліковський Б.Б., Давлетова А.Я., Возна Н.Я., Николайчук Я.М.. №u201602122; заявл.04.03.2016; опубл.10.08.2016, Бюл. №15/2016.
16. The method to optimize structural, hardware and time complexities characteristics multi-bit adders of special processors for data encryption / V.Krulikovskyi, N.Vozna, V.Kimak, A.Davletova // Proceedings of the XIII the International Conference TCSET'2016. - PP. 455-459.
17. A. Anand Kumar Fundamentals of Digital Circuits / Prentice-Hall of India Pvt.Ltd, 2007
18. Шило В.Л. Популярныe цифрове микросхемы: Справочник - 2-е изд., исправленнoе / В.Л.Шило - М: Радио и связь, 1989. – 352 с.

## ДОДАТОК О

Розрахунки системних характеристик відомого та запропонованого пристрою визначення ентропії

Розрахунок структурної складності відомого пристрою (рис.6.42) розраховується згідно виразу:

$$k_{c1} = k_{cAAЦ} + k_{cKK} + 2^k k_{cЛ} + k_{c\Sigma} + k_{cz},$$

де  $k_{cAAЦ}$  - структурна складність АЦП,  $k_{cKK}$  - структурна складність комутатора,  $k_{cЛ}$  - структурна складність лічильного модуля,  $k_{c\Sigma}$  - структурна складність суматора,  $k_{cz}$  - структурна складність комунікаційних зв'язків,  $k$  - розрядність АЦП.

Структурна складність АЦП з вихідним двійковим кодом, представлений на рис Р.2 характеризується структурною складністю:

$$\begin{aligned} k_{cAAЦ} &= 2^k (k_R + k_{PK} + k_{\&} + 4 \cdot k_V) + k \cdot k_T + k_z = \\ &= 2^8 (15 + 18,8 + 11,2 + 4 \cdot 11) + 8 \cdot 30 + 7328 = 30352 \end{aligned}$$

Структурна складність комутатора:

$$\begin{aligned} k_{cKK} &= 2^k (k_{cЛЛ} + k_{cV}) + k_{cz} = 2^8 (11,2 + 11) + (16 + 8 \cdot 256 + 256) = \\ &= 5683 + 2320 = 8003 \end{aligned}$$

Структурна складність лічильного модуля

$$k_{c\dot{E}} = 2^k (8 \cdot k_{cT} + k_{c\log} + k^2 \cdot k_{c\dot{N}}) = 2^8 (8 \cdot 30 + 8 + 8^2 \cdot 163) = 2734080.$$

Структурна складність суматора при  $k = 8$  та розрядності суматора  $m = 8$ :

$$\begin{aligned} k_{c\Sigma} &= k_{cЛЛЛ} \cdot (128 \cdot 8 + 69 \cdot 4 + 32 \cdot 10 + 16 \cdot 11 + 8 \cdot 12 + 4 \cdot 13 + 2 \cdot 14 + 1 \cdot 15) = \\ &= 163 \cdot 2287 = 372781. \end{aligned}$$

Отже:

$$k_{c1} = 30352 + 8003 + 2^8 \cdot 2734080 + 372781 + 6656 = 700341752$$

Структурна складність удосконаленого пристрою визначення ентропії розраховується за формулою:

$$k_{c2} = k_{cAAЦ} + 2^k \cdot k_{cЛ} + 2^k \cdot k_{cЛЛЛ} + k_{c\Sigma} + k_{cz},$$

де  $k_{cAAЦ}$  - структурна складність АЦП,  $k_{cЛ}$  - структурна складність лічильника,  $k_{cЛЛЛ}$  - структурна складність ПЗП,  $k_{c\Sigma}$  - структурна складність суматора,  $k_{cz}$  - структурна складність комунікаційних зв'язків,  $k$  - розрядність АЦП.

АЦП з вихідним кодом Хаара має структурну складність:

$$k_{cAAЦ} = 2^k (k_R + k_{PK} + k_{LE}) + k_z = 2^8 (15 + 18,8 + 14,4) + 1536 = 13875,2.$$

Структурна складність лічильника:

$$k_{cЛ} = 2^k \cdot 8 \cdot k_{cT} = 2^8 \cdot 8 \cdot 30 = 61440.$$



Структурна складність ПЗП:

$$k_{cПЗ} = 2^k \cdot 8k_{cЛЛ} = 2^8 \cdot 8 \cdot 11,2 = 22937,6.$$

Структурна складність суматора при  $k = 8$  та розрядності суматора  $m = 8$ :

$$k_{c\Sigma} = k_{cПП} \cdot (128 \cdot 8 + 64 \cdot 9 + 32 \cdot 10 + 16 \cdot 11 + 8 \cdot 12 + 4 \cdot 13 + 2 \cdot 14 + 1 \cdot 15) = \\ = 163 \cdot 2247 = 366261.$$

Отже,

$$k_{c2} = k_{cАЦЦ} + 2^k \cdot k_{cЛ} + 2^k \cdot k_{cПЗ} + k_{c\Sigma} + k_{cz} = \\ = 13875,2 + 2^8 \cdot 61440 + 2^8 \cdot 22937 + 366261 + 2816 = 21983464,2.$$

Таким чином досягнуто зменшення структурної складності у  $21983464,2 / 700341752 = 31,86$  рази.

Апаратна складність відомого спецпроцесора визначення ентропії розраховується згідно виразу:

$$A_1 = A_{АЦЦ} + A_{KM} + 2^k \cdot (A_{Л} + A_{ПЗП} + A_{ПМ}) + A_{\Sigma}$$

$$\text{Тобто } A_1 = 2602 + 520 + 2^8 \cdot (16 + 16 + 512) + 17976 = 160362V.$$

Апаратна складність удосконаленого пристрою визначення ентропії розраховується згідно виразу:

$$A_2 = 2^k \cdot (A_R + A_{ПК} + A_{ЛЕ} + A_{Л} + A_{ПЗП}) + A_{\Sigma}.$$

$$\text{Тобто } A_2 = 2^8 \cdot (0,1 + 5 + 1 + 16 + 16) + 17976 = 27730V.$$

Таким чином досягнуто зменшення апаратної складності у  $160362 / 27730 = 5,78$  разів.

Аналіз швидкодії класичних структурних реалізацій АЦП паралельного типу [Шило В.Л. Популярныe цифрове микросхемы: Справочник - 2-е изд., исправленное / В.Л.Шило - М: Радио и связь, 1989. - 352 с.], оснащених однофазним компараторами, логічними елементами XOR та шифраторами вихідних двійкових кодів показує, що їх швидкодія складає

$$\tau_{АЦП_1} = \tau_K + \tau_{ЛЕ} + \tau_{Ш},$$

$$\text{де: } \tau_K = 2; \tau_{ЛЕ} = 3; \tau_{Ш} = 4.$$

Тобто швидкодія відомого АЦП складає  $\tau_{АЦП_1} = 2 + 3 + 4 = 9v$  (мікротактів).

Швидкодія АЦП у структурі запропонованого спецпроцесора визначення ентропії визначається згідно виразу:

$$\tau_{АЦП_2} = \tau_K + \tau_{ЛЕ}$$

$$\text{та становить } \tau_{АЦП_2} = 2 + 1 = 3v \text{ (мікротакти).}$$

Часова складність відомого пристрою визначення ентропії розраховується згідно виразу:

$$\tau_1 = \tau_{АЦП} + \tau_{Л} + \tau_{ПЗП} + \tau_{МП} + \tau_{\Sigma},$$

$$\text{де } \tau_{АЦП} = 9v, \tau_{Л} = 2v, \tau_{ПЗП} = 4v, \tau_{МП} = 16v, \tau_{\Sigma АЦП} = 14v.$$

Таким чином, враховуючи об'єм вибірки випадкових подій ( $m = 256$ ), швидкодія відомого пристрою складає:  $\tau_1 = 2^8 \cdot (9 + 2 + 4 + 32 + 14) = 15616\text{v}$

Швидкодія запропонованого пристрою визначення ентропії розраховується згідно виразу:

$$\tau_2 = \tau_{\text{АЦП}} + \tau_{\text{Л}} + \tau_{\text{ПЗП}} + \tau_{\Sigma} .$$

При аналогічному об'ємі вибірки, швидкодія запропонованого пристрою складає:  $\tau_2 = 2^8 \cdot (3 + 2 + 4 + 14) = 5888\text{v}$ .

Таким чином, досягнуто підвищення швидкодії запропонованого пристрою у порівнянні з відомим у  $15616/5888 = 2,65$  рази.

## ДОДАТОК П

Розробка та оцінка структурної складності малогабаритної синтезованої клавіатури введення алфавітно-цифрових даних

У роботах [1, 2] викладений аналіз методів та апаратних засобів формування СД на основі клавіатур різних класів. Важливими характеристичними параметрами ефективності формування ТЕД на основі клавіатур є: інформаційна ємність клавіатури –  $I$ ; загальне число клавiш –  $N$ ; число символних клавiш –  $N_s$ ; число функціонально-регістрових клавiш  $N_f$ ; відносні габарити по вертикалі та горизонталі –  $I, L$ ; кількість генерованих символів –  $N_0$ ; кількість біт на один символ –  $b$ ; кількість символів на одній клавiші –  $S$ ; кількість натискань клавiші при формуванні одного символу –  $n$ .

Перелічені характеристики типових клавіатур названих чотирьох класів приведені в таблиці П.1 [2].

Таблиця П.1 - Характеристики клавіатур вводу даних

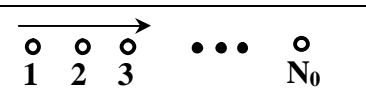
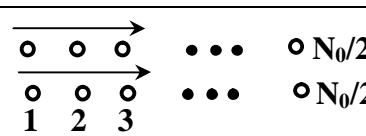
Тип клавіатури	$N$	$N_s$	$N_f$	$S$	$n$	$I*L$
Калькулятор	26	11	15	1	2	4*6
Моб.телефон	20	10	10	8	4	6*3
Комп'ютер	86	44	42	4	2	6*16
Синтезована клавіатура	16	12	4	2	2,5	4*4

Для обґрунтування критерію ефективності клавіатури розглянемо можливі варіанти її реалізації в залежності від різної кількості клавiш  $N$  та кількості генерованих символів  $N_0$  при використанні різних ТЧБ в процесі їх формування.

1. Потенційні характеристики клавіатур при використанні базису Хаара.

1.1. Нехай маємо 1 клавiшу ( $N=1$ ), а число генерованих символів ( $n=1024$ ) (таблиця П.2) [2].

Таблиця П.2 - Параметри генерування символів в базисі Хаара

Характеристики клавіатури	Граф генерування символів в базисі Хаара	$n$
$N=1$ <input type="checkbox"/>		$\frac{N_0}{2n}$
$N=2$ <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		$\frac{N_0}{4n}$

N=4			$\frac{N_0}{8n}$
...	...	...	...

З табл.П.2 видно, що при зростанні числа клавіш, які натискаються неодноразово, а символи генеруються клавіатурою згідно рівномірного розподілу, число натискань клавіш записується аналітично:  $n = N_0/2N$ .

1.2. У випадку, коли, крім однократного натискання  $N$  клавіш, можна використовувати натискування одночасно двох клавіш [1]:

- при  $N=4$ ,  $n = \frac{N_0}{4(N+1)}$ .

1.3. У випадку, коли, крім однократного натискання  $N$  клавіш, можна використовувати всі комбінації одночасного натискання  $N_i$  клавіш ( $i = 0,1,2,\dots,N-1$ ) [1]:  $n = \frac{N_0}{4(N+3)}$ .

В роботах [3, 4] запропонований пристрій для введення алфавітно-цифрових даних, який складається 16-ти програмованих клавіш, на яких нанесені сегментні елементи фрагментів алфавітно-цифрових символів, які двократній активізації клавіш формують повне стилізоване зображення символу, що показано на рис.П.1.

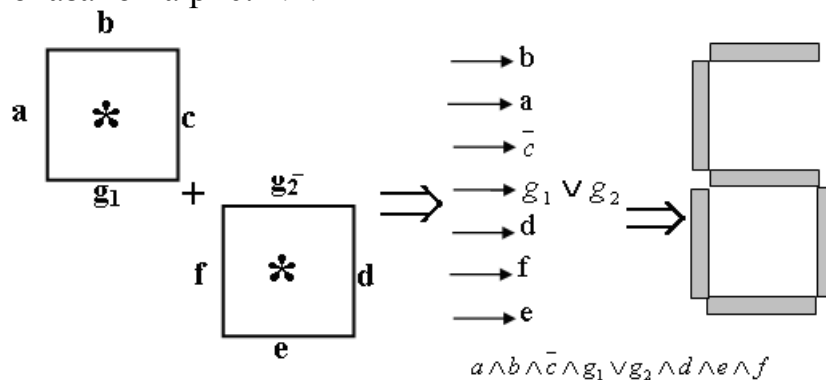


Рис.П.1 - Приклад синтезованого формування стилізованого символу букви "Б" двома послідовними натисканнями клавіш та .

Особливістю такого принципу формування алфавітно-цифрових даних є реалізація логічного склеювання компонента  $g$  згідно логічної операції "АБО" ( $g_1 \vee g_2$ ).

Приклад реалізації такої синтезованої клавіатури, де 1 – панель, 2 – клавіші, 3 – символи функціонального призначення клавіші, приведений на рис.П.2 [3].

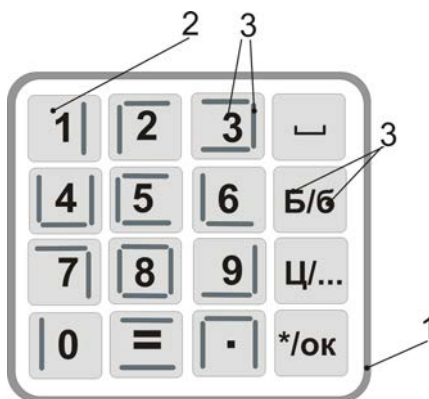


Рис.П.2 - Приклад розміщення клавіш пристрою.

Недоліком даного пристрою є надлишковість та обмежені функціональні можливості. Обумовлено це тим, що 12 клавіш містять надлишкові елементи сегментів, нанесених на цифрові клавіші, які повторюються при повороті на 180°.

В роботі [4] запропоновано удосконалення структури та розширення функціональних можливостей такої клавіатури шляхом введення функціональних клавіш повороту на 180° вправо і вниз. Це дозволило вивільнити шість клавіш для формування інших символів. Таким чином у загальному отримуємо можливість вводу та однозначного кодування не менше 512 алфавітно-цифрових символів та спеціальних знаків.

На рис.П.3 зображено приклад розміщення клавіш пристрою вводу алфавітно-цифрових даних та призначення функціональних клавіш, де 1 – панель, 2 – клавіші, 3 – символи функціонального призначення клавіші. При чому розміщення, форма та величина 16-ти клавіш можуть бути довільними і адаптованими до конкретних умов роботи оператора, який вводить дані. Довільними також можуть бути набори алфавітів: український, англійський та інші.

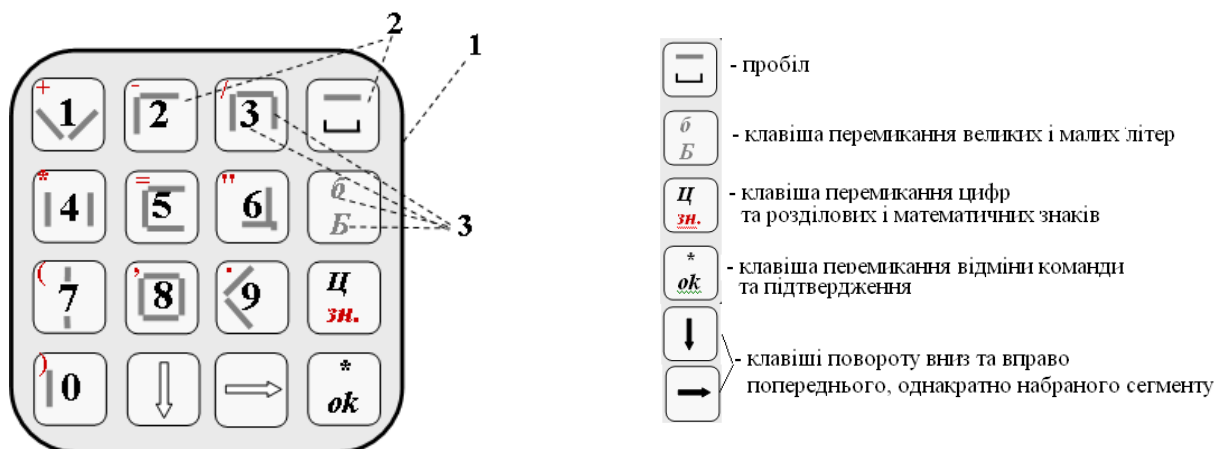


Рис.П.3 - Приклад розміщення клавіш удосконаленого пристрою введення алфавітно-цифрових даних.

Запропонована малогабаритна та багатофункціональна клавіатура може застосовуватись в якості мобільного абонентного пункту для набору алфавітно-цифрових даних при роботі технологічних об'єктів, де використання стандартних засобів вводу є недоцільним та неможливим через вплив природних умов, загрозу пожежної, іскровибухової небезпеки та ін. (великі стратегічні промислові об'єкти: об'єкти нафтогазового комплексу, глибинні шахти, об'єкти електроенергетики).

Інше можливе застосування даної спеціалізованої клавіатури у зоні бойових дій, де автоматизоване управління може виконуватись тільки спеціалізованими засобами.

Також дана спеціалізована клавіатура може бути оснащена рельєфними символами сегментів для набору алфавітно-цифрових даних «сліпим» методом, в результаті чого, вона буде адаптована до потреб людей з вадами зору.

Крім того, пристрій забезпечує захист від більшості можливих перехоплень окрім візуального. Для відображення одного символу (наприклад, літери алфавіту) користувач вводить комбінацію з двох клавіш. Порядок набору може оперативно змінюватися згідно кодових масок у вигляді матриць розташування символів, відомих тільки 2-ом абонентам. Таким чином, забезпечується захист від розшифровки перехопленого сигналу при наборі тексту чи інших операціях.

Перевагою даного способу при сенсорній реалізації клавіатури на дисплеї смартфона є відображення тільки тих символів, що визначаються реєстровими клавішами, що збільшує візуальне зображення, спрощує та прискорює процеси введення даних та освоєння навиків швидкісного користування такою клавіатурою.

#### Список джерел, використаних у додатку П.

1. 82. Возна Н.Я. Методологія та техніка формування техніко-економічних даних в автоматизованих системах управління / Н.Я. Возна // Вісник Хмельницького національного університету. - 2005.-- Ч.1, Т.2, №4. - С.131-133.
2. 88. Возна Н.Я Теорія та методологія побудови клавіатур вводу даних комп'ютерних систем // Поступ в науку. Збірник наукових праць Бучацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач, 2010. - №6. Т1. – С.61-66.
3. 80. Пат.25291 Україна МПК (2006) G06F 3/00 Пристрій для введення алфавітно-цифрових даних / Николайчук Я.М., Возна Н.Я. № u200613176; заявл. 13.12.2006; опубл. 10.08.2007, бюл. № 12/2007.
4. 81. Пат.107904 Україна МПК G06F 3/023 (2006.01) Пристрій для введення алфавітно-цифрових даних / Николайчук Я.М., Мельник А.О., Возна Н.Я., Мельник В.А. №a201404203; заявл.18.04.2014; опубл.25.02.2015, Бюл. №4/2015.

## ДОДАТОК Р

### Реалізація розроблених спецпроцесорів у середовищі Active-HDL

#### 1. Реалізація VHDL-моделі удосконаленого інтегруючого квадратора в середовищі Active-HDL

Реалізація такого спецпроцесора може бути легко реалізована на одному кристалі ПЛІС або на спеціальній платформі конкретної фірми. Швидкодія такого спецпроцесора може бути реалізована на тактовій частоті до 50 МГц, що забезпечує цифрову реєстрацію 60 8-ти бітних відліків на виході АЦП.

При цьому апаратна складність спецпроцесора складає:  $A=10$  (Т-тригерів)+ $20$  ( $\Sigma$ -суматорів)+ $20$  (Д-тригерів) або, враховуючи, що один Т-тригер містить 4 вентиля, суматор - 5 вентилів, Д-тригер – 2 вентиля отримаємо сумарне число вентилів на ПЛІС  $10 \cdot 4 + 20 \cdot 5 + 20 \cdot 2 = 180 \approx 200 \cup$ , де  $\cup$  - символ вентиля "І-НЕ" на ПЛІС.

Оскільки типові ПЛІС мають число вентилів  $5 \cdot 10^6$  і більше, то на одному кристалі можна реалізувати багато таких спецпроцесорів, без врахування структур АЦП для паралельного контролю та реєстрації коротких замикань на електричних підстанціях з великим числом приєднань.

Доцільно зробити спеціальний процесор на одному кристалі чи корпусі, який буде випрямляти синусоїду на виході трансформатора струму, мати АЦП-однополярний кристал, регістри зсуву і логічні елементи, два однорозрядні накопичувальні суматори, генератор унітарних кодів і спецпроцесор-квадратор з виходом, який ідентифікує коротке замикання у процесі його розвитку на інтервалі менше одного періоду. Ці спецпроцесори можуть бути емульовані на типовому сигнальному однокристалльному процесорі шляхом його програмування згідно розробленого алгоритму.

Реалізація VHDL-моделі удосконаленого багатоканального регістра зсуву виконана у середовищі Active-HDL.

На рис.Р.1 подано функціональну схему удосконаленого багатоканального регістра зсуву цифрового корелятора.

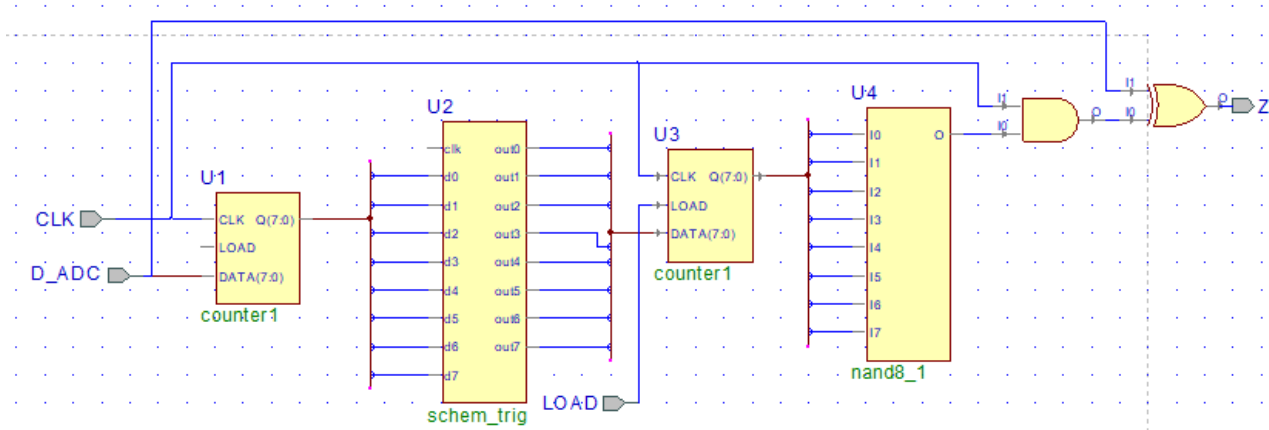


Рис.Р.1 - Схемотехнічна реалізація удосконаленої схеми багатоканального регістра зсуву в середовищі Active-HDL.

На даній схемі на вхід D\_ADC поступають двійкові імпульси з виходів АЦП. CLK – вхід синхронізації. Пакет двійкових імпульсів записується в двійковий лічильник (counter1) з виходів якого поступає на входи масиву D-тригерів, який містить 8-м лінійок, кожна з яких містить 64 D-тригери. Останні номери тригерів в схемі формують інверсні значення, які записуються в двійковий лічильник (counter2), коли сигнал LOAD=1. З виходів двійкового лічильника дані поступають на входи 8-входового елемента "I-HE" (nand 8\_1), вихід якого з'єднаний з першим входом логічного елемента "I", другий вхід якого з'єднаний з входом синхронізації CLK лічильника U1, вихід з'єднаний з першим входом логічного елемента «Виключаюче АБО», другий вхід якого з'єднаний з інформаційним входом D\_ADC лічильника U1. Таким чином в лічильник U1 записується унітарний код поточного цифрового значення фазного струму, який на виході лічильника U1 перетворюється у 8-розрядний паралельний двійковий код. Під дією сигналів синхронізації CLK отримані двійкові коди зсуваються у матриці D-тригерів U2. На виході БРЗ інверсний код фазного струму затриманого на  $m$ -мікротактів записується в лічильник U3 сигналом LOAD. Таким чином під дією сигналів синхронізації CLK відбувається формування на виході логічного елемента «Виключаюче АБО» унітарного коду модульної різниці між поточними та затриманими на півперіода промислової частоти цифровими значеннями фазних струмів. Отримані коди модульних різниць у подальшому поступають на вхід інтегруючого квадратора.

На рис. Р.2 подано схемотехнічну реалізацію матриці 8x8 D-тригерів з яких складається основний 8-ми розрядний регістр зсуву на 128 мікротактів.

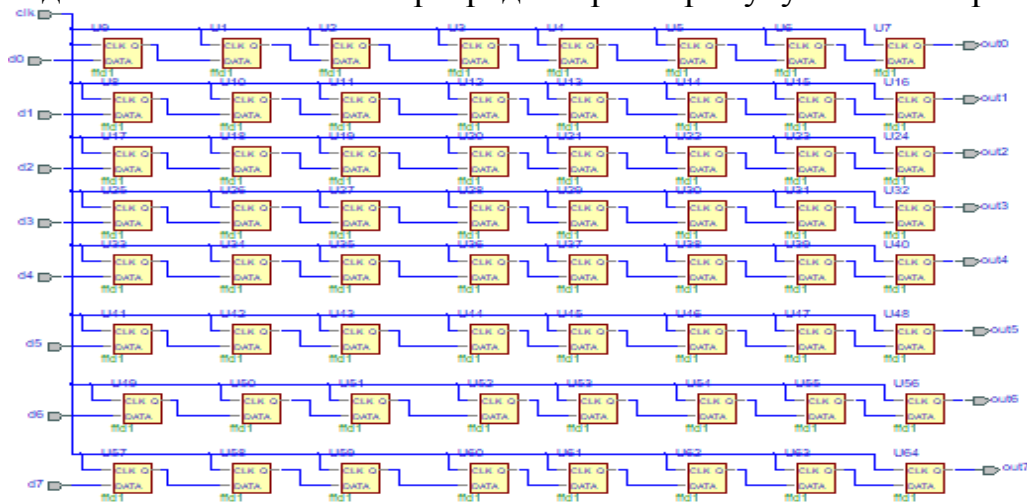


Рис. Р.2 - Схемотехнічна реалізація матриці D-тригерів 8x8, які формують прямі значення вихідних сигналів.

На рис. Р.3 подано діаграму функціональної симуляції матриці D-тригерів 8x8.



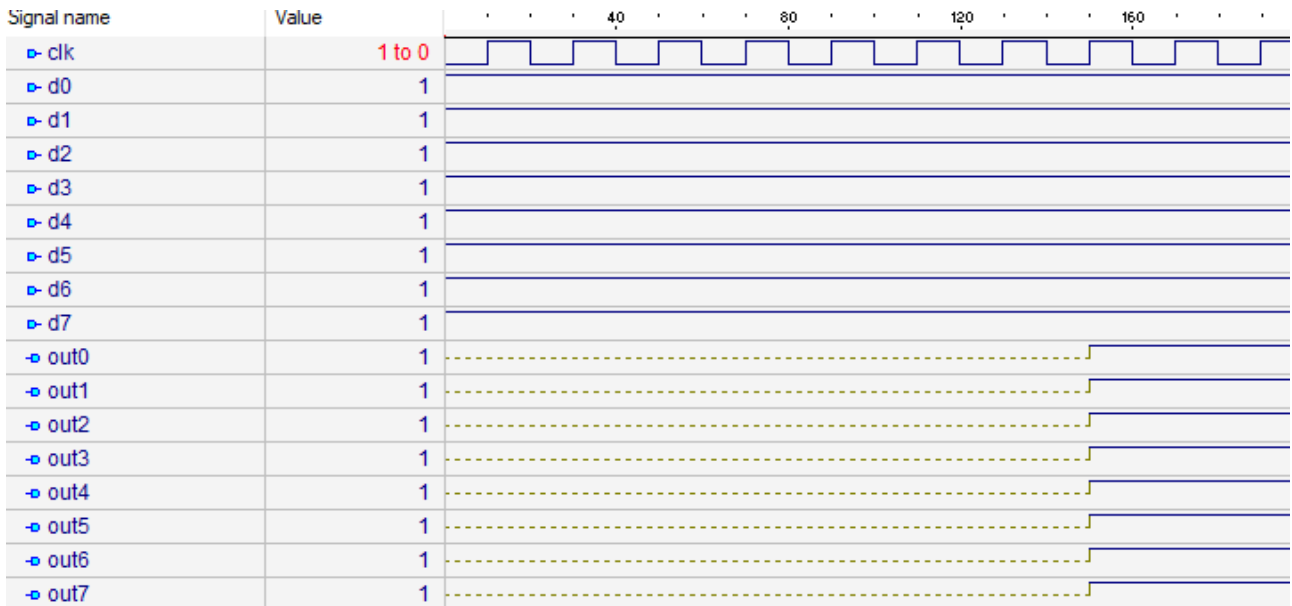


Рис. Р.3 - Функціональна симуляція матриці D-тригерів 8x8.

На діаграмі бачимо, що на входи (d0,...,d7) матриці D-тригерів подано одиниці і через 8 мікротактів вони появляються на виходах (out0,...,out7).

На рис. Р.4 подано схемотехнічну реалізацію останньої лінійки матриці D-тригерів 8x8, яка формує інверсні значення вихідних сигналів.

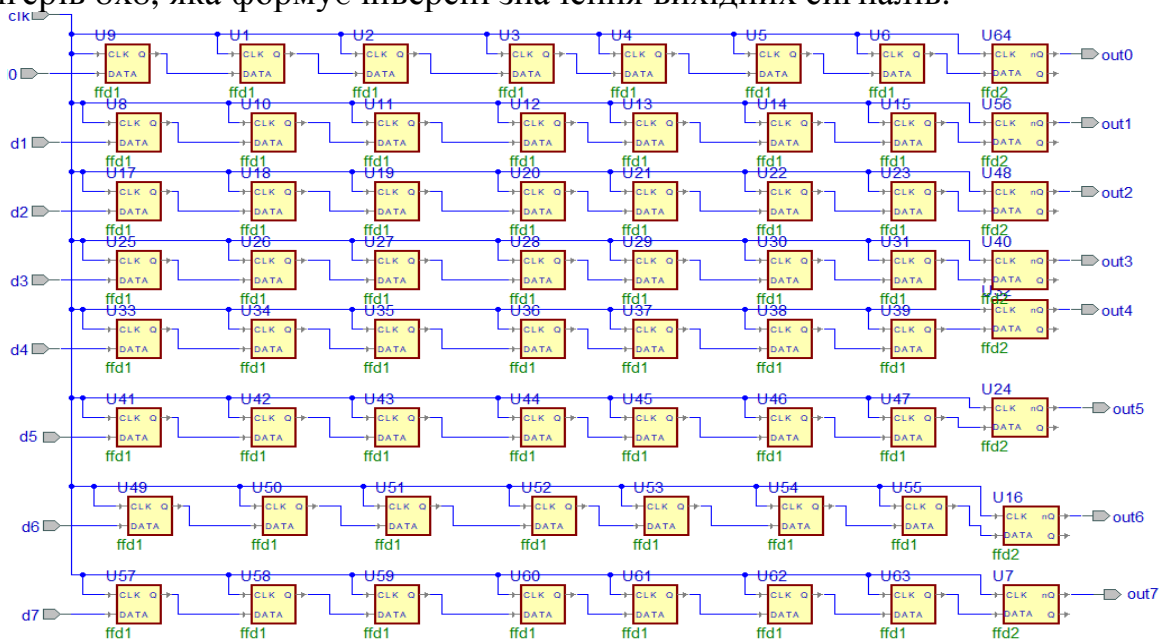


Рис. Р.4 - Схемотехнічна реалізація матриці D-тригерів 8x8, які формують інверсні значення вихідних сигналів.

На рис.Р.5 подано діаграму функціональної симуляції матриці D-тригерів 8x8, яка формує інверсні значення вихідних сигналів.

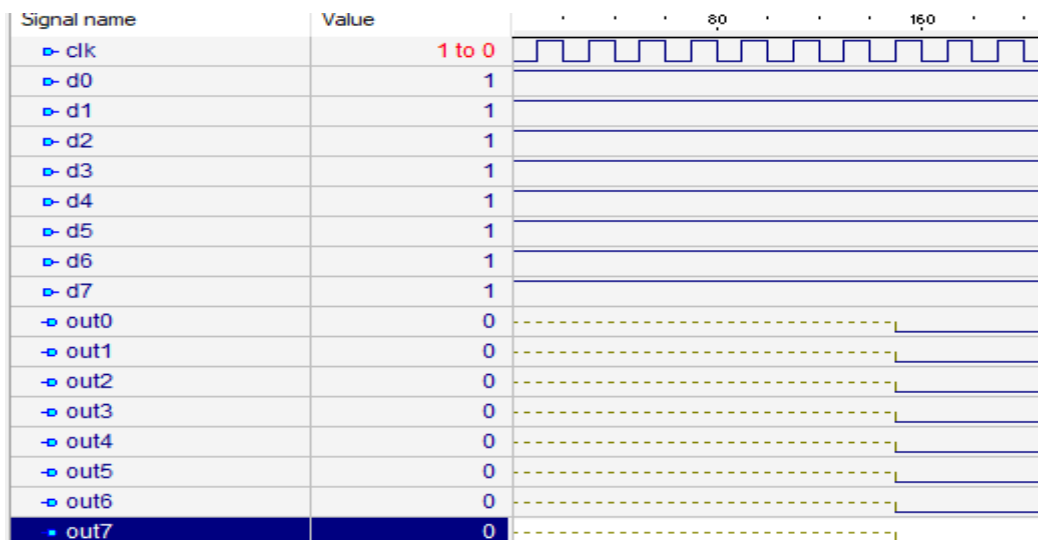


Рис. Р.5 - Функціональна симуляція матриці D-тригерів 8x8, які формують інверсні значення вихідних сигналів.

На діаграмі бачимо, що на входи (d0,...,d7) матриці D-тригерів подано одинички і через 16 мікротактів на виходах (out0,...,out7) появляються їх інверсні значення.

На рис. Р.6 подано схемотехнічну реалізацію завершеного 8-розрядного удосконаленого двійкового регістра зсуву на 64 мікротакти. Даний регістр містить 8 блоків матриці D-тригерів розміром 8x8.

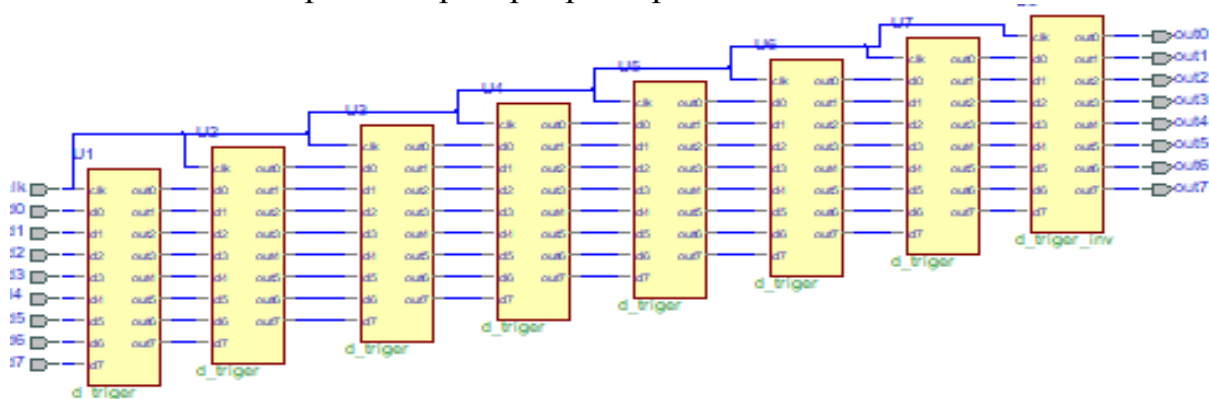


Рис. Р.6 - Схемотехнічна реалізація удосконаленого 8-розрядного регістра зсуву.

Як видно з рис. Р.6 удосконалений 8-розрядний регістра зсуву містить 8 блоків матриці D-тригерів розміром 8x8.

На рис. Р.7 подано діаграму функціональної симуляції удосконаленого двійкового регістра зсуву на 64 мікротакти.

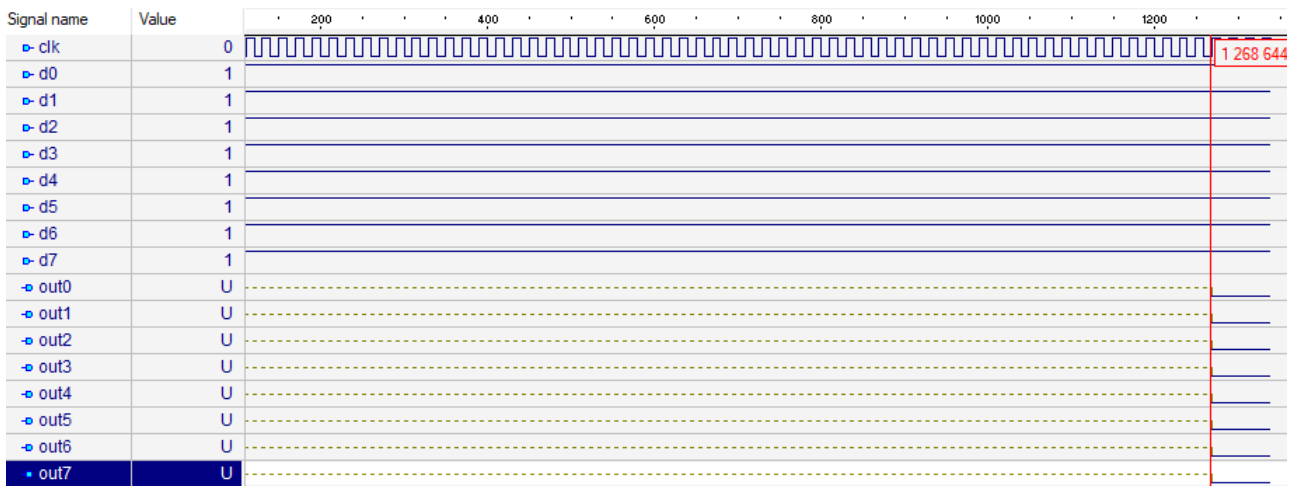


Рис. Р.7 - Функціональна симуляція удосконаленого двійкового регістра зсуву на 64 мікротакти.

На діаграмі бачимо, що на входи (d0,...,d7) удосконаленого регістра зсуву подано одиницьки і через 64 мікротакти вони появляються на виходах (out0,...,out7).

Синтез розробленого удосконаленого інтегруючого квадратора проводився на ПЛІС сімейства Artix-7 кристал xc7a100tcsг324-1 фірми Xilinx в системі Vivado в результаті чого RTL-схема схемотехнічної реалізації інтегруючого квадратора замінюється реальними компонентами ПЛІС, які складаються з так званих таблиць істинності на певну кількість входів Look-up Table (LUT), що дозволяє на логічному рівні реалізовувати виконання тих чи інших функцій.

Логічний елемент складається із Look-Up Table (LUT) і одного регістра-тригера. Цифрові схеми працюють синхронно із тактовою частотою. З кожним імпульсом тактової частоти схема переходить в наступний стан. Всі стани схеми зберігаються в регістрах, а наступні стани для кожного регістра обчислюються логічними функціями на вході даних цих тригерів.

Логічна функція для кожного тригера є 4-ьох входовою, так як функція від 4-ьох можливих сигналів. Значить сама таблиця істинності повинна містити  $2^4=16$  комірок пам'яті і 4 вхідних сигнала LUT будуть адресою для читання результатів із нашої таблиці.

На рис. Р.8 показано топологію кристалу xc7a100tcsг324-1 сімейства Artix-7 фірми Xilinx, який складається з 8-ми частин (X0Y1-X0Y3, X1Y1-X1Y3). Розроблений пристрій в результаті виконання імплементації розмістився в лівій частині X0Y1.

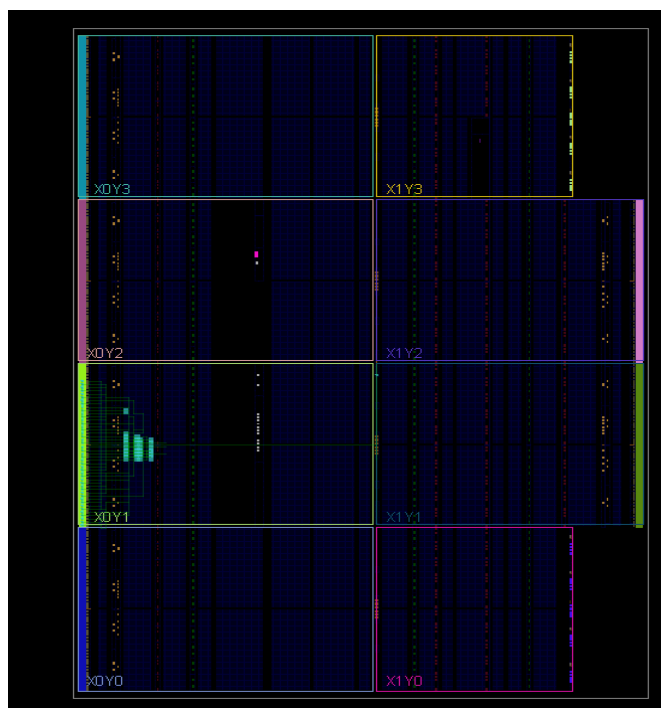


Рис. P.8 - Топологія імплементації однокристального комп'ютера у системі Vivado на ПЛІС.

На рис. P.9 показано реалізацію топології проекту на ПЛІС у збільшеному вигляді.

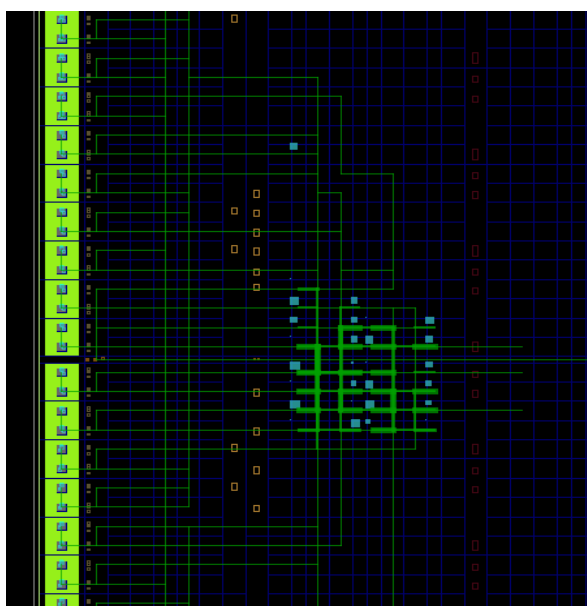


Рис. P.9 - Збільшений вигляд топології імплементації інтегруючого квадратора в системі Vivado на ПЛІС.

Провівши синтез проекту САПР Vivado формує відповідні системні характеристики (затрати обладнання ПЛІС, які необхідні для реалізації проекту, споживану потіжність та часові характеристики). На рис. P.10 показано таблицю затрат обладнання ПЛІС для реалізації пристрою та характеристики потужності у Ватах.

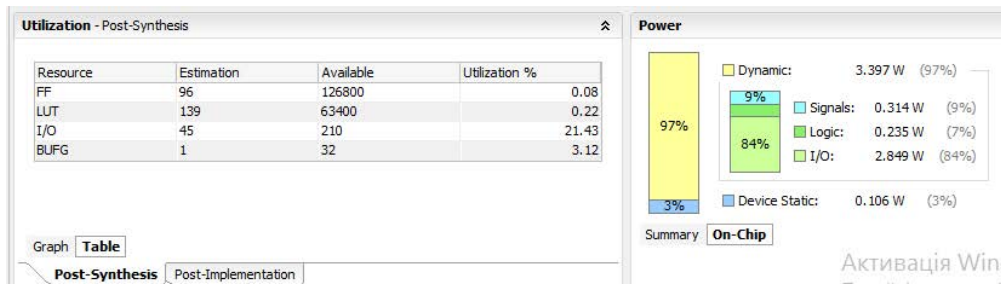


Рис. Р.10 - Системні характеристики реалізації проекту на ПЛІС в системі Vivado

У результаті проведення синтезу і імплементації проекту на ПЛІС, бачимо, що розроблений проект потребує 139 (1%) LUT із наявних 63400 на кристлі, 96 (1%) тригерів із наявних 126800 та має 45 (23%) входів і виходів із наявних 210 на ПЛІС.

Динамічний діапазон потужності складає 3,397 Ватт на 97% кристалу.

У сформованому звіті по часових характеристиках вказано, що даний проект буде функціонувати на частоті 258 МГц.

На рис. Р.11 подано структуру мікроелектронної реалізації VHDL-моделі інтегрально-різницевого квадратора, який містить k-розрядний синхронний двійковий лічильник U1 та 2k-розрядний акумулятор U2, які з'єднані між собою k+1-розрядною інформаційною шиною. Вхідний унітарний код модульної різниці  $|x_i - x_{i-m}|$  поступає на вхід D\_add лічильника U1. Вихідний паралельний код лічильника U1 у вигляді подвоєного двійкового коду, одиниці в нульовому розряді однорозрядного входу b, та 7-ми нулів у старших розрядах, яка подається на входи акумулятора U2 робота якого синхронізується сигналом clk. На початку кожного циклу формування квадратів модульних різниць лічильник U1 по входу clk скидається в нульовий стан, а вкінці всіх циклів накопичення суми квадратів модульних різниць регістр пам'яті акумулятора U2 скидається в нульовий стан по входу set. Виходи акумулятора (c0,...,c11) використовуються в якості порогових значень при розпізнаванні та ідентифікації короткого замикання у високовольтній електромережі.

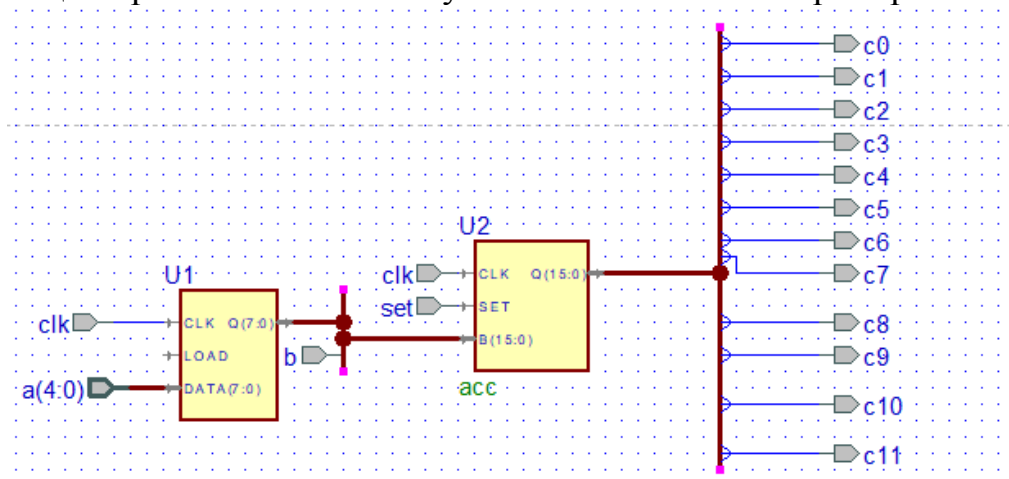


Рис. Р.11 - Схемотехнічна реалізація інтегрально-різницевого квадратора в середовищі Active-HDL.

2. Реалізація суматора з прискореним переносом в середовищі Active-HDL.

На рис. Р.12 подано пірамідальну структуру 4-розрядного суматора побудованого на неповних однорозрядних суматорах.

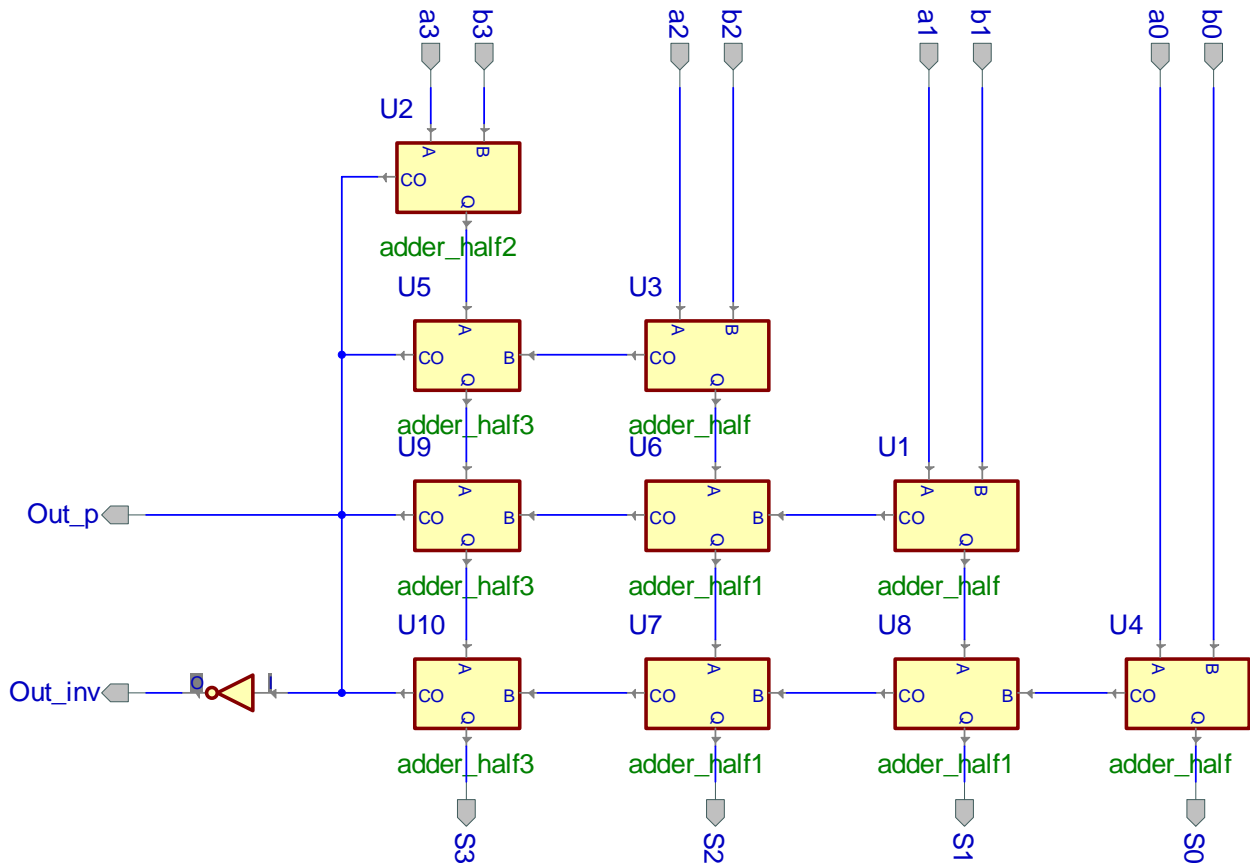


Рис. Р.12 Схемотехнічна реалізація 4-розрядного пірамідального суматора в середовищі Active-HDL.

Внутрішня структура пірамідального суматора містить неповні однорозрядні суматори 2-х типів (Патент 117572).

На рис. Р.13 подано діаграму функціональної симуляції 4-х розрядного пірамідального суматора.

Signal name	Value	...	80
a0	0		
a1	0		
a2	0		
a3	0		
b0	1		
b1	1		
b2	1		
b3	1		
S0	1		
S1	1		
S2	1		
S3	1		
Out_inv	0		

Рис. Р.13 - Функціональна симуляція 4-розрядного пірамідального суматора.

На діаграмі бачимо, що на входи суматора ( $a_0, \dots, a_3$ ) подано логічні нулі а на входи ( $b_0, \dots, b_3$ ) логічні одиниці. Вихідна сума результату ( $S_0, \dots, S_3$ ) рівна всім одиницям а сигнал  $Out\_inv$  встановився в нуль.

На рис. Р.14 подано схемотехнічну реалізацію 16-ти розрядного суматора з прискореним переносом.

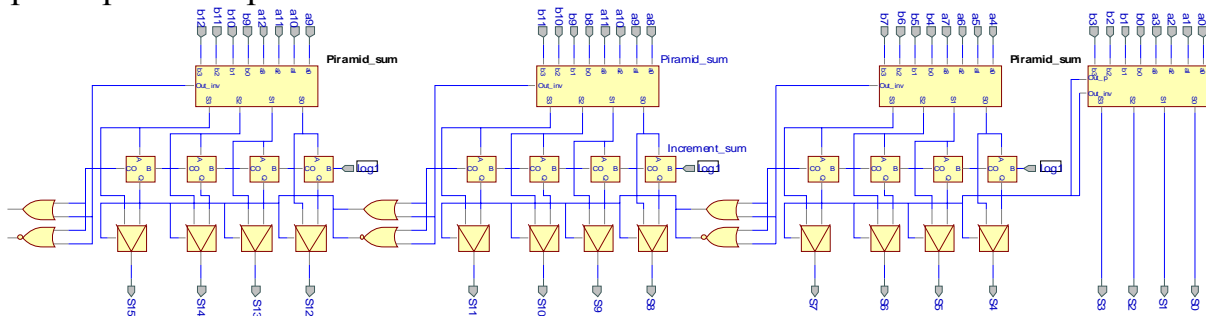


Рис. Р.14 - Схемотехнічна реалізація 16-ти розрядного суматора з прискореним переносом в середовищі Active-HDL.

Даний суматор з прискореним переносом побудований на основі чотирьох пірамідальних суматорів розрядністю 4 біти кожний, 12-ти однорозрядних інкрементних суматорів та 12-ти двохходових однобітових мультиплексорів з логікою керування.

На рис. Р.15 подано діаграму функціональної симуляції 16-ти розрядного суматора з прискореним переносом.

Signal name	Value	8	16	24	32	40	48	56
A	FFF7	0007		0DF7		FFF7		
B	2304	0004		2304				
Q	22FB	000B		30FB		22FB		
CO	1							

Рис. Р.15 - Функціональна симуляція 16-розрядного суматора з прискореним переносом.

На діаграмі бачимо, що на входи суматора ( $A_0, \dots, A_{15}$ ) подано шістнадцяткові значення (0007, 0DF7, FFF7) а на входи ( $B_0, \dots, B_{15}$ ) шістнадцяткові значення (0004, 2304). Вихідна сума результату ( $S_0, \dots, S_{15}$ ) рівна (000B, 30FB, 22FB) а також бачимо формування значення сигналу вихідного переносу CO.

На рис. Р.16 подано схемотехнічну реалізацію 32-розрядного суматора з прискореним переносом.

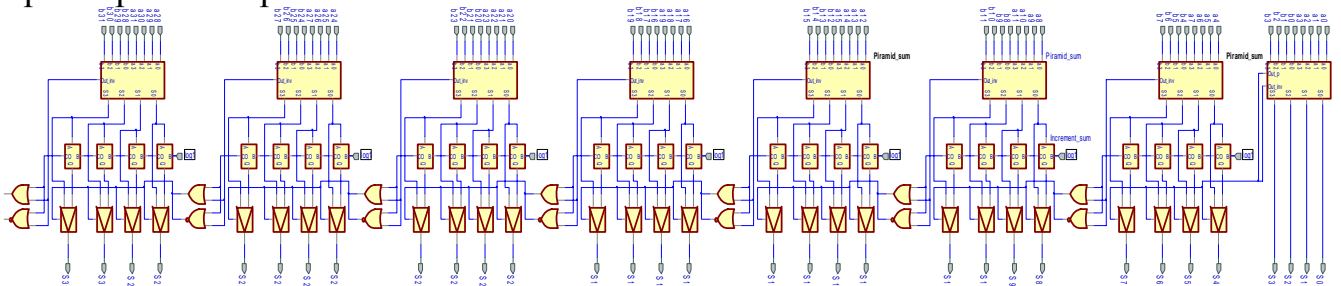


Рис. Р.16 - Схемотехнічна реалізація 32-розрядного суматора з прискореним переносом в середовищі Active-HDL.

Даний суматор з прискореним переносом побудований на основі восьми пірамідальних суматорів розрядністю 4 біти кожний, 28-ми однорозрядних інкрементних суматорів та 28-ми двовходових однобітових мультиплексорів з логікою керування.

На рис. Р.17 подано діаграму функціональної симуляції 32-розрядного суматора з прискореним переносом.

Signal name	Value	8	16	24	32	
A	00000004	00000004				
B	FFFFFFFF	00000004	X		FFFFFFFF	
Q	00000003	00000008	X		00000003	
CO	1	1				

Рис. Р.17 - Функціональна симуляція 32-розрядного суматора з прискореним переносом.

На діаграмі бачимо, що на входи суматора (A0,...,A31) подано шістнадцяткові значення (00000004) а на входи (B0,...,B31) шістнадцяткові значення (00000004, FFFFFFFF). Вихідна сума результату (S0,...,S31) рівна (00000008, 00000003) а також бачимо формування значення сигналу вихідного переносу CO.

Розглянемо процес синтезу та імплементації розробленої VHDL-моделі проєктованого 32-ох розрядного суматора з прискореним переносом на ПЛІС сімейства Artix-7 фірми Xilinx. На першому етапі проєктування виконується синтез розробленої VHDL-моделі.

На рис. Р.18 показано реалізацію топології проєкту 32-розрядного суматора з прискореним переносом на ПЛІС.

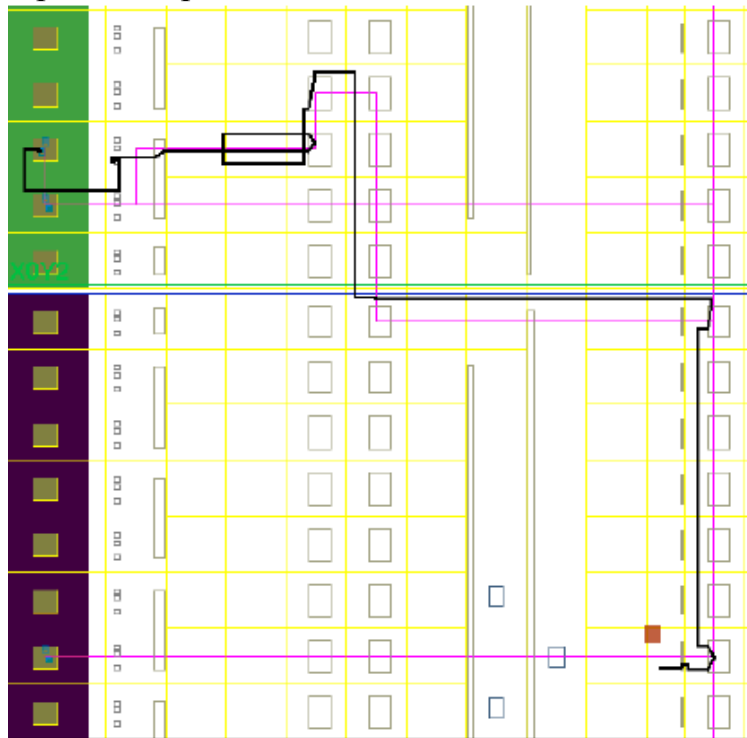


Рис. Р.18 - Збільшений вигляд топології імплементації 32-розрядного суматора з прискореним переносом в системі Vivado на ПЛІС.



У результаті проведення синтезу і імплементації проекту на ПЛІС, бачимо, що розроблений суматор з прискореним переносом потребує 1056 LUT із наявних 63400 на кристлі та має 96 входів і виходів із наявних 210 на ПЛІС.

Частота роботи 32-розрядного суматора з прискореним переносом при синтезі на ПЛІС складає 218 МГц.

# ДОДАТОК С

## Акти впровадження



про використання результатів докторської дисертації  
Возної Наталії Ярославівни на тему **"Теорія, методи та засоби структуризації  
поліфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах"**

Комісія у складі: голови – декана факультету комп'ютерних інформаційних технологій, д.т.н., проф. Дивака Миколи Петровича та членів: в.о. директора науково-дослідного інституту інноваційного розвитку та державотворення Письменного Валерія Івановича, начальника планово-фінансового відділу Кушніра Олексій Ростиславович склали цей акт про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Возної Н.Я. використані під час виконання науково-дослідних робіт у науково-дослідному інституті інноваційного розвитку та державотворення, а саме:

1) науково-дослідної роботи на тему "Розробка алгоритмів функціонування захистів електропередач за коротких замикань на основі теорії кореляційних функцій" (державний реєстраційний номер 0112U007886), у якій автором виконано дослідження і аналіз перехідних процесів та методів їх ідентифікації, побудова кореляційних моделей струмів і напруг в декартовій системі координат та аналіз їх ефективності при ідентифікації станів електромережі, отримано математичні цифrogramи різних видів замикань у високовольтних лініях електропередач, розроблено метод різницево-ковзного розпізнавання та ідентифікації накидів та коротких замикань у високовольтних лініях електрозв'язку;

2) науково-дослідної роботи на тему «Розробка математичного забезпечення захисту ліній електропередач номінальною напругою 6-35 кВ на основі теорії розпізнавання сигналів (державний реєстраційний номер 0113U007679), у якій автором розроблено інтегральні та диференціально-різницеві алгоритми розпізнавання спотворень гармонічних сигналів, метод рандомізації та кореляційної оцінки збурень у високовольтних електромережах, дослідження спотворень при коротких замиканнях у високовольтних лініях електропередач;

3) науково-дослідної роботи на тему "Розробка теоретичних засад та алгоритмів ідентифікації запусків потужних електроприводів у високовольтних ЛЕП на основі теорії розпізнавання образів" (державний реєстраційний номер 0115U002340), у якій автором розроблено структуру та алгоритм функціонування пристрою ідентифікації накидів та коротких замикань для релейного захисту високовольтних ліній електропередач, методи та алгоритми ідентифікації запусків потужних електроприводів у високовольтних ЛЕП, дослідження цифrogram перехідних процесів при пуску потужних електроприводів промислових установок нафтогазової галузі;

4) науково-дослідної роботи на тему «Розробка структурної схеми та компонентів дослідного взірця пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань на землю у високовольтних ЛЕП» (державний реєстраційний номер 0116U006790) (відповідальний виконавець), у якій автором розроблено структурні рішення



дослідного взірця пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач, розроблено схемотехнічні рішення компонентів пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань;

5) науково-дослідної роботи на тему «Розробка теорії, методології та алгоритмів структуризації образно-кластерних моделей моніторингу станів електричних підстанцій високовольтних ЛЕП» (державний реєстраційний номер 0116U006792) (відповідальний виконавець), у якій автором виконано аналіз структури та характеристик інформаційних потоків, які формуються на електричній підстанції для моніторингу їх станів, апробація алгоритмів на тестових та експериментальних сигналах;

6) науково-дослідної роботи на тему «Авторський нагляд за розробкою схемних рішень та випробувань дослідних взірців пристрою релейного захисту в мережах 6-10 кВ» (державний реєстраційний номер 0117U000141) (відповідальний виконавець), у якій автором розроблено схемотехнічні рішення компонентів пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань, експериментальне відпрацювання компонентів пристрою релейного захисту в мережах 6-10 кВ;

7) науково-дослідної роботи на тему "Розробка теорії та комп'ютерних засобів спеціалізованих комп'ютерних систем на основі теоретико-числових базисів Крестенсона-Галуа ", (державний реєстраційний номер 0106U012530), у якій автором розроблено кореляційні, кластерні, логіко-статистичні інформаційні моделі та моделі руху даних в розподілених СКС;

8) науково-дослідної роботи на тему "Розробка теоретичних засад методів формування та цифрового опрацювання даних у розподілених спеціалізованих комп'ютерних системах" (державний реєстраційний номер 0112U008458), у якій автором розроблена теорія та концепція структуризації даних та інформаційних потоків в комп'ютеризованих системах, метод формування алфавітно-цифрових даних на основі синтезованої клавіатури, теоретичні основи та критерії ефективності синтезованих клавіатур вводу алфавітно-цифрових даних, теоретичні засади структуризації поліфункціональних даних у різних теоретико-числових базисах;

9) науково-дослідної роботи на тему "Методи та засоби побудови безпроводних мультимедійних сенсорних мереж на основі модулярної арифметики", (державний реєстраційний номер 0112U007886), у якій автором проведено аналіз архітектури безпроводних сенсорних мереж та розробка структури компонентів кодера/декодера модифікованого коректуючого коду у системі залишкових класів.

**Голова комісії**

декан факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій,  
д.т.н., проф.



Дивак М.П.

**Члени комісії:**

В.о. директора НДІ ІРД



Письменний В.І.

Начальник планово-фінансового  
відділу



Кушнір О.Р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту  
мікропроцесорних систем керування  
об'єктами електроенергетики

 Сабадаш І.О.

" 20 " грудня 2018 р.

м. Львів

## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Возної Наталії Ярославівни на тему: "Теорія, методи та засоби структуризації поліфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах"

Комісія у складі: головного інженера Кідиба Віктор Павлович, завідувача лабораторією мікропроцесорної техніки Баран Петро Михайлович склала цього акта про впровадження результатів дисертаційної роботи доцента кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету Возної Н.Я. у тому, що вона проводила роботу з впровадження пристрою мікропроцесорного струмового захисту ліній електропересилань 6-35 кВ.

У процесі розробки і впровадження теоретичних основ структуризації поліфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах контролю збурень у високовольтних лініях електропересилань були одержані особисто Возною Н.Я. і використані такі результати наукових досліджень:

1) метод інтегрально-диференціального різницевого розпізнавання дискретизованих гармонічних сигналів промислової частоти, який дозволяє шляхом їх структуризації та кореляційного опрацювання, інваріантно до значень фазних струмів, ідентифікувати накиди та короткі замикання у високовольтних лініях електропересилань;

2) алгоритм та програмне забезпечення захисту високовольтних ліній електропересилань;



3) спосіб контролю параметрів технологічного процесу на основі образно-кластерної моделі;

4) інформаційна образно-кластерна модель контролю та ідентифікації відхилень технологічних процесів на електричних підстанціях;

5) розроблений пристрій розпізнавання накидів та коротких замикань та, сумісно з ІМСКОЕ, проведені випробування дослідного зразка.

Розроблені метод, алгоритм, програмне забезпечення, спосіб та пристрій МСЗ.6-35 були покладені в основу розширення функціональних можливостей діагностування збурень у високовольтних лініях електропередач у тиражованій мікропроцесорній керувально-діагностувальній системі "Альтра", яка встановлюється на підстанціях та розподільчих пунктах 6-35 кВ на підприємствах обленерго.

Головний інженер ІМСКОЕ,

к.т.н., доцент



В.П.Кідиба

Завідувач лабораторією

мікропроцесорної техніки

ІМСКОЕ,

к.т.н., доц..



П.М. Баран

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ**

**«ТЕРНОПІЛЬСЬКЕ КОНСТРУКТОРСЬКЕ БЮРО РАДІОЗВ'ЯЗКУ «СТРІЛА»**

46020, м.Тернопіль, вул 15 Квітня, 6, тел/факс - 28-75-00, 28-72-00, tkbr\_strila@ukr.net, tkbr\_mail.ru

р/р 26009308101054 в ТБВБ 10019/08 Філія Тернопільського обласного управління Ощадбанку,

МФО 338545, код 14042350

№ 499 від 16.11.2017р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ ТКБР «Стріла»



Рафалюк О.О.

2017.р.

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи Возної Наталії  
Ярославівни на тему "Теорія, методи та засоби структуризації  
подіфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах"

Комісія у складі: заступника директора ТКБР "Стріла" Карпів Володимира Богдановича, головного конструктора Піскуна Сергія Олексійовича склала цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи к.т.н., доцента кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету Возної Н.Я. на підприємстві "Тернопільське конструкторське бюро радіозв'язку "Стріла" в тому, що вона проводила роботи з впровадження швидкодіючих мікроелектронних компонентів системи контролю та управління рухомим складом залізничного транспорту.

У процесі розроблення і впровадження теорії, методів та засобів структуризації поліфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах одержані особисто Возною Н.Я. і використані такі результати наукових досліджень:

1. Метод синтезованого формування алфавітно-цифрових даних, що дозволило зменшити габарити та число клавіш у 5 разів, підвищити надійність та забезпечити захист від несанкціонованого доступу у системах передавання алфавітно-цифрових даних.

2. Метод швидкодіючого перетворення аналогових сигналів у цифрову форму теоретико-числового базису Хаара-Крестенсона та схемотехнічні



рішення структури та компонентів паралельного АЦП на основі парафазних компараторів (Пат.116185 Україна, Бюл. №9/2017).

3. Метод зменшення структурної та апаратної складності у 3-5 разів, збільшення швидкодії схемотехнічного рішення мікроелектронної реалізації багаторозрядного комбінаційного суматора.

4. Удосконалена структура швидкодіючого спецпроцесора визначення ентропії згідно інформаційної міри К.Шеннона.

Розроблені методи та структурні рішення спецпроцесорів цифрового перетворення інформації, запропоновані Возною Н.Я., прийняті до впровадження, покладені в основу розширення функціональних можливостей, підвищення швидкодії на 1-2 порядки та оптимізації системних характеристик компонентів програмно-апаратних обчислювальних та мережевих засобів системи контролю та управління систем електропостачання, а також у якості мікроелектронних компонентів спецтехніки.

Члени комісії:

Заступник директора



Карпів В.Б.

Головний інженер



Піскун С.О.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор КП «Міськвітло»

Кохан І.В.

2019 р.



## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Возної Наталії Ярославівни:

«Теорія, методи та засоби структуризації поліфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах»

Комісія у складі: головного інженера Носика Романа Михайловича, начальника дільниці Федоришина Андрія Васильовича склала цього акта про впровадження результатів дисертаційної роботи доцента кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету Возної Наталії Ярославівни на КП "Міськвітло", а саме:

1. Метод структуризації станів технологічних об'єктів контролю та управління шляхом структурного представлення образно-кластерної моделі на основі розрахунку даних запропонованого функціоналу:

$$X_{i0} = F(\{x_i\}, \{x_j\}, S_{i0}, M_x, M_j, M_v, D_x, \delta_x, R_{xx}, R_{xy}, S_w, L_i, \rho_{ij}, S_{ij}, I_x),$$

де:  $\{x_i\}, \{x_j\}$  - масиви оцифрованих моніторингових даних параметрів об'єкта управління;  $S_{i0}$  - відповідно семантичний, інформаційний та технологічний стани ОУ;  $M_x, M_j, M_v$  - відповідні математичні сподівання;  $D_x, \delta_x$  - відповідно дисперсія та середньоквадратичне відхилення;  $R_{xx}, R_{xy}$  - автокореляційні та взаємкореляційні функції;  $S_w$  - спектри параметрів об'єкта управління;  $L_i$  - логіко-статистичні інформаційні моделі,  $i \in \overline{1, 5}$ ;  $\rho_{ij}, S_{ij}$  - відповідно матриці коефіцієнтів взаємкореляції, кластерної моделі ймовірнісних переходів;  $I_x$  - кореляційна міра ентропії стану об'єкта управління.

2. Алгоритм та програмне забезпечення структурного відображення образно-кластерної моделі моніторингових станів промислових об'єктів КП "Міськвітло".

Приклад структурного відображення образно-кластерної моделі:

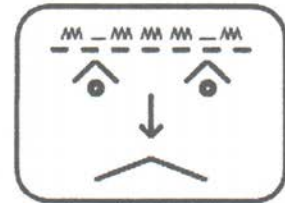




"Норма"



"Розвиток аварії"



"Аварія"

Запропонований метод, алгоритм та програмний продукт забезпечують зменшення структурної складності образно-кластерної моделі та підвищення ергомічності, що покращує рівень пожежо-, вибухо- та екологічної безпеки на підприємстві КП "Міськвітло".

У результаті обговорення комісія дійшла висновку. Результати впровадження досліджень дисертаційної роботи Возної Н.Я. у складі комп'ютеризованої системи контролю та управління об'єктами підприємства КП "Міськвітло" дозволили зменшити на 2-3 порядки об'єми інформаційних потоків від моніторингових об'єктів, відповідно зменшити архівовані масиви баз даних та баз знань та підвищити швидкодію реакції оператора комп'ютеризованої системи при виникненні нештатних ситуацій.

Всі роботи та дослідження проводились на безоплатній основі.

Головний інженер

Носик Р.М.

Начальник дільниці

Федоришин А.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор  
Тернопільського національного  
економічного університету

Шинкарик М.І.

2019 р.



впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи  
Возної Наталії Ярославівни

“Теорія, методи та засоби структуризації поліфункціональних даних у розподілених  
комп’ютерних системах”  
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Комісія Тернопільського національного економічного університету у складі декана факультету комп’ютерних інформаційних технологій, д.т.н., професора Дивака Миколи Петровича, доцента кафедри спеціалізованих комп’ютерних систем к.т.н., доцента Пітуха Ігора Романовича, доцента кафедри спеціалізованих комп’ютерних систем к.т.н., доцента Сегіна Андрія Ігоровича склали цей акт про те, що результати, отримані в дисертаційній роботі Возної Н.Я., зокрема: метод синтезованого формування алфавітно-цифрових даних; алгоритм та прикладна програма формування образно-кластерної моделі на моніторі оператора; метод структуризації поліфункціональних даних в моно- та мульти- теоретико-числових базисах, які породжують кодові матриці систем числення залишкових класів. Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона; програмний комплекс системи моніторингу та діагностування станів "норми", "розвитку аварії" та "аварії", узагальнені існуючі та розроблені нові критерії оцінки системної та структурної складності поліфункціональних даних, вдосконалено систему атрибутів та теоретичні засади розрахунку матричних моделей руху даних на основі диференціації функціональних операцій в активних вузлах, розроблено та реалізовано в промисловості ряд структурних рішень компонентів обчислювальних засобів розподілених комп’ютерних систем використовуються в навчальному процесі факультету комп’ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету при підготовці бакалаврів спеціальності «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» при викладанні дисциплін «Проектування комп’ютеризованих систем управління», «Цифрова обробка сигналів та зображень», «Теорія автоматичного управління», «Основи системної інженерії», «Основи метрології».

Декан факультету комп’ютерних  
інформаційних технологій,  
д.т.н., професор

М.П.Дивак

Доцент кафедри спеціалізованих  
комп’ютерних систем,  
к.т.н., доцент

І.Р.Пітух

Доцент кафедри спеціалізованих  
комп’ютерних систем,  
к.т.н., доцент

А.І.Серін



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Начальник УПО в Тернопільській обл.  
майор поліції

Роман Лихота

" 05 " \_\_\_\_\_ 2019 р.

## АКТ

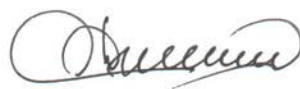
впровадження результатів докторської дисертаційної роботи "Теорія, методи та засоби структуризації поліфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах" доцента кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету Возної Наталії Ярославівни:

В процесі розроблення методу криптозахисту алфавітно-цифрових даних на основі синтезованої клавіатури з матричним маскуванням компонентів кодів символів Головному управлінню національної поліції в Тернопільській області передані для впровадження результати наукових досліджень, а саме:

1. Метод синтезованого кодування та введення алфавітно-цифрових даних на основі синтезованої малогабаритної клавіатури.
2. Принцип оперативного крипто захищеного маскування даних у протоколах обміну інформаційними повідомленнями між віддаленими абонентами.

Запропонований у дисертаційній роботі Возної Н,Я, метод синтезованого кодування та введення алфавітно-цифрових даних (згідно патенту України №107904) реалізований на основі сенсорної клавіатури мобільних засобів та персональних комп'ютерів шляхом оперативно-матричного маскування кодів двох компонентів символів та знаків дозволили значно підвищити криптозахист та рівень кібербезпеки обміну даними між віддаленими підрозділами в управлінні національної поліції в Тернопільській області.

Заступник начальника УПО  
Тернопільської області



Я. Дзьоник





ЗАТВЕРДЖУЮ  
ТВО директора Державного підприємства  
“Львівський державний завод “ЛОРТА”

М. Д. Василів

“20” \_\_\_\_\_ 2019 р.

### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
ВОЗНОЇ Наталії Ярославівни,  
поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Комісія у складі:

голова комісії – головний конструктор ДП ЛДЗ ЛОРТА, доктор технічних наук  
Б. О. Оліярник,

члени комісії – начальник відділу ДП ЛДЗ ЛОРТА, кандидат технічних наук  
К. С. Євтушенко,  
старший науковий співробітник ДП ЛДЗ ЛОРТА, доктор  
технічних наук В. С. Глухов,

склала цей акт про те, що Державним підприємством “Львівський державний завод  
“ЛОРТА” під час розробки спеціального програмного забезпечення систем  
управління електроприводом визначено доцільним врахувати під час удосконалення  
такі наукові та прикладні результати дисертаційного дослідження Н. Я. Возної, а  
саме:

- метод диференціально-різницевого визначення короткого замикання та  
перевантаження електроприводу;

Впровадження названих результатів дослідження Возної Н.Я. дозволить  
підвищити надійність компонентів електроприводу за рахунок ідентифікації подій з  
високою швидкодією.

Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії:

Б. О. Оліярник

Члени комісії;

В. С. Глухов

К. С. Євтушенко

“20” 12 2019 року



м. Івано-Франківськ  
"18" грудня 2019р.



**А К Т**  
впровадження результатів наукової роботи  
Возної Наталії Ярославівни  
**“ТЕОРІЯ, МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ СТРУКТУРИЗАЦІЇ  
ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ У РОЗПОДІЛЕНИХ  
КОМП’ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ”**

Основні теоретичні результати досліджень, які отримано в ході проведення науково-дослідної роботи Возної Наталії Ярославівни, а саме:


- опис методів швидкодіючого перетворення аналогових сигналів у цифрову форму теоретико-числового базису Хаара-Крестенсона та схемотехнічні рішення структури та компонентів паралельного АЦП на основі парафазних компараторів;

- опис методів зменшення структурної та апаратної складності та збільшення швидкодії схемотехнічного рішення мікроелектронної реалізації багаторозрядного комбінаційного суматора;

- опис методу побудови образно-кластерної моделі контролю квазістаціонарних технологічних процесів на основі розробленого функціоналу станів технологічного процесу шляхом побудови сукупності інформаційних, статистичних, кореляційних, спектральних, логіко-статистичних, кластерних та ентропійних моделей, які у порівнянні з відомими методами дозволяють розпаралелити обчислювальні процеси розрахунку параметрів моделей та відобразити на моніторі оператора стан об'єкту контролю у вигляді структур образно-кластерних моделей, які ідентифікують стани норми, розвитку предаварійних та аварійних ситуацій;

- структурні, алгоритмічно-програмні та схемотехнічні рішення спецпроцесорів цифрового перетворення інформації покладені в основу розширення функціональних можливостей, підвищення швидкодії та оптимізації системних характеристик компонентів програмно-апаратних обчислювальних та мережевих засобів системи контролю та управління, взято до розгляду щодо перспектив використання у вимірювально-інформаційних системах контролю технологічних параметрів.

Заступник директора

 к.т.н., доц. Доценко Є.Р.

Головний інженер

 Власійчук І.М.









УКРАЇНА



# ПАТЕНТ

НА ВІНАХІД

№ 115751

КОМБІНАЦІЙНИЙ СУМАТОР

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 11.12.2017.

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України

М.І. Тігарчук



УКРАЇНА



# ПАТЕНТ

НА ВІНАХІД

№ 116176

АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 12.02.2018.

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України

М.І. Тітарчук





УКРАЇНА



# ПАТЕНТ

НА ВІНАХІД

№ 116601

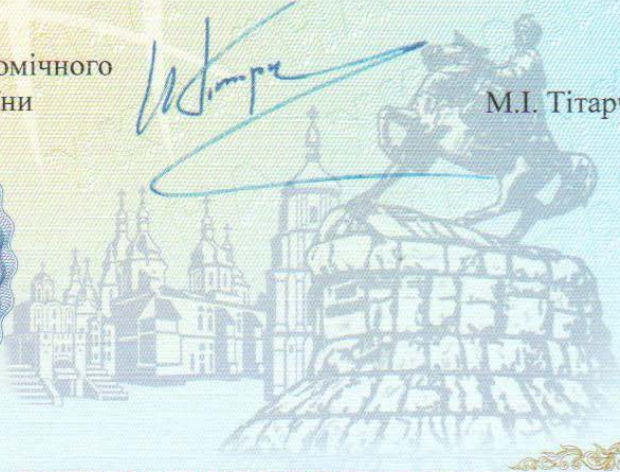
КОМБІНАЦІЙНИЙ СУМАТОР

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 10.04.2018.

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України

М.І. Тітарчук





УКРАЇНА



# ПАТЕНТ

НА ВІНАХІД

№ 115182

ЧИСЛОІМПУЛЬСНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ МНОЖЕННЯ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 25.09.2017.

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України

М.І. Тітарчук





Висновок експертної комісії про визначення оцінки структурної та інформаційної складності компонентів складних кіберфізичних систем

**ВИСНОВОК**

**експертної комісії факультету комп'ютерних інформаційних технологій  
Тернопільського національного економічного університету щодо визначення  
оцінки структурної та інформаційної складності компонентів складних  
кіберфізичних систем**

Відповідно до наказу №65 від 28.08.2018 р. "Про створення експертної комісії щодо визначення оцінки структурної та інформаційної складності компонентів складних кіберфізичних систем" міжкафедральна експертна комісія здійснювала роботу у складі:

Голова комісії: Николайчук Я.М. – завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем ТНЕУ, д.т.н., професор;

10 членів комісії – експерти міжкафедральної експертної комісії.

Міжкафедральна експертна комісія провела онтологічну експертизу критеріїв структурної та інформаційної складності схемотехнічних рішень мікроелектронних компонентів та програмно-апаратних засобів складних розподілених комп'ютерних систем.

За результатами проведеної експертизи встановлено:

1. З метою уніфікації експертних оцінок інформаційної та структурної складності у наукових дослідженнях методика експертної оцінки та розрахунку структурної та інформаційно-структурної складності здійснюється згідно наступних критеріїв:

- структурна складність:  $k_c = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i$  ( $P_i \in (l, P, x, d, r, h, z, b, c, i, n, a, f)$ -

інформативні параметри атрибутів структур,  $\alpha_i$ - вагові коефіцієнти експертних оцінок структурної складності елементів та компонентів структуризованих даних);

- інформаційна складність:  $F_C = \sum_{j=1}^m f_j$  ( $f_j$ - функціонально-інформаційна характеристика структури пристрою);

- інформаційно-структурна складність:  $k_e = K \cdot \frac{F_C}{k_c} \Rightarrow \max$  ( $K$  – ідентифікатор рівня структури).

2. Кількісні оцінки інформаційної та структурної складності визначаються експертною комісією за 100-бальною шкалою шляхом усереднення значень онтологічних оцінок.

3. Результати експертних оцінок числових значень схемотехнічних рішень мікроелектронних компонентів та програмно-апаратних засобів складних кіберфізичних систем подаються у вигляді числових значень та становлять середнє арифметичне, згідно онтологічних оцінок, визначених кожним експертом.



## Висновок.

Числові узагальнені значення експертних оцінок структурної та інформаційної складності компонентів та програмно-апаратних засобів, згідно онтологічних оцінок, визначених кожним експертом, вважати наступними (таблиця 1):

Таблиця 1.

№	ППП експерта	Системні параметри компонентів РКС											
		Лінія	Поворот	Пересічення	Дотик	Розгалуження	Заливка	Зв'язок	Літера	Цифра	Індекс	Символ	Знак
1	Николайчук Я.М.	1-2	1,8-2,2	2-3	2-2,5	2-4	1	1-3	8-10	4	3	3	2
2	Сегін А.І.	1,1-2,2	1,5-2,2	1-3	2-3	3-4	1	1-5	12	5	4	4	2
3	Яцків В.В.	1-1,9	2-2,5	3-4	2-4	4-6	2	2-6	10-12	6	5	5	4
4	Возна Н.Я.	1-1,8	2,1-2,5	3	2-2,5	4-5	2	2-4	8-12	4-6	4	4	2
5	Заставний О.М.	1-2	2-4	3-4	3-4	3-4	5	2-5	5	4	3	5	3
6	Гуменний П.В.	1,5-2	2-2,3	3-4	2-2,5	3-5	3	2-3	10	6	3	3	2,5
7	Албанський І.Б.	1-3	2-2,5	3-4	2-3	3-5	1	1-3	5-15	5-9	5	5	3
8	Якименко І.З.	1-2	2-3,5	3-4	2,5	4-7	3	1-4	8-13	3-9	4	3-4	4-5
9	Комар М.П.	1-2	2-3	2-3	2	2-5	2	3-4	10-20	1-4	3	3	2
10	Пітух І.Р.	1,1-1,9	2,1-2,9	2-3	2,1-2,5	4-6	2	2-4	7-15	1-5	4	5	3
11	Масляк Б.О.	1-2	1,5-2,5	2	2-2,5	5-6	2	3-4	8-12	2-4	4	3	2
<b>Узагальнене значення</b>		<b>1,2-1,7</b>	<b>2-2,2</b>	<b>3</b>	<b>2-2,2</b>	<b>4-6</b>	<b>2</b>	<b>2-4</b>	<b>8-10</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

## Рекомендації експертної комісії.

Числові значення експертних оцінок структурної та інформаційної складності компонентів та програмно-апаратних засобів при необхідності можуть доповнюватися додатковими системними параметрами, важливими для конкретних умов застосування, а кількісні оцінки обґрунтовано змінюватися у наукових публікаціях та дисертаційних дослідженнях у межах  $\pm 10 \div 20\%$  по відношенню до табл.1 та табл.2., що може бути пов'язано з розвитком проривних технологій та винаходів у галузі складних кіберфізичних систем.

Експерти:

Голова експертної комісії,  
д.т.н., проф.

Я.М.Николайчук

Член експертної комісії,  
к.т.н., доц.

Н.Я.Возна

З висновками експертів ознайомлений:

Декан ФКІТ,  
д.т.н., професор



М.П.Дивак