


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

**ВОЗНА НАТАЛІЯ ЯРОСЛАВІВНА**



УДК 681.325.36

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

Спеціальність 05.13.05 - "Комп'ютерні системи та компоненти"

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Львів - 2020**

Дисертацією є рукопис

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

**Науковий  
консультант -**

доктор технічних наук, професор  
**Николайчук Ярослав Миколайович**,  
Тернопільський національний економічний  
університет, завідувач кафедри спеціалізованих  
комп'ютерних систем, академік Міжнародної академії  
інформатики

**Офіційні опоненти -**

доктор технічних наук, професор  
**Мичуда Зиновій Романович**  
Національний університет "Львівська політехніка",  
професор кафедри комп'ютеризованих систем  
автоматики

доктор технічних наук, професор  
**Швачич Геннадій Григорович**  
Національна металургійна академія України, завідувач  
кафедри прикладної математики та обчислювальної  
техніки

доктор технічних наук, професор  
**Семенов Сергій Геннадійович**  
Харківський національний технічний університет  
(ХПІ), завідувач кафедри обчислювальної техніки та  
програмування

Захист відбудеться 27 листопада 2020 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті "Львівська політехніка" МОН України (79013, м. Львів - 13, вул. С.Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1)

Автореферат розісланий "23" жовтня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, доктор технічних наук, професор



Луцик Я.Т.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна 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 методів оцінки структурної складності поліфункціональних даних дозволяє удосконалити системні характеристики відповідних структурних рішень апаратно-програмних засобів складних комп'ютеризованих систем.

**Актуальність теми.** Перспективним напрямком удосконалення засобів обчислювальної техніки є розширення їх поліфункціональних характеристик шляхом структурно-часового інтегрування алгоритмів, обчислень та компонентів процесорів комп'ютерних систем. Тому розробка структур обчислювальних засобів кіберфізичних систем (КФС) з поліфункціональними характеристиками є актуальною проблемою і потребує подальших глибоких досліджень.

Поняття "поліфункціональних даних" (ПФД) охоплює широкий клас типів інформаційних повідомлень у середовищі фізичних, логічних та віртуальних даних. Таким чином, поліфункціональні дані – це функціонально та проблемно-орієнтовані типи даних, які за способом представлення спрощують чи оптимізують їх наступні перетворення та застосування у РКС та КФС.

Виходячи із такого обґрунтування ПФД предметом розв'язання поставленої в дисертації наукової проблеми, є розробка теорії та методології оцінки структурної складності ПФД, що дозволяє вирішувати прикладні задачі порівняння структурної складності різних класів ПФД або їх модифікації у деякому класі, удосконалення характеристик структурної складності з метою вдосконалення системних характеристик ПФД.

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. Однак, у загальному ця суперечність не може бути подолана без відповідного зниження інших системних характеристик обчислювальних засобів та спецпроцесорів згідно критеріїв функціональної повноти та інформаційно-структурної складності.

Аналіз літературних джерел за концепцією, теорією та методах розв'язання прикладних задач 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 КФС.

Вперше питаннями теорії розробки та концепції фундаментальних основ структурної складності (СС) різних класів ПФД займалися відомі зарубіжні вчені: J. Martin, V.Fritch, T Harrison, M.Bat, L.aszlo Babai, J. Beck, Russell Impagliazzo, H. Buhrman, David A. Mix Barrington, C. H. Papadimitriou, R. Raz, A. Yao, Thierry Warin, William Sanger, C.H. Hong Jia-Wei. Серед вітчизняних вчених науковий вклад у

розвиток теорії складних систем, структурної складності засобів комп'ютерної техніки внесли: В.М.Глушков, О.В.Палагін, В.К.Задірака, М.А.Карцев, С.А.Майоров, В.П.Тарасенко, А.О.Мельник, З.Р.Мичуда, В.А.Мельник, О.В.Дрозд, В.С.Глухов., С.Г.Семенов, Г.Г.Швачич, Я.М.Николайчук та їх наукових шкіл.

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, І.Й.Акушський, В.М.Краснобаєв, Я.М.Николайчук, В.С.Глухов.

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, А.О.Саченко та ін., а також вітчизняними науковцями по моделюванню широкого класу структурних об'єктів: М.П.Дивак, В.М.Теслюк та ін.

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 (2012-2013pp., 0112U007886), № СКС-54-2013 (2013-2014pp., 0113U007679), № СКС-67-2014 (2014-2015pp., 0115U002340), № СКС-48-2015 (2015-2016pp., 0116U006790), № СКС-70-2016 (2016-2017pp., 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" (2016-2017pp., 0116U006792) та реалізацією мікроелектронних компонентів кіберфізичних систем: № СКС-50-2017 "Розробка та реалізація мікропроцесорного струмового захисту ліній електропересилань 6-35 кВ" (2017-2018pp., 0117U005103). № СКС-42-2019 "Проектування на ПЛІС мікроелектронних компонентів пристрою релейного захисту" (2019-2020 р., 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 мети необхідно вирішити комплекс 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) 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 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.

**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 спецпроцесорних компонентів РКС на основі розроблених теоретичних засад, методів та критеріїв оцінки їх структурної складності.

**Методи дослідження:** в ході розв'язання, вирішуваної у дисертації проблеми, використовувались методи теорії інформації, теорії складних систем, теорії ймовірностей та побудови статистичних, кореляційних, спектральних, ентропійних та кластерних моделей, теорії сигналів та розпізнавання образів, технологія проектування мікроелектронних компонентів РКС на ПЛІС.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

Автором отримано такі нові наукові результати:

Вперше розроблено:

- концепція структуризації поліфункціональних даних, яка дозволила узагальнити фундаментальні основи теорії структурних перетворень інформаційних потоків в розподілених кіберфізичних системах;
- нові критерії оцінки структурної та інформаційно-структурної складності поліфункціональних даних, що дозволили формалізувати аналіз та покращити результати синтезу системних характеристик удосконалених компонентів РКС;
- теоретичні засади методів:
  - 1) метод структуризації ПФД у ТЧБ: Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона, який дозволив зменшити обчислювальну складність та підвищити швидкодію цифрового опрацювання даних;
  - 2) метод визначення ентропії станів квазістаціонарного об'єкта, що дозволило розширити функціональні можливості визначення та уточнення статистичних та спектральних характеристик джерела інформації;
  - 3) метод перетворення кодів RGB-пікселів кольорових зображень шляхом їх кодування у базисах Крестенсона та Хаара-Крестенсона, що у порівнянні з існуючим методом в базисі Радемахера, дозволяє перевести коди пікселів з трьохвимірної кодової системи в одновимірну;
  - 4) метод інтегрально-диференціального опрацювання гармонічних сигналів, 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;
  - 5) метод моніторингу станів квазістаціонарного об'єкта на основі характеристичного функціоналу параметрів технологічного процесу та побудови образно-кластерної моделі, що дозволив підвищити ергомічність та швидкодію реакції операторів КС при виникненні нештатних ситуацій;
- удосконалено метод синтезованого формування алфавітно-цифрових даних, що дозволило підвищити їх криптозахист.
- набув подальшого розвитку метод криптозахисту пікселів кольорових зображень шляхом їх згортки з псевдовипадковими послідовностями.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Практична цінність отриманих результатів полягає у наступному:

- розроблені та реалізовані у мікроелектронному виконанні структурні рішення елементів та функціональних компонентів кіберфізичних систем наступних типів:
  1. АЦП паралельного типу з вихідними кодами в базисах Радемахера та Хаара-

Крестенсона зі зменшеною структурною складністю у 5,1 разів, інформаційно-структурною – у 6,2 рази, підвищенням швидкодії - у 2,25 рази, зменшенням апаратної складності при різних наборах модулів у 8-14 разів у порівнянні з відомими структурами.

2. Однорозрядні неповні та повні двійкові суматори з комутованими прямими, парафазними та інверсними входи-виходами з гранично мінімальною затримкою сигналів суми та переносів 1 мікротакт, що дозволило розширити клас компонентів процесорів кіберфізичних систем з гранично мінімальними системними характеристиками.
3. Швидкодіючі багаторозрядні суматори:
  - 3.1) пірамідального типу на основі удосконалених однорозрядних неповних однофазних та парафазних суматорів із підвищеною швидкістю у 2 рази та зменшеною структурною складністю у 1,9 разів у порівнянні з відомими структурами;
  - 3.2) з прискореним переносом на основі інкрементних суматорів зі зменшеною структурною складністю у 1,86 разів, апаратною – у 1,96 разів та підвищеною швидкістю у 2,95 рази при їх розрядності 128 біт;
  - 3.3) пристрій визначення Хеммінгової віддалі між аналоговими сигналами у базисі Хаара-Крестенсона з підвищеною швидкістю у 14 разів та зменшеною структурною складністю на 1-2 порядки у порівнянні з їх відомою реалізацією у базисі Радемахера.
4. Перемножувачі у різних ТЧБ:
  - 4.1) удосконалена структура перемножувача унітарних кодів у базисі Хаара-Крестенсона з високою регулярністю мікроелектронної структури та підвищеною швидкістю більш, ніж на 1 порядок у порівнянні з перемножувачем у базисі Радемахера;
  - 4.2) структура різницево-модульного квадратора у базисі Хаара-Крестенсона, з підвищеною швидкістю обчислень модульних різниць квадратів більше, ніж на 1 порядок у порівнянні з аналогічними перемножувачами у базисі Радемахера;
  - 4.3) структура потокового перемножувача багаторозрядних двійкових чисел, в якому шляхом розпаралелення процесів запису, перемноження та зчитування даних досягнуто зменшення структурної складності  $n$ -розрядних вхідних та вихідних шин у  $4n/2$  разів та без втрати швидкодії досягнуто зменшення у 2,5 рази апаратної складності перемножуваної матриці.
5. Пристрій для визначення ентропії згідно інформаційної міри К.Шеннона, в якому досягнуто покращення регулярності структури зі зменшенням структурної складності у 31,86 рази, апаратної складності - у 5,78 разів, підвищенням швидкодії - у 2,65 рази у порівнянні з відомими пристроями на основі комутаторів інформаційних каналів.
6. Мікроелектронний пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач, який дозволив розпізнавати накиди, замикання на землю та запуски потужних електроприводів на інтервалі 1,0-1,5 періода промислової частоти та у порівнянні з відомими, характеризується інваріантністю до амплітуди струмів збурень у приєднаннях високовольтних підстанцій.
7. Удосконалені структури протоколів обміну даними в мережах низових рівнів

кіберфізичних систем шляхом використання надлишкових розрядів двійкових кодів на виходах АЦП при різних класах точності сенсорів, що дозволило підвищити завадозахищеність кодів фреймів у порівнянні зі стандартними протоколами HDLC, вилучити операцію "біт-стаффіngu" та ліквідувати випадкові зміни кількості бітів у пакетах даних.

8. Удосконалена синтезована малогабаритна клавіатура, яка містить 16 клавіш, що у порівнянні з відомими QWERTY-клавіатурами ПК, дозволило у 8 разів зменшити кількість клавіш, а також забезпечило криптозахист при передаванні алфавітно-цифрових даних матрично-маскованими 4-бітними кодами.

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), 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 розроблення: [3, 9] - теоретичні засади авто- та взаємкореляційних моделей; [3, 66] - спосіб та пристрій синтезованого вводу алфавітно-цифрових даних; [3, 5, 36-38, 40] – розробка та формалізація сукупності моделей руху структуризованих даних; [39, 41] - запропонована концепція інформаційного моделювання руху структуризованих даних; [10] - метод формування структуризованих даних квазістаціонарних об'єктів; [11] - структура фреймів систем з різною організацією інтерфейсних зв'язків; [4] - формалізація методів та алгоритмів моделювання руху структуризованих даних; [3, 6, 7, 12, 37, 42, 43] - розроблена концепція та теоретичні основи структуризації даних на основі кореляційних функцій та ентропійного підходу; [13, 18, 45, 47, 49, 68] - постановка задачі та розроблення методів та засобів цифрового опрацювання сигналів перехідних процесів у високовольтних лініях електропередач; [14-16, 46] - розроблення та застосування критерію оцінки структурної складності поліфункціональних даних; [37] - математичні положення цифрового опрацювання поліфункціональних даних; [14, 17, 20, 23, 24, 47, 48, 67, 51, 80] - розроблення

методу та функціоналу цифрового опрацювання структуризованих даних та реалізація способу побудови образно-кластеної моделі; [15, 76, 54, 58] - формалізація алгоритмів та структура пристрою визначення Хеммінгової віддалі; [50, 69] - застосування критерію оцінки структурної складності мікроелектронних реалізацій однорозрядних цифрових суматорів; [19] - модуль адаптивної системи дистанційного навчання; реалізація схемотехнічних рішень: [70, 71] - різницево-модульного квадратора; [21, 72-74] - компонентів структур двійкових суматорів; [46, 75] - паралельного АЦП з вихідними кодами у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона; [55, 77] - схемотехнічні рішення пристрою визначення ентропії; [78, 79] - схемотехнічні рішення комбінаційних суматорів; [52, 53, 57] – удосконалені структури алгоритмів сортування даних; [8, 56] – методи криптозахисту пікселів кольорових зображень у різних кодових системах; [59, 60] – удосконалення структур фреймів обміну даними, [25] – 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); Міжнародного симпозіуму "Питання оптимізації обчислень" (Київ, 2011, 2013, 2015, 2019); Міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень" (Ужгород, 2014, 2016); Міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства" (Івано-Франківськ, 2011, 2016, 2018); Всеукраїнської школи-семінару "Сучасні комп'ютерні інформаційні технології" (Тернопіль, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017); International conference "Intelligent data acquisition and advanced computing systems" (IDAACS) (2017); International conference "Advanced computer information technology" (ACIT) (Чеське Будейовіце, Чехія, 2018, 2019); Всеукраїнської конференції "Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту" (Ів.-Фр., 2018); Міжнародної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання" (Ів.-Фр., 2019).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 107 наукових праць. Основні наукові результати за темою дисертації опубліковані у 80 наукових працях., 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 у тезах, матеріалах міжнародних та національних конференцій.

**Структура дисертації.** 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.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність проблеми й викладено загальну характеристику роботи, визначено мету, об'єкт та предмет дослідження, сформульовано проблему й завдання дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, охарактеризовано елементи наукової новизни одержаних результатів, їх практичну значущість, висвітлено особистий внесок автора у наукових публікаціях у співавторстві, наведено дані про апробацію та структуру роботи.

**У першому розділі** проведений аналіз структурної та функціональної організації відомих моніторингових комп'ютеризованих систем, які тиражуються фірмами ABB, Motorola, F&F, SPM, Schenck, Yokogawa. Узагальненою характеристикою таких систем є їх універсальність та можливість адаптації до спеціалізованих властивостей об'єктів управління різних галузей промисловості. Такі системи орієнтуються на застосування однопроцесорних та багатопроцесорних багатоканальних універсальних контролерів з комутацією вимірювальних каналів. Застосування універсальних контролерів приводить до низької швидкодії опрацювання вимірювальних даних, що ефективно реалізується спецпроцесорами з високим рівнем розпаралелення та побудови комплексу інформаційних моделей станів об'єкта управління. Запропоноване в роботі застосування системи інформаційних моделей станів об'єктів управління та їх відображення образно-кластерними моделями (ОКМ) дозволяє успішно вирішити проблему підвищення ефективності функціонування такого класу систем.

З метою вирішення поставленої в роботі проблеми розвитку теорії, методології та удосконалення структур поліфункціональних обчислювальних засобів розроблена концепція структуризації даних. Дана концепція узагальнює класифікацію атрибутів, формалізацію процесів структуризації даних, методів формування та опрацювання структуризованих даних. Узагальнена схема функцій концепції структуризації даних представлена на рис.1.

В роботі показано узагальнені процеси структуризації інформаційних потоків джерел інформації (рис.2), де ДІ – джерело інформації, S - сенсорна система, # - процеси дискретизації у Хеммінговому просторі, FS - функціонал структуризації,  $F(U, \cap)$  - операції структурного об'єднання та розмежування.

У дисертаційній роботі на основі розвинутого структурного підходу, розробленої концепції структуризації ПФД здійснено застосування розроблених теоретичних засад та удосконалених методів у галузях інформаційних технологій: удосконалення засобів вимірювань та протоколів обміну даними на низових рівнях кіберфізичних систем, формування та опрацювання відеозображень, розвитку теорії та методів розпізнавання дорожніх знаків, спотворень гармонічних сигналів у електроенергетиці, моніторингу квазістаціонарних технологічних процесів та

побудови ОКМ, удосконалення мікроелектронних компонентів обчислювальних засобів.

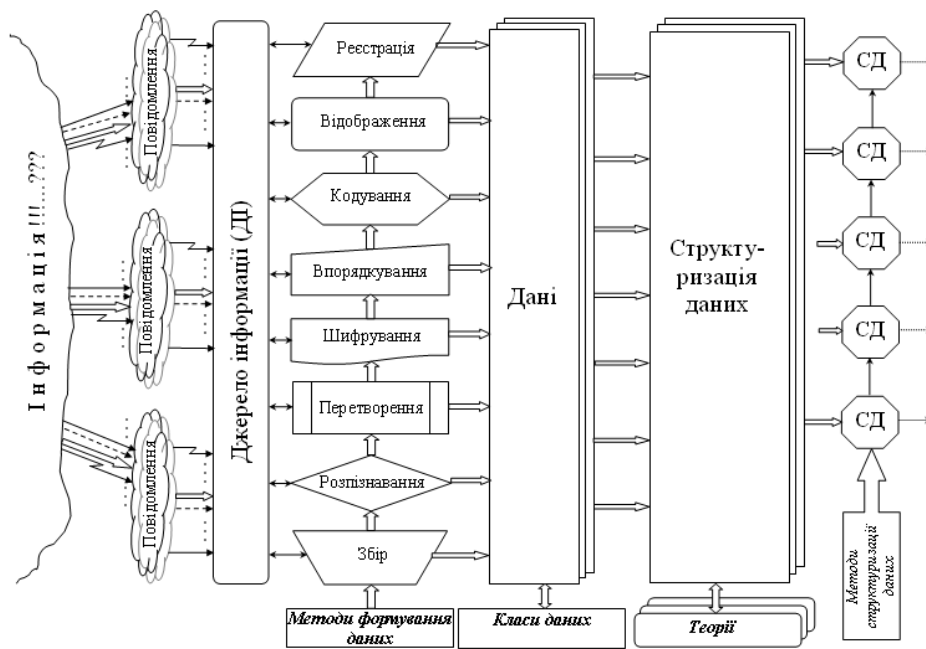


Рис.1 - Узагальнена схема функцій концепції структуризації даних.

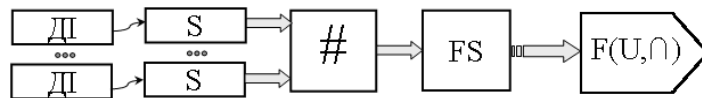


Рис.2 - Процеси структуризації інформаційних потоків.

Дослідження світового досвіду реалізації засобів формування структуризованих даних, методів аналого-цифрового перетворення потоків технологічних даних та методів організації руху даних у КФС показують, що подальше вдосконалення структур їх компонентів та характеристик апаратно-програмних засобів може бути успішно реалізовано завдяки: високому рівню паралелізму реєстрації та кодування технологічних даних багатоканальними поліфункціональними АЦП, які реалізують функції зниження надлишковості кодування даних, їх криптозахисту та захисту від помилок та використанню математичних основ новітніх теоретико-числових базисів (ТЧБ): Радемахера, Хаара, Крестенсона, Галуа та ін. для представлення даних у вигляді фреймів СД, максимально адаптованих до низових рівнів РКС та роботи в умовах інтенсивних промислових завод та кібератак.

Сформульовані завдання наукових досліджень у даній галузі, які дозволяють реалізувати актуальну потребу в розробці нових моделей, методів та технічних рішень для досягнення мети і виконання завдань даної наукової праці. Ці питання розкриті в наступних розділах дисертаційної роботи.

**У другому розділі** проаналізовані відомі критерії структурної складності поліфункціональних даних, які представлені аналітичними виразами:

$$k_c = \frac{V_k}{b_n + b_m}, \quad S_K = \sum_{i=1}^n X_i + \sum_{j=1}^m Y_j, \quad A_{II} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l A_{ijk}, \quad L = \sum_{i=0}^{m-1} (g_i + v_i) \approx (1/2 \dots 3/4)m^2,$$

$$\tau = \sum_{j=1}^m \tau_j, \quad S = -E \log_2 \frac{E}{n(n-1)}, \quad K_d = \frac{N_i}{N_0},$$

де  $k_c$  – складність мереж Петрі;  $S_K$  - за методом Квайна;  $A_{II}$  - за кількістю логічних елементів (М.А.Карцев, С.А.Майоров);  $g_i, v_i$  - довжина горизонтальних та вертикальних з'єднань (В.С.Глухов),  $S$  - згідно SH-моделі М.В.Черкаського;  $K_d$  - вузлів матричних моделей (Дж.Мартін).

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

Автором запропоновані оцінки функціонально-структурної ( $F_c$ ) та структурної ( $k_c$ ) складності схемотехнічних структур, графічних зображень та поліфункціональних даних:

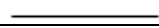



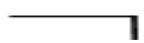
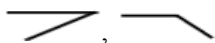




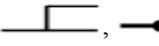

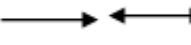



$$F_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \overline{f_{ij}}; \quad k_c = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i, \quad (1)$$

де  $f_{ij} = 1$  прямі,  $\overline{f_{ij}} = 2$  інверсні входи-виходи;  $P_i \in (l, P, x, d, r, h, z, b, c, i, n, a, f)$  - інформативні параметри атрибутів структур,  $\alpha_i$  - вагові коефіцієнти експертних оцінок структурної складності елементів та компонентів структурованих даних.

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

Автором запропонована систематизація елементів графічних зображень та експертних оцінок їх структурної складності  $\alpha_i$  (табл.1) на основі розробленої методики розрахунку структурної та інформаційної складності компонентів складних КФС.

Таблиця 1 - Систематизація експертних оцінок структурної складності компонентів структур РКС

№ п/п	Тип позначення елемента	Зміст елемента	Символи	$\alpha_i$	Символи	$\alpha_i$
1	$l$	Лінія		1		1,1
				1,5		1,2
2	$P$	Поворот		2		2,2
3	$x$	Пересічення		3		3,1
4	$d$	Дотик		2		2,2
5	$r$	Розгалуження		4; 4,2		6,2
6	$z$	Направлений зв'язок		2; 3		2,5
7	$b$	Літера	Aa...Яя, ..., Aa...Яя,	8-10	Aa...Zz, ..., Aa...Zz Aa...Zz, ..., Aa...Zz	8-10
	$c$	Цифра	1, 2, ..., 0, ...	4	1, 2, ..., 0	4
	$i$	Індекс	1, 2, ..., 0, а, А	4	1, 2, ..., 0, а, А	4
	$s$	Символ	©, ®, π, ψ, ω, &, %,	4	©, ☼, ♪, μ, \$, *, €, ...	4
	$n$	Знак	+, -, <, >, =, ±, ≡, ≈, ..	2	≠, ≤, ≥, (, ", {, !, ?, ...	2
8		Лог.елемент		11,2		11,6



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

$$k_e = K \cdot \frac{F_C}{k_c} = K \cdot \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \overline{f_{ij}} \right) / \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i \Rightarrow \max, \quad (2)$$

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

У даному розділі зроблено підхід до систематизації структур та класів квазістаціонарних джерел інформації в РКС, приклади зміни станів яких у реальному часі  $t$ , показані на рис.3.

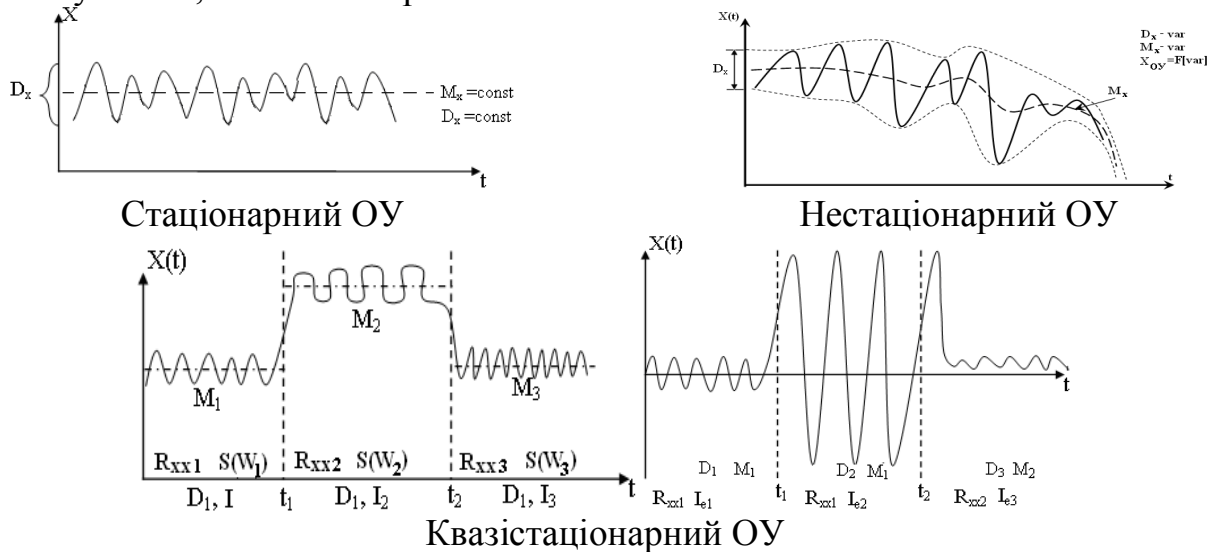


Рис.3 - Приклади зміни станів ОУ різних класів стаціонарності.

Запропонований функціонал для діагностування станів квазістаціонарних об'єктів управління та технологічних процесів:

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

Математичний опис атрибутів детально описані в п'ятому розділі дисертаційної роботи та автореферату.

Формалізація опису інформаційних характеристик об'єктів управління різного типу стаціонарності, з врахуванням обмежень процесу моніторингу станів ОУ, визначила можливість вибору кращих варіантів формування, перетворення, передання, опрацювання та використання поліфункціональних даних та інформаційних моделей ОУ, побудованих на їх основі.

Структуризація ПФД може виконуватися шляхом кодування структурних конгломератів даних у різних теоретико-числових базисах (ТЧБ): Унітарному, Хаара, Радемахера, Крестенсона та Галуа.

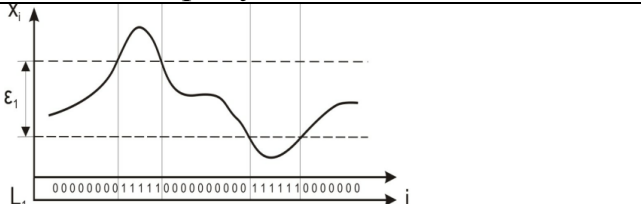
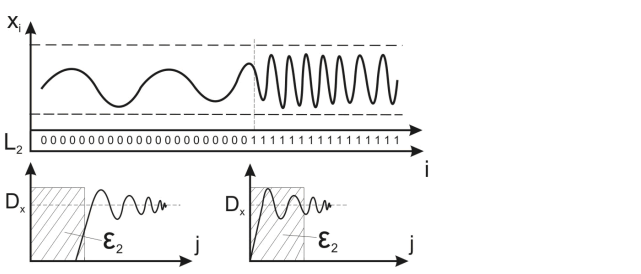
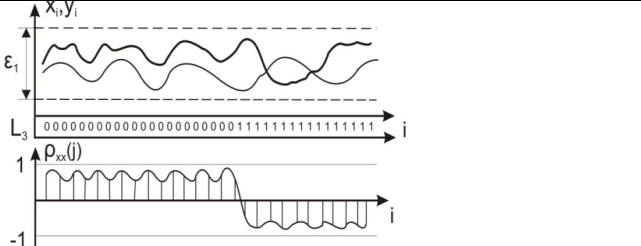
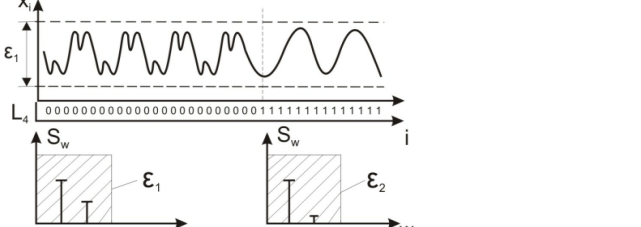
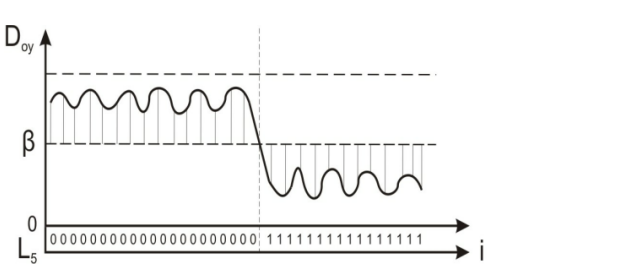
Ефективність запропонованого структурного підходу кодування та опрацювання поліфункціональних даних у різних ТЧБ підтверджено успішним вирішенням задач удосконалення структурних рішень компонентів КФС та методів цифрового опрацювання сигналів при ефективному кодуванні пікселів кольорових зображень, розпізнавання образів у Хеммінговому просторі, кореляційному та спектральному аналізі, розпізнавання збурень у високовольтних ЛЕП, моніторингу

стані квазістаціонарних об'єктів та ін.

Викладені теоретичні засади моніторингу відхилень технологічних процесів від норми шляхом кореляційного опрацювання структуризованих даних та логіко-статистичних інформаційних моделей (ЛСІМ) на їх основі, які приведені в табл.2.

Застосування ЛСІМ дозволяє суттєво (на 2-3 порядки) зменшити об'єми інформації, які в реальному часі поступають на сервери КФС. Такі інформаційні моделі ОУ складають базову основу структури характеристичного функціоналу моніторингу станів технологічних процесів та їх відображення на моніторах операторів у вигляді образно-кластерної моделі.

Таблиця 2 - 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> $L_3 = \begin{cases} 0, & \rho_{xy}(0) \geq 0 \\ 1, & \rho_{xy}(0) < 0 \end{cases}, \rho_{xy}(0) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sqrt{D_x \cdot D_y}}$	
<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 D_oy ЛСІМ-5</p> $L_5 = \begin{cases} 0, & D_{oy} > \beta \\ 1, & D_{oy} \leq \beta \end{cases}$ <p>0 &lt; beta &lt; 1 - коефіцієнт деградації ОУ</p>	

Запропонований метод кореляційно-ентропійного опрацювання структуризованих даних згідно теоретичних засад оцінки міри ентропії Р.Хартлі, К.Шеннона та Я.Николайчука:

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  $x_i^\circ = x_i - M_x$ ;  $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2$ ,  $M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^\circ \cdot x_{i+j}^\circ$ ,

$n$  – об'єм вибірки;  $m$  – кількість точок на інтервалі кореляції.

Приклад розрахунку структурної складності масивів оцифрованих даних, які характеризуються однаковими ймовірнісними характеристиками приведені на рис.4.

Формула ентропії за оцінкою Р. Хартлі є верхньою оцінкою і не враховує статистичні та динамічні характеристики ПФД. Тому розрахунок критерію структурної складності згідно оцінки ентропії Р. Хартлі є недостатньо інформативним. Розрахунок ентропії за оцінкою К. Шеннона враховує тільки ймовірнісні характеристики данких. Тому така оцінка не може бути застосована для розрахунку структуризації даних, які характеризуються різними статистичними, кореляційними та спектральними характеристиками.

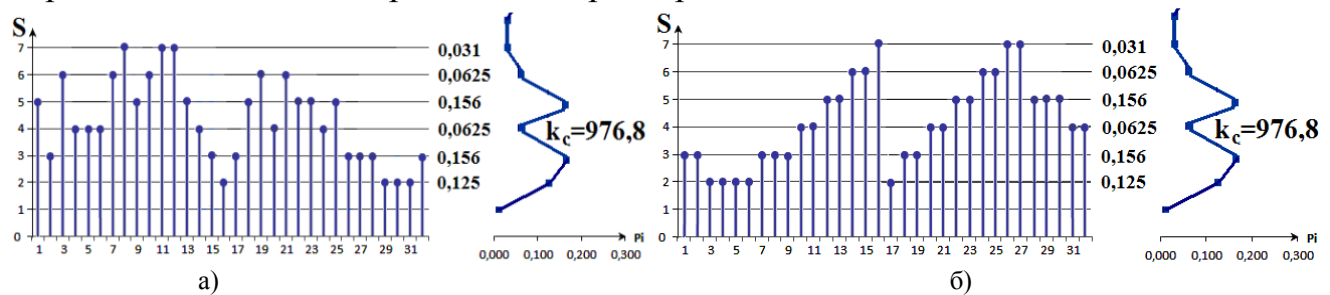


Рис.4 - Оцінка ентропії по К.Шеннону інформаційних джерел з однаковими ймовірностями та різними спектрами (а, б)

На основі приведених аналітичних виразів виконано розрахунок ентропії для ДІ, представлених масивами даних (рис.4), а його результати приведено на діаграмі (рис.5).

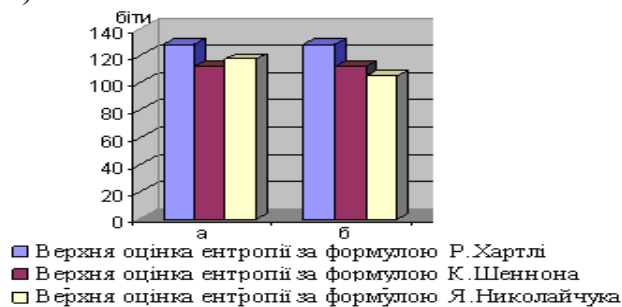


Рис.5 - Діаграма розрахунку ентропії.

Результати проведених досліджень склали основу синтезу високопродуктивних процесорів визначення ентропії з глибоким розпаралеленням обчислювальних процесів.

У третьому розділі визначено поняття вільного та діючих елементів кіберфізичних систем та методологія їх бінарних взаємодій.

Елемент у теорії складних систем є вільним, якщо у нього відсутні

Аналіз діаграми (рис.5) показує, що оцінка кореляційної міри ентропії реагує на зміну статистичних характеристик станів джерела інформації і наближається до його власної ентропії.

інформаційні, енергетичні, матеріальні чи управлінські зв'язки з іншими елементами складних систем та "зовнішнім середовищем" взагалі (рис.6). Визначено форми взаємодії елементів системи (ЕС) з R та С зовнішніми середовищами (табл..3)

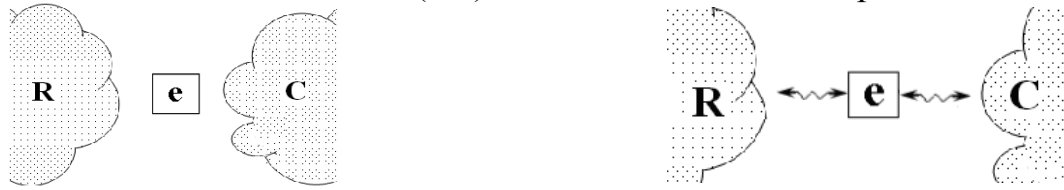


Рис.6 – Вільний та діючий ЕС (R, С відповідно середовище ресурсів та споживачів).

Таблиця 3 - 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

Систематизована сукупність діючих елементів, ядро яких взаємодіє не більш, ніж з одним атрибутом зовнішніх RC – середовищ (табл.4).

Таблиця 4 - Бінарні взаємодії активних ЕС

№	Пари взаємодії	Атрибути бінарних взаємодій ЕС $R \leftrightarrow e \leftrightarrow C$
1	$e \rightarrow C$	
2	$R \leftarrow e$	
3	$R \rightarrow e \rightsquigarrow C$	
4	$R \rightsquigarrow e \rightarrow C$	

В якості найменшого неділимого кванта структури графічно поданої інформації прийемо крапку чорного кольору або її зворотного білого зображення на чорному фоні (рис.7). Поняття структури формується з лінійної послідовності рівномірно або довільно віддалених квантів СС (рис.8), наступний елемент СД - просторовий (рис.9). Сукупність квантів СД лінійно поданих без розривів є елемент – лінія (рис.10) довжиною L.

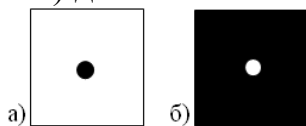


Рис.7 - Елементарна одиниця (квант) структури ПФД.



Рис.8 - Елементи СД побудовані з n-квантів S10 в U-ТЧБ.

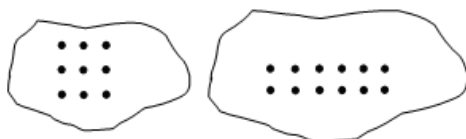


Рис.9 - Просторовий елемент СД

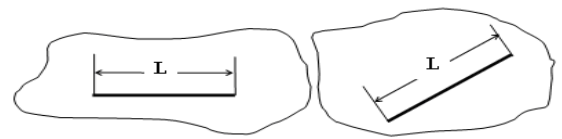


Рис.10 - Елемент СД – лінія

Для рішення даної проблеми виконано розробку методології формалізації бінарних взаємодій елементів систем виходячи з функціонального визначення

поняття та атрибутів міжелементних зв'язків згідно якої розроблено метод кодування пікселів кольорових зображень у двовимірному Хеммінговому просторі на основі кодів ТЧБ Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона.

Запропонований метод покращення структурної складності протоколів обміну даними на низових рівнях КФС шляхом врахування надлишковості вихідних двійкових кодів, які формуються на виходах АЦП при заданих класах точності сенсорів. Метод формування структур удосконалених протоколів досліджено у шостому розділі дисертаційної роботи та автореферату.

Запропоноване кодування пікселів кольорових зображень у Хеммінговому просторі монітора, заданому у декартових координатах, однозначним представленням у системі залишкових класів (СЗК) 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.5) згідно з виразом:

$$N_k = \text{res} \sum_{i=1}^3 b_i \cdot B_i \pmod{P_0},$$

де  $B_i$  - ортогональні базиси СЗК, які розраховують згідно з діофантовими рівняннями:  $B_1 = P_2 \cdot P_3 \cdot m_1 \equiv 1 \pmod{P_1}$ ;  $B_2 = P_1 \cdot P_3 \cdot m_2 \equiv 1 \pmod{P_2}$ ;  $B_3 = P_1 \cdot P_2 \cdot m_3 \equiv 1 \pmod{P_3}$ , де  $m_1, m_2, m_3$  — обернені елементи кодової системи СЗК,  $P_0 = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$  - 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.

Кодування пікселів кольорових зображень у стандарті RGB здійснюється 24-розрядним двійковим кодом, де інтенсивності кожного з кольорів представляють 8-бітними двійковими кодами базису Радемахера:

$$R; G; B \{r_{8-1}, g_{8-1}, b_{8-1}; \quad r_i, g_i, b_i; \quad r_0, g_0, b_0\}; \\ 0 \leq r_i \leq 255; \quad 0 \leq g_i \leq 255; \quad 0 \leq b_i \leq 255.$$

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  $P_0 = 5 * 7 * 8 = 280 > 255$ . При цьому формується наведена нижче кодова структура у базисі Радемахера-Крестенсона, яка однозначно представляє відповідний код RGB-пікселя:

$$R \vee G \vee B \{a_2, c_2, d_2; \dots a_1, c_1, d_1; \dots a_0, c_0, d_0\}; \\ P_1 = 5; \quad P_2 = 7; \quad P_3 = 8, \text{ де } a_i \in \overline{0,1}; \quad c_i \in \overline{0,1}; \quad d_i \in \overline{0,1}; \quad i \in \overline{0,2}.$$

Схема представлення RGB-пікселя у векторному просторі системи залишкових класів показана на рис.11.

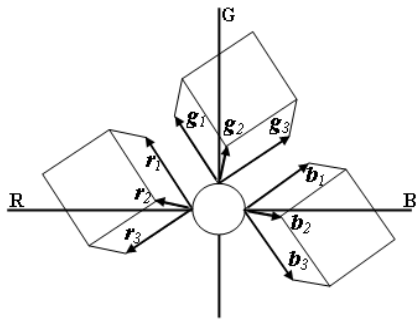


Рис.11 - Представлення RGB-пікселя у векторному просторі системи залишкових класів.

Представлення коду RGB-пікселя у базисі Хаара-Крестенсона для кожного значення інтенсивності  $r_i$ ,  $g_i$  та  $b_i$  виконується згідно з такою структурою:

$$R \vee G \vee B \{a_{P_1-1}, c_{P_2-1}, d_{P_3-1}; \dots a_i, c_i, d_i; \dots a_0, c_0, d_0\}$$

$$P_1 = 5; \quad P_2 = 7; \quad P_3 = 8,$$

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:

$$r_i = (10000..0001000..00100000); \quad g_i = (10000..0010000..00100000);$$

$$b_i = (00100..0010000..00000100).$$

Представлення цифрових значень яскравостей кольорів  $r_i$ ,  $g_i$  та  $b_i$  у базисах Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона зумовлює відповідно різну розрядність структур кодів згідно з виразами:  $K_R = \log_2 2^8 = 8$ ,

$$K_{R-C} = \sum_{i=1}^3 [\hat{E}(\log_2 P_i - 1)] = 9, \quad K_{H-C} = \sum_{i=1}^n P_i = 20 \text{ біт.}$$

З метою захисту зразків кольороутворення у стандартних мішенях запропонований метод хешування та бінарної згортки RGB-пікселів з псевдовипадковими послідовностями кодів поля Галуа. Розроблений метод, на відміну від існуючих, забезпечує підвищення на 2-3 порядки швидкодії опрацювання та розпізнавання зображень, що дозволило розробити відповідні високопродуктивні спецпроцесори опрацювання масивів відеоданих.

Застосування оцінок структурної складності компонентів символів дорожніх знаків дозволяє ефективно вирішити задачі автоматизованого розпізнавання символів дорожніх знаків у процесі руху автотранспортних засобів.

Приклад розрахунку структурної складності дорожніх знаків пріоритету наведений в табл.5.

Таблиця 5 - Оцінка структурної складності знаків пріоритету

2.1 Дати дорогу	2.2 Прізд без зупинки заборонено	2.3 Головна дорога	2.4 Кінець головної дороги	2.5 Перевага зустрічного руху	2.6 Перевага перед зустрічним рухом
$k_c = 7$	$k_c = 59$	$k_c = 19$	$k_c = 24$	$k_c = 9,2$	$k_c = 17$

Результати структурного аналізу дорожніх знаків дозволили розробити рекомендації їх удосконалення та збільшення оцінок Хеммінгової віддалі між ними, які передані управлінню поліції охорони Тернопільської обл. згідно акту впровадження.

**В четвертому розділі** виконаний аналіз структурних характеристик гармонічних сигналів при виникненні перехідних процесів у високовольтних лініях електропередач. У результаті класифіковані три види збурень у високовольтних електромережах, які потребують надійного релейного захисту: накиди, короткі

замикання, запуск потужних електроприводів. В результаті проведеного аналізу цифrogram перехідних процесів у високовольтних електромережах, зареєстрованих керувально-діагностувальною системою "Альтра", розробленою ІМСКОЕ побудовані часові діаграми випрямлених значень фазної напруги, струму та різниці фаз при накидах, коротких замиканнях та запуску ПЕД у високовольтних ЛЕП.

Аналіз відомих методів розпізнавання спотворень гармонічних сигналів на основі амплітудно-порогових характеристик, рандомізації та нейропроцесорів дозволив встановити ряд наступних функціональних обмежень та структурних недоліків:

- відомі методи реєструють тільки амплітудно-струмові факти наявності збурень гармонічних сигналів, але не дозволяють ідентифікувати типи збурень: накиду, короткого замикання та запуску ПЕД, які виникають у високовольтних електромережах;
- структурна організація спецпроцесорів, які реалізують метод рандомізації та метод на основі процесорів з нейрокомпонентами характеризуються складною апаратною складністю та низькою швидкодією.

Тому застосування таких методів та відповідних спецпроцесорів є неефективним при їх реалізації у якості компонентів засобів релейного захисту високовольтних електромереж.

На основі отриманих часових діаграм випрямлених значень характеристик збурень у високовольтних ЛЕП вперше запропонований інтегрально-диференціальний метод структуризованого розпізнавання та ідентифікації накидів, коротких замикань та запусків потужних електроприводів у високовольтних ЛЕП.

При виникненні накидів, коротких замикань та запусків потужних електроприводів спостерігаються наступні зміни характеристик гармонічних сигналів, що відповідає формалізації:

$$S_x = \begin{cases} \Delta\varphi = const \approx 0; \\ A_x(t) + \Delta A(t) = const; \\ S_{(\omega_i)} = const = 1. \end{cases}; S_x = \begin{cases} \Delta\varphi = var; \\ A_x(t) + \Delta A(t) = var; \\ S_{(\omega_i)} = var; i = var, \end{cases}; S_x = \begin{cases} \Delta\varphi = var; \\ A_x(t) + \Delta A(t) = const; \\ S_{(\omega_i)} = const = 1, \end{cases}$$

де  $\Delta\varphi$  - зміна фази;

$A(t), \Delta A$  - початковий стрибок та зміна амплітуди під час збурення;

$S_{(\omega)}$  - спектр.

Тобто, при виникненні накиду зсув фаз у електромережах практично не змінюється ( $\Delta\varphi = I_x = U_x \approx const$ ), при виникненні короткого замикання змінюється фаза, амплітуда та спектр сигналу, при запуску потужного електроприводу відбувається зміна амплітуди сигналу зі зсувом його фази без зміни форми (частотного спектру), амплітуди та енергії затухання сигналу

Задача розпізнавання збурення у ЛЕП успішно вирішена цифровим опрацюванням випрямлених гармонічних сигналів  $X_i = A_i \cos \omega_0 t$ .

Для виконання різницевого імпульсно-квадратичного методу необхідно рекурентно (у стековому режимі) запам'ятовувати однополярні 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 порівнювати ці



запам'ятовані значення з текучими відліками  $x_i$ . Тобто згідно схеми  $\rightarrow x_i \rightarrow x_{i-1} \rightarrow x_{i-2} \dots \rightarrow x_{i-j} \dots \rightarrow x_{i-n} \Rightarrow x_i - x_{i-n}$ .

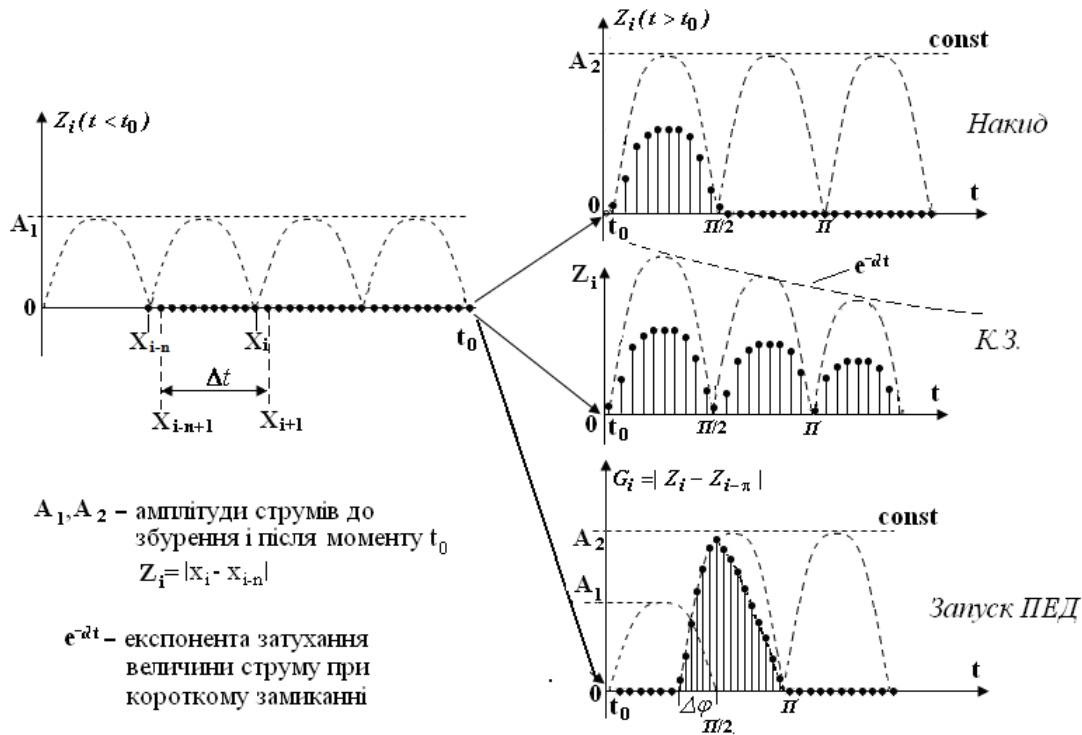
Це означає, що операція віднімання буде виконуватися над даними гармонічного сигналу у наступні моменти зміщені на  $\pi/2$ .

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.

При виникненні таких збурень у електромережах у результаті різницево-імпульсного опрацювання гармонічних сигналів в околі часу  $t_0$  отримаємо графіки, що показані на рис.12, де:  $A_1, A_2$  - 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, запуску ПЕД 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  $t \geq t_0$ ;  $P_{к.з.}$  - порогове значення ідентифікації коротких замикань та накидів (уставка), коли  $G_i^2 > P_{к.з.}$ , де  $G_i$  - модульна різниця між поточними та зсунутими значеннями  $Z_i$ .



Таким чином на основі запропонованого модульно-різницевого методу факт виникнення збурення в електромережі буде зареєстрований на інтервалі часу  $t_0 + \pi/2$ .

Рис.12 - Часова продукційна модель виявлення, розпізнавання та ідентифікації збурень в електромережах типу накиду, запуску ПЕД та короткого замикання.

З метою підвищення чутливості та дозволяючої здатності ідентифікації факту збурення на початковій стадії його розвитку на інтервалі часу  $t > t_0 + \pi/2$  запропонований інтегральний квадратично-імпульсний метод цифрового



опрацювання даних  $Z_i$  згідно виразів:

$$S_{KЗ} = \begin{cases} 1, Z_i^2 \geq P_{KЗ}; \\ 0, Z_i^2 < P_{KЗ}, \end{cases} \quad S_{ПЕД} = \begin{cases} 1, P_H \leq Z_i^2 < P_{KЗ}; \\ 0, P_{KЗ} \leq Z_i^2 < P_H, \end{cases} \quad S_H = \begin{cases} 1, 0 \leq Z_i^2 < P_H; \\ 0, Z_i^2 \geq P_{ПЕД}, \end{cases}$$

де  $P_{KЗ}, P_{ПЕД}, P_H$ , - порогові значення відповідно короткого замикання, запуску ПЕД та накиду.

Ілюстрація імпульсно-квадратичного порогового розпізнавання та ідентифікації збурень спецпроцесором продемонстрована на рис.13 графіками наростанням ідентифікаційної функції розвитку збурень в електромережах.

Верифікація розробленого методу здійснена шляхом комп'ютерного моделювання на основі імітаційних тестових та експериментальних сигналів.

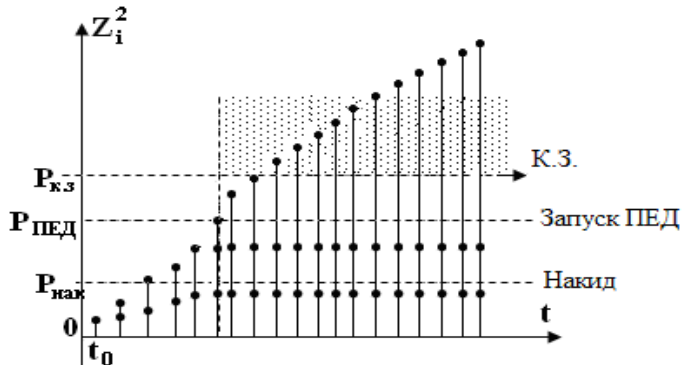


Рис.13 - Наростання ідентифікаційної функції розвитку короткого замикання в електромережах.

Запропонований метод розпізнавання збурень у високовольтних електромережах типу накидів, запусків ПЕД та коротких замикань ліг в основу розробки пристрою релейного захисту (патент 103938), структура якого приведена на рис.14.

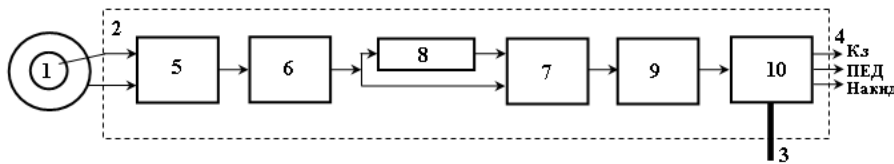


Рис.14 - Структурна схема запропонованого пристрою релейного захисту.

Пристрій релейного захисту (патент 103938) (рис.14) 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.

Базовим мікроелектронним компонентом такого пристрою є інтегруючий квадратор, структура якого показана на рис.15, який містить: 1 – перший інформаційний вхід; 2 –  $n$ -розрядний двійковий лічильник-регістр; 3 – комбінаційний двійковий суматор; 4 – регістр пам'яті на D-тригерах; 5 – вхід логічної "1"; 6 – другий вхід синхронізації пристрою; 7 – модуль стартової синхронізації; 8 – вхід кількості циклів накопичень  $k$ ; 9 – вхід порогового значення старту  $P_0$ ; 10 – модуль порівняння з пороговою уставкою 11 та формування вихідних керуючих сигналів; 12, 13, 14 – відповідно сигнальні виходи ідентифікації накиду, замикання на землю та 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.

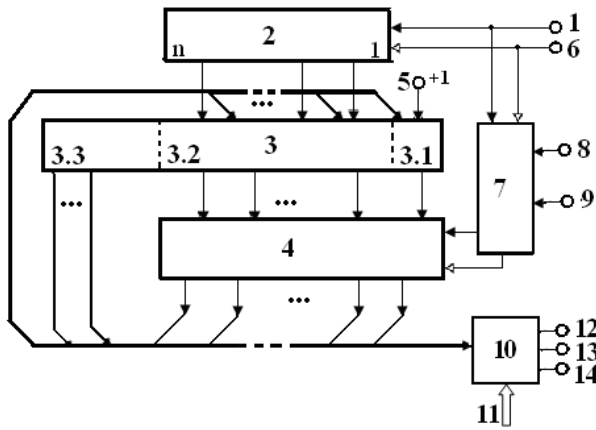


Рис.15 - Структура спецпроцесора обчислення порогового значення імпульсно-квадратичної функції  $S_i > P_0$ .

Розроблені схемотехнічні рішення компонентів дослідного взірця пристрою релейного захисту, який виготовлений та випробуваний, згідно розробленої та затвердженої замовником програми випробувань в лабораторних умовах. За результатами лабораторних випробувань скоректована структура пристрою релейного захисту, в якому додатково на вході АЦП введено змінний резистор, який дозволяє здійснювати налаштування порогів ідентифікації

збурень у високовольтних електромережах без комутації вихідних виводів накопичуючого суматора. Мікроелектронні компоненти пристрою, а саме багаторозрядний регістр зсуву та інтегруючий квадратор реалізовані на ПЛІС.

Результати проведених досліджень передані для впровадження ІМСКОЕ у промислових умовах на підприємствах обленерго та для захисту потужних електроприводів на Львівському державному заводі "Лорта".

**У п'ятому розділі** розв'язана актуальна задача покращення ефективності взаємодії оператора з комп'ютеризованою системою моніторингу технологічних процесів.

Розроблений метод побудови образно-кластерної моделі контролю квазістаціонарного технологічного процесу, в основу якого покладено запропонований спосіб контролю параметрів технологічного процесу (патент 107039). Реалізація методу здійснюється шляхом розрахунку комплексу інформаційних моделей об'єкта контролю згідно характеристичного функціоналу:

$$X_{ТП} = F(\{x_i\}, \{y_i\}, S, M_j, M_{xj}, M_{yj}, \sigma_x, \sigma_y, C_{xx}(j), R_{xy}(0), \rho_{xy}, L_1, L_2, L_3, M_x, M_y, M_{vx}, M_{vy}, L_4, P_{ij}, I_x), \quad (3)$$

де  $\{x_i\}, \{y_i\}$  - вимірювання параметрів технологічного процесу;  $S$  - ідентифікація квазістаціонарного стану технологічного процесу; визначення:  $M_j, M_{xj}, M_{yj}$  - ковзних статистичних характеристик математичного сподівання;  $\sigma_x, \sigma_y$  - середньоквадратичних оцінок дисперсії;  $C_{xx}(j)$  - структурної кореляційної функції;  $R_{xy}(0)$  - центрованої взаємкореляційної функції в нульовій точці між параметрами  $x_i, y_i$ ;  $\rho_{xy}$  - коефіцієнта нормованої взаємкореляції між кожною парою параметрів, на основі яких визначаються  $L_1, L_2, L_3, L_4$  - логіко-статистичні інформаційні моделі контролю відхилень від норми, відповідно по амплітуді ( $L_1$ ), по динаміці ( $L_2$ ), фазі ( $L_3$ ) та по спектру ( $L_4$ );  $M_x, M_y$  - вибіркові математичні сподівання;  $M_{vx}, M_{vy}$  - зважені ковзні математичні сподівання параметрів,  $n$  - об'єм вибірки,  $X_i, Y_i$  - цифрові значення масивів вимірюваних даних,  $V_{i-j}$  - цифрові

значення ковзної вагової функції,  $i, j$ -індекси ковзних значень цифрових відліків;  $D_x$  - дисперсія технологічного процесу,  $R_{xx}(j)$  - центрована автокореляційна функція параметра технологічного процесу;  $\textcircled{P_{ij}}$  - ймовірнісний стан норми,  $\boxed{P_{ij}}$  - ймовірнісний стан прогнозу різних видів передаварійних станів,  $P_{ij}$  - ймовірнісний стан аварії,  $i \in \overline{1, m}$ ,  $j \in \overline{1, n}$ ;  $m$  - число точок автокореляційної функції,  $\hat{E}[\bullet]$  - цілочисельна функція з округленням до більшого цілого,

$$\text{де } L_1 = \begin{cases} 0, a_1 < M_j < a_2 \\ 1, a_1 \geq M_j \geq a_2 \end{cases},$$

$$L_2 = \begin{cases} 0, b_1 < C_{xx}(j) < b_2 \\ 1, b_1 \geq C_{xx}(j) \geq b_2 \end{cases},$$

$$L_3 = \begin{cases} 0, 0 < \rho_{xy} < 1 \\ 1, 0 \geq \rho_{xy} \geq -1 \end{cases},$$

$$L_4 = \begin{cases} 0, S_1 < S_w < S_2 \\ 1, S_1 \geq S_w \geq S_2 \end{cases},$$

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad M_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i,$$

$$M_{vx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1+j}^{n+j} V_{i-j} X_{i+j},$$

$$M_{vy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1+j}^{n+j} V_{i-j} Y_{i+j}, \quad D_x = \sigma_x^2,$$

$$R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i \cdot \dot{x}_{i+j}, \quad \dot{x}_i = x_i - M_x,$$

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} P_{11} & \textcircled{P_{12}} & \dots & \boxed{P_{1j}} & \dots & P_{1n} \\ \boxed{P_{21}} & P_{22} & \dots & P_{2j} & \dots & \boxed{P_{2n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \textcircled{P_{i1}} & P_{i2} & \dots & \boxed{P_{ij}} & \dots & P_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1} & \boxed{P_{m2}} & \dots & P_{mj} & \dots & \textcircled{P_{mn}} \end{pmatrix},$$

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

$$C_{xx}(j) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i+j}^{m+j} (x_i - x_{i-j})^2, \quad j = \overline{0, m}; \quad \rho_{xy} = \frac{R_{xy}(0)}{\sigma_x \cdot \sigma_y},$$

$$\sigma_x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} (x_i - M_{xj})^2,$$

$$\sigma_y = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} (y_i - M_{yj})^2,$$

$$S_w = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \rho_{xx}(j) \cdot w_j \cdot e^{-\alpha \cdot j}, \quad \rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{D_x}.$$

Здійснення методу моніторингу станів квазістаціонарного технологічного процесу виконується на основі оцінок Хеммінгової віддалі шляхом порівняння поточних значень параметрів та моделей характеристичного функціоналу (3) з еталонними (заданими згідно стану "норми" ОУ) (таблиця 6).

Таблиця 6 - Приклад реалізації характеристик образно-кластерної моделі для різних станів технологічного процесу

Стан технологічного процесу	Параметри технологічного процесу									
	$\{x_i\}$	$\{y_i\}$	$S$	$M_j$	$M_{xj}$	$M_{yj}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	....	$I_x$
Еталон	•	•	•	•	•	•	•	•	....	•
Норма	+	+	+	+	+	+	+	+	....	+
Прогноз аварії	+	+	+	+	-	-	+	+	...	+
Аварія	+	+	+	-	-	-	-	-	...	-

Запропоноване структурне відображення образно-кластерної моделі (ОКМ) на

моніторі оператора, яке може бути адаптовано для окремих об'єктів та технологічних процесів, показано на рис.16.

На рис.16 структурно відображені наступні види контролю відхилень технологічного процесу у порівнянні з заданими уставками регуляторів технологічних параметрів: 1 –  $L_1, L_2, L_4$ ; 2 –  $I_x$ ; 3 –  $L_3$ ; 4 –  $(P_{ij})$ ; 5 –  $M_j$ ; 6 –  $M_{vx}, M_{vy}$ ; 7 –  $M_x, M_y$ .

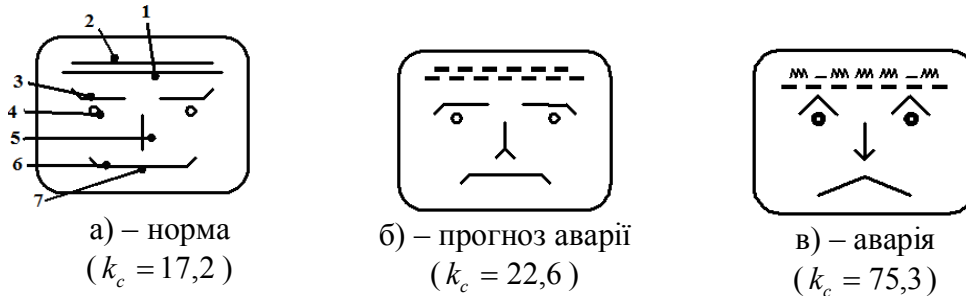


Рис.16 - Приклад структурного відображення образно-кластерної моделі станів технологічного процесу.

В роботі виконані розрахунки структурної складності аналітичних виразів характеристичного функціоналу та наведено приклад стилізованого зображення образно-кластерної моделі. Встановлено, що відображення стану технологічного процесу у вигляді ОКМ забезпечує зменшення структурної складності станів "норма", "розвиток аварії" та "аварія" відповідно у 105,2; 80 та 24 рази у порівнянні з аналітичним представленням характеристичного функціоналу.

В роботі розроблена програма та здійснена верифікація алгоритмів побудови ОКМ для відображення станів технологічних процесів високовольтної електричної підстанції на експериментальних сигналах згідно аналітичних виразів моделей характеристичного функціоналу (3).

Запропонована математична база побудови та відображення ОКМ дозволяє підвищити швидкодію реакції операторів на виникнення нештатних ситуацій на контрольованих об'єктах та на 2-3 порядки зменшити об'єми бази даних.

**У шостому розділі** запропоновані нові структурні рішення базових міроелектронних компонентів обчислювальних засобів кіберфізичних систем.

Запропоновані структури високопродуктивних АЦП з вихідними паралельними кодами у базисі Радемахера (патент 116176) та Хаара-Крестенсона (рис.17), де застосовані парафазні компаратори, що дозволило замінити структурно складні логічні елементи "Виключаюче АБО", що містять 4-5 вентилів, логічними елементами "І-НЕ".

Результати порівняння їх системних характеристик, при розрядності АЦП 10 біт, розраховані в дисертаційній роботі та приведені на діаграмах (рис.18).

Однорозрядні неповні та повні суматори є базовими компонентами операційних пристроїв обчислювальної техніки, кількість яких у структурах кристалів може складати 3-6 порядків. Тому удосконалення системних характеристик двійкових суматорів та досягнення їх гранично мінімальної структурної, апаратної та часової складності є актуальною науково-прикладною задачею.

Запропоновано удосконалення структурної складності логічного елемента

"Виключаюче АБО" на основі логічного елемента "Виключаюче І", що привело до граничного спрощення його структурної та апаратної складності у 2 рази з гранично мінімальною затримкою сигналів 1 мікротакт.

На основі застосування такого елемента запропоновані структури однорозрядних неповних та повних двійкових суматорів з комутованими прямими, парафазними та інверсними вхідно-виходами з гранично мінімальною затримкою сигналів суми та переносів 1 мікротакт, які захищені патентами України №109136, №109142, №124563, що дозволило значно покращити системні характеристики багаторозрядних суматорів, матричних перемножувачів та інших універсальних та спецпроцесорних компонентів обчислювальної техніки.

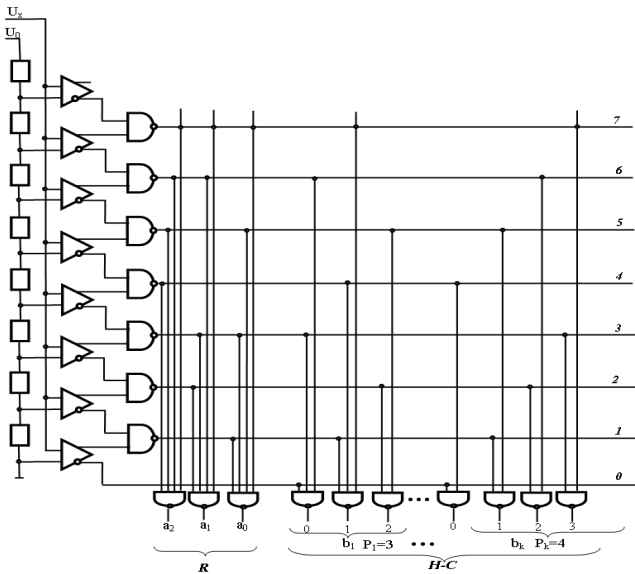


Рис.17 - Структура поліфункціонального АЦП паралельного типу з вихідними кодами у базисі Радемахера та Хаара-Крестенсона.

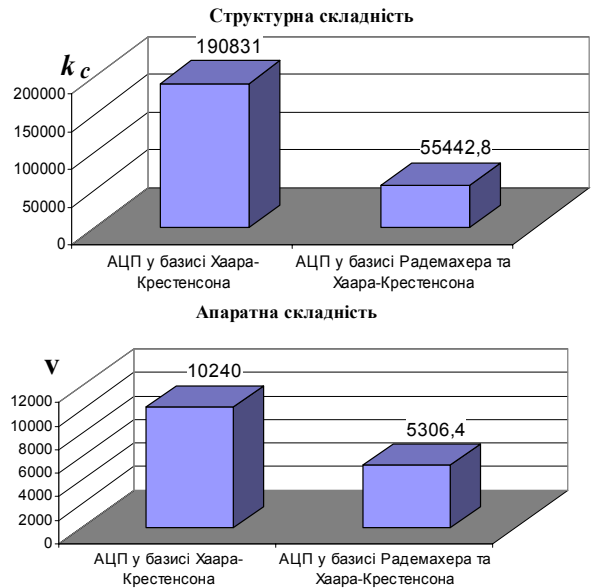


Рис.18 - Порівняльні оцінки системних характеристик АЦП

Розроблена структура багаторозрядного комбінаційного суматора пірамідального типу з однофазними інформаційними зв'язками показана на рис.19 (патент 115751), в якій застосовані удосконалені структури однорозрядних неповних суматорів з прямим та інверсним виходами переносів на основі логічних елементів "Виключаюче І" (рис.20).

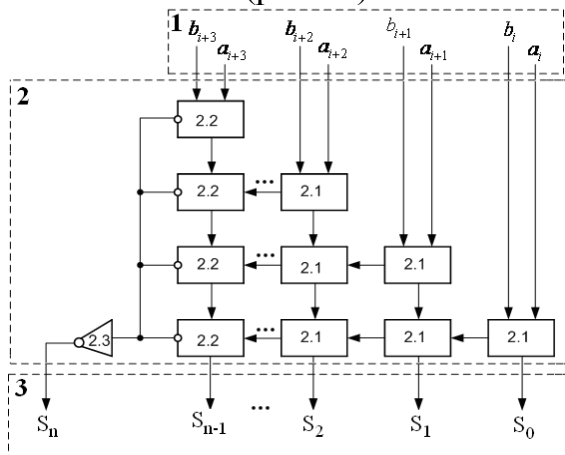


Рис.19 - Структурна схема комбінаційного суматора.

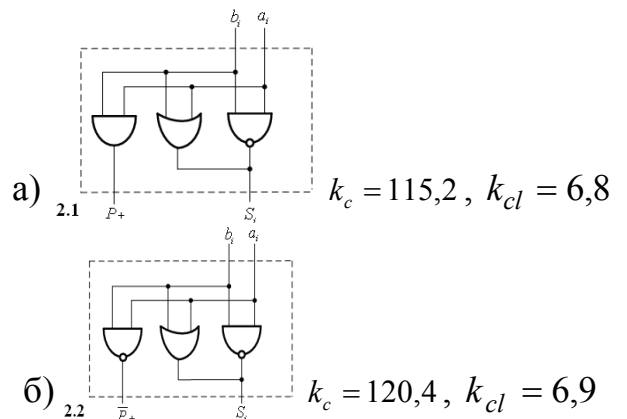


Рис.20 - Спрощені структури однорозрядних неповних суматорів на логічних елементах "Виключаюче І".

Графіки зміни оцінок апаратної та структурної складностей запропонованих комбінаційних суматорів на основі логічних елементів "Виключаюче І" у залежності від розрядності вихідних кодів у порівнянні з відомим суматором на логічних елементах "Виключаюче АБО" показані на рис.21, 22.

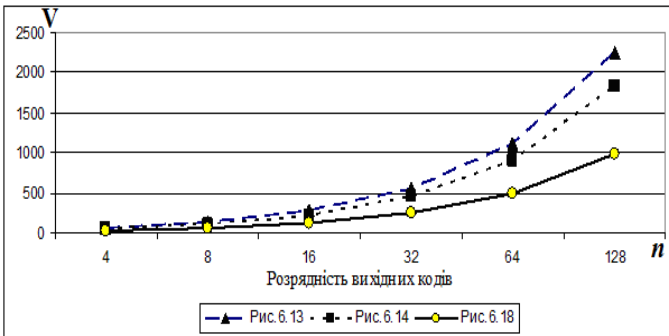


Рис.21 - Порівняльні характеристики зміни апаратної складності комбінаційних суматорів у залежності від розрядності вихідних кодів.

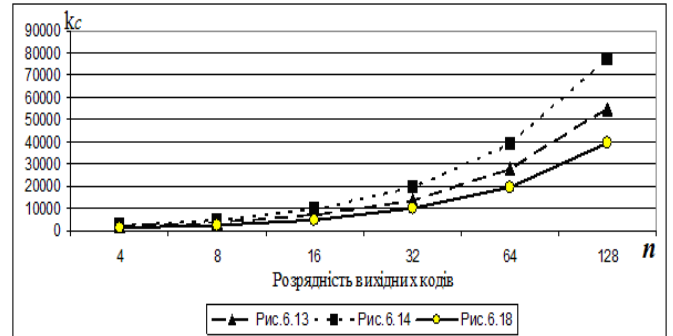


Рис.22 - Порівняльні характеристики оцінок структурної складності комбінаційних суматорів у залежності від розрядності вихідних кодів.

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.

Розроблена структура удосконаленого багаторозрядного суматора з прискореним переносом (патент 117572) для 4-розрядних розмежованих модулів ( $m = 4$ ) ілюструється рис.23.

Порівняльні діаграми характеристик структурної та часової складності удосконаленого та відомого суматора з прискореним переносом у залежності від їх розрядності показані на діаграмах (рис.24).

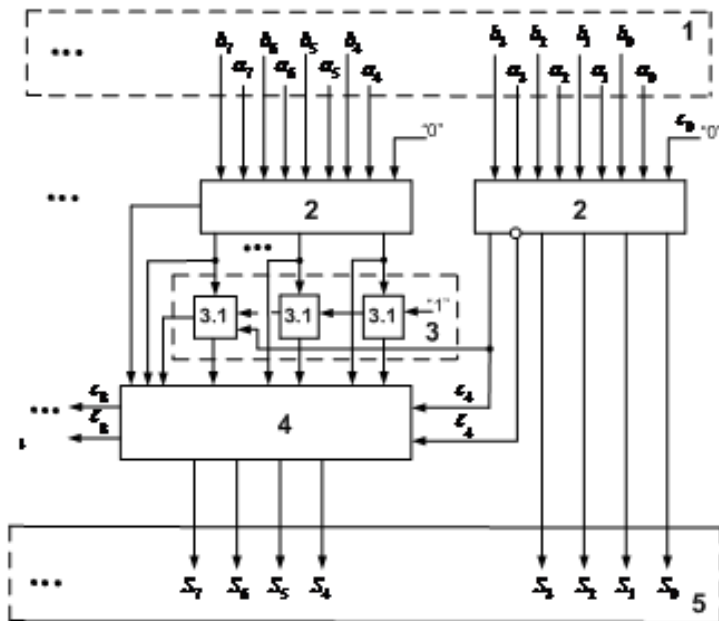


Рис.23 - Структура удосконаленого суматора з прискореним переносом.

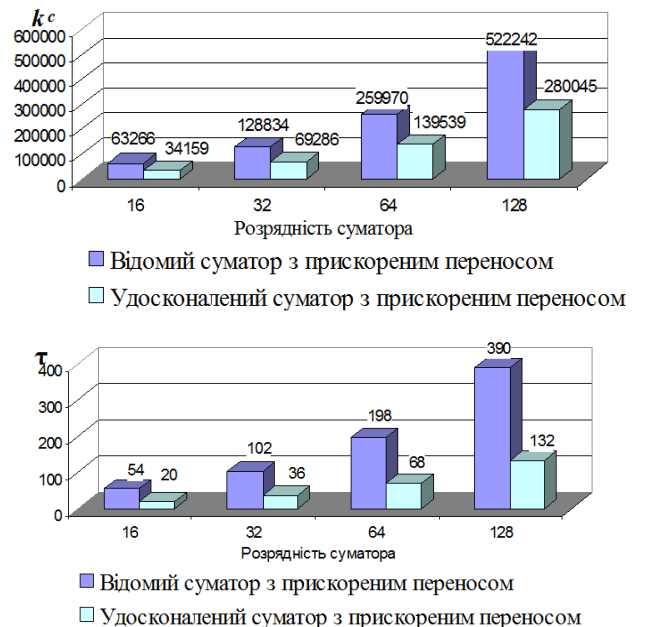


Рис.24 - Порівняльні діаграми системних характеристик удосконаленого та відомого суматора з прискореним переносом.



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 1,86 разів; апаратна складність зменшена у 1,96 разів; швидкодія підвищилася у 2,95 рази.

Розроблені структури високопродуктивних спецпроцесорів перемножувача (патент 107811) (рис.25) та різницево-модульного квадратора (патент 132145) (рис.26) у базисі Хаара-Крестенсона.

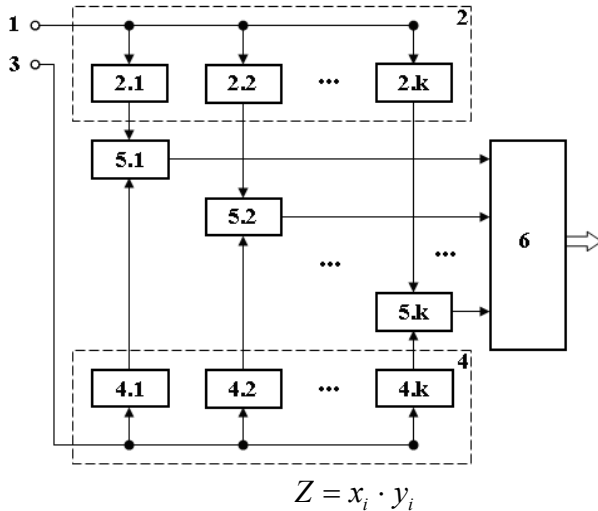


Рис.25 – Структурна схема множильного пристрою в базисі Хаара-Крестенсона.

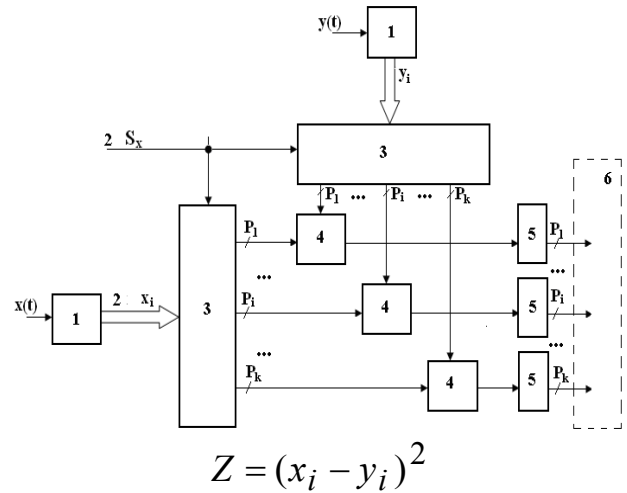


Рис.26 - Структурна схема різницево-модульного квадратора в базисі Хаара-Крестенсона.

Структурною перевагою таких спецпроцесорів є застосування модульних матриць додавання та перемноження на основі логічних елементів "І-НЕ", які забезпечують виконання операцій додавання та множення незалежно від розрядності вхідних кодів з затримкою сигналів на 2 мікротакти.

Перемножувач унітарних кодів у базисі Хаара-Крестенсона характеризується підвищеною на 1 порядок швидкістю 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 "І-НЕ".

Структурна складність множильного пристрою визначається сумарною оцінкою складностей лічильника на D-тригерах ( $k_{cE}$ ), матриці модульного перемноження ( $k_{cMP}$ ) та шифратора ( $k_{cШ}$ ) згідно виразу:  $k_c = k \cdot (2k \cdot k_{cЛ} + k_{cMP}) + k_{cШ}$ .

Структурна складність перемножувачів та різницево-модульних квадраторів у базисі Хаара-Крестенсона за рахунок зростання розрядності кодів Хаара у порівнянні з розрядністю кодів Радемахера зростає практично у 2 рази.

Загальна затримка сигналів у різницево-модульному квадраторі, незалежно від розрядності вхідних чисел, складає:  $\tau_2 = 4 + 2 + 1 + 1 = 8\upsilon$ , що в порівнянні з відомим пристроєм, при кодуванні вхідних чисел в діапазонах 8-24 розряди підвищення швидкодії відповідно складає 10,7-28,75 разів.

Матричні перемножувачі широко використовуються у якості співпроцесорів персональних комп'ютерів та спецпроцесорів статистичного, кореляційного та

спектрального аналізу. Запропонована структура швидкодіючого матричного перемножувача (рис.27) на основі однорозрядних повних двійкових суматорів з комутованими парафазними входами та виходами, які забезпечують гранично мінімальну затримку сигналів суми та переносів 1 мікротакт на відміну від відомих структур матричних перемножувачів, де затримка сигналів суми та переносу складає відповідно 6 та 3 мікротакти.

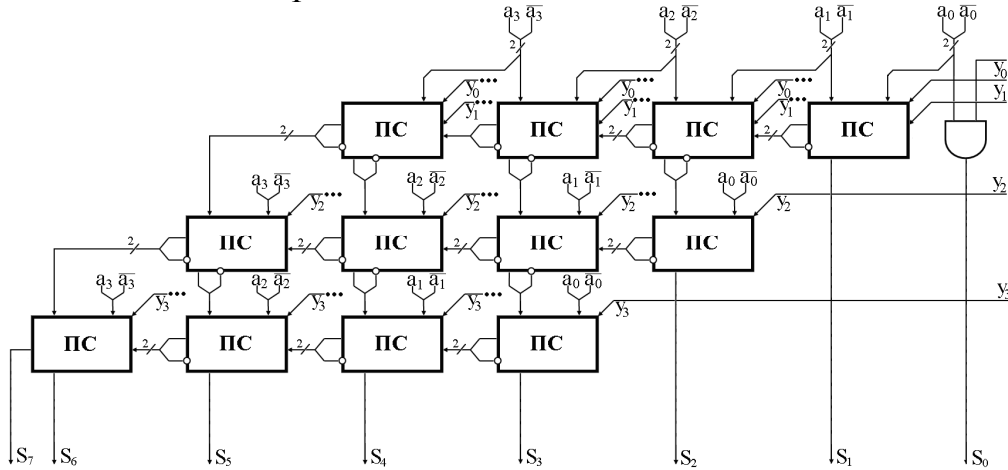


Рис.27 - Структура матричного перемножувача на основі комутованих парафазних однорозрядних суматорів

Загальна затримка сигналів матричних перемножувачів у залежності від розрядності вхідних двійкових чисел розраховується згідно виразу:  $\tau = n \cdot \tau_{++} + (n-1) \cdot \tau_s$ , де  $\tau_{++}$  та  $\tau_s$  - відповідно затримки сигналів переносу та суми. Для відомих матричних перемножувачів  $\tau_{++} = 3$ ,  $\tau_s = 6$  мікротактів, а у запропонованому матричному перемножувачі  $\tau_{++} = \tau_s = 1$  мікротакт. Таким чином підвищення швидкодії розробленого перемножувача у порівнянні з відомими, при розрядності вхідних кодів у діапазоні 32-1024 біт – перевищує 4 рази.

Автором запропоновано новий потоковий алгоритм виконання операції множення і структура потокового перемножувача, яка показана на рис.28.

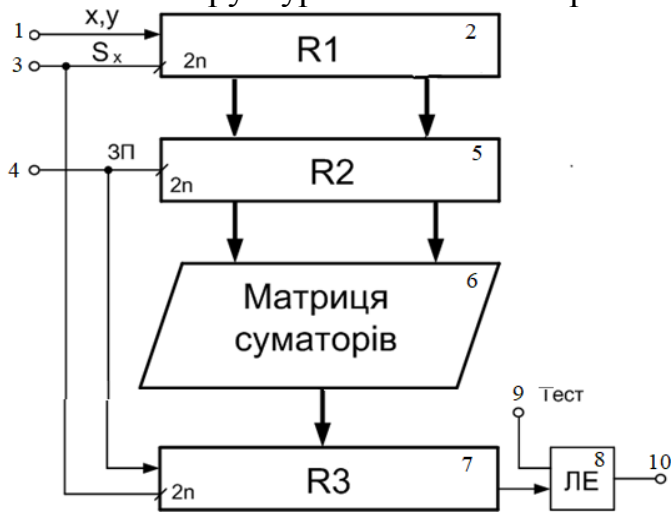


Рис.28 - Структура потокового перемножувача двійкових чисел.

Принцип роботи потокового перемножувача полягає у розпаралеленні процесів запису, перемноження та зчитування даних. При цьому затримка сигналів у вхідному та вихідному регістрах пам'яті пристрою  $((2n \cdot \tau_T) + \tau_T)$ ,  $\tau_T = 2$ . Тобто при зміні розрядності потокового перемножувача у діапазоні (128 ÷ 2048біт), часова затримка сигналів у регістрах вводу-виводу відповідно складає  $(2 \cdot (128 \div 2048) \cdot 2 = 512 \div 8192)$  мікротактів.

В дисертаційній роботі розрахована структурна складність потокового



перемножувача у залежності від розрядності перемножуваних чисел 128-2048 біт.

В результаті проведених досліджень отримано порівняльну діаграму структурної складності потокового перемножувача з матричним перемножувачем, яка показана на рис.29.

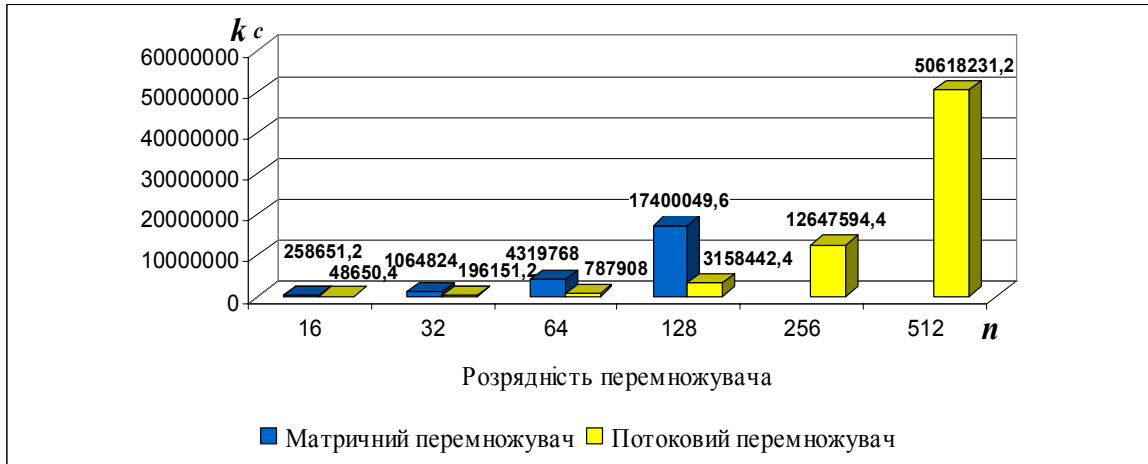


Рис.29 - Діаграма зміни структурної складності потокового перемножувача в залежності від розрядності перемножуваних двійкових чисел.

У запропонованому потоковому перемножувачі досягнута гранично мінімальна структурна складність вхідної та вихідної шин, яка, у порівнянні з відомими пристроями, зменшена у  $4n/2$  рази. Тобто при розрядності вхідних чисел  $n=512-2048$  згідно критерію Квайна складає 1024-4096 рази.

У загальному випадку зменшення структурної складності вхідно-виходів мікроелектронних чіпів потокового перемножувача у порівнянні з матричним перемножувачем складає  $4n/5$  разів, тобто при розрядності вхідних чисел 512, 1024, 2048 згідно критерію Квайна складає 409,6, 819,2, 1638,4 разів

Розроблений спецпроцесор характеризується розширеними функціональними можливостями за рахунок введення у його структуру логічного елемента "Виключаюче І", що дозволяє тестувати правильність виконання операції множення багаторозрядних чисел, а також реалізувати криптозахист вихідних кодів шляхом модульного додавання до вихідних кодів багаторозрядних псевдовипадкових послідовностей Галуа.

Автором запропоновано новий пристрій визначення Хеммінгової віддалі (патент 127093) 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:  $Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$ , де  $i \in \overline{1, n}$  – об'єм вибірки цифрових кодів;  $x_i$  та  $y_i$  – вхідні оцифровані аналогові сигнали  $x(t)$  і  $y(t)$ .

В основу роботи пристрою визначення Хеммінгової віддалі покладено застосування паралельних унітарних кодів та кодів Хаара, які формуються на виходах АЦП паралельного типу. У порівнянні з реалізацією такого пристрою на основі унітарних кодів досягнуто підвищення швидкодії у  $2^k/k$  рази, де  $k$  – розрядність АЦП паралельного типу, та зменшення структурної складності на 1-2

порядки.

Спецпроцесори визначення ймовірнісної ентропії широко застосовуються у безпроводних комп'ютерних системах з високою швидкістю передавання даних у якості цифрових приймачів ентропійно-маніпульованих сигналів. Тому в РКС реального часу обчислення ентропії повинно виконуватися з максимальною швидкістю, що визначає актуальність розробки та створення відповідних спецпроцесорів визначення ентропії.

Запропоноване автором в патенті №121046 підвищення швидкодії у 2,65 рази, регулярності структури та зменшення апаратної складності пристрою визначення ентропії, досягнуто шляхом застосування компонента АЦП паралельного типу з інверсним вихідним кодом Хаара та вилученням зі структури відомого пристрою комутатора (рис.30).

Пристрій визначення ентропії здійснює розрахунок ймовірнісної ентропії на основі вихідних кодів Хаара, які формуються на виходах паралельного АЦП з парафазними компараторами з затримкою сигналів на 2 мікротакти, містить: 1 – АЦП; 2 – інформаційний вхід пристрою, 1.1 – група взірцевих резисторів, 1.2 – компаратори з парафазними виходами(прямим та інверсним), 1.3 – логічні елементи І-НЕ, 3 – лічильники, 4 – синхронізатор; 5 – шифратори, 6 – пірамідальний суматор, 7 - вихід пристрою.

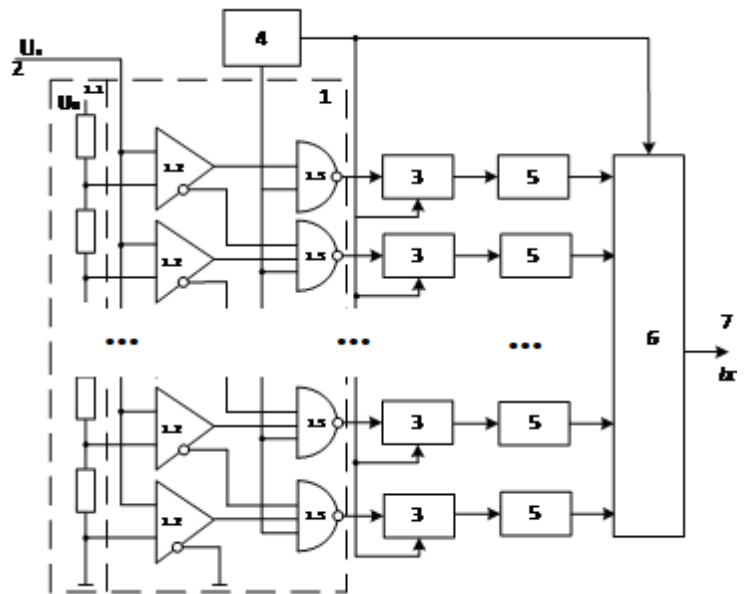


Рис.30 - Структурна схема удосконаленого пристрою визначення ентропії.

В роботі здійснена реалізація розроблених спецпроцесорів та їх компонентів в мікроелектронному виконанні системою генерування програмних моделей обчислювальних пристроїв IP Core Generator, розроблених фірмою ALDEC, вбудованих в середовище Active-HDL мовами VHDL та Verilog на основі їх конфігурованих моделей. В якості кристалів застосовані ПЛІС сімейства Artix-7 кристал xc7a100tcsq324-1 фірми Xilinx в системі Vivado.

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА 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 основі аналізу структур та функцій існуючих моніторингових комп'ютеризованих систем **вперше запропоновано** науково-обґрунтовану

методологію та концепцію структуризації поліфункціональних даних, яка 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 та інформаційно-структурної складності поліфункціональних даних, що дозволило формалізувати аналіз та покращити результати синтезу системних характеристик удосконалених компонентів РКС.

3. **Вперше розроблено** теоретичні основи методів структуризації ПФД у теоретико-числових базисах (ТЧБ): Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона.

4. **Вперше розроблено** метод визначення кореляційної ентропії станів квазістаціонарного об'єкта, що дозволило розширити функціональні можливості визначення та уточнення статистичних та спектральних характеристик джерела.

5. **Вперше розроблений** метод перетворення кодів RGB-пікселів кольорових зображень шляхом їх кодування у базисах Крестенсона та Хаара-Крестенсона, що у порівнянні з існуючим методом в базисі Радемахера, дозволяє перевести коди пікселів з трьохвимірної кодової системи в одновимірну.

6. **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 вихідних кодів з багаторозрядними псевдовипадковими біт-орієнтованими послідовностями Галуа.

7. **Вперше запропоновано** метод інтегрально-диференціального опрацювання гармонічних сигналів, 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.

8. **Вперше запропонований** метод моніторингу станів квазістаціонарного об'єкта на основі характеристичного функціоналу параметрів технологічного процесу та побудови образно-кластерної моделі, що дозволило підвищити ергомічність та швидкодію реакції операторів КС при виникненні нештатних ситуацій.

9. **Вперше розроблено** та реалізовано у мікроелектронному виконанні швидкодіючий АЦП паралельного типу з вихідними кодами в базисах Радемахера та Хаара-Крестенсона зі зменшеною структурною складністю у 5,1 разів, інформаційно-структурною – у 6,2 рази, підвищенням швидкодії - у 2,25 рази, зменшенням апаратної складності при різних наборах модулів у 8-14 разів у порівнянні з відомими структурами.

10. **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 прискореними переносами, які у порівнянні з відомим суматорами названих класів дозволили досягнути гранично мінімаксних характеристик структурної,

функціональної, апаратної та часової складності.

11. **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 швидкістю, 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 mod 2 вихідних кодів з багаторозрядними псевдовипадковими послідовностями.

12. **Вперше розроблено** пристрій для визначення ентропії згідно інформаційної міри К.Шеннона, в якому досягнуто покращення регулярності структури зі зменшенням структурної складності у 31,86 рази, апаратної складності - у 5,78 разів, підвищенням швидкодії - у 2,65 рази.

13. **Вперше розроблена** структура мікроелектронного пристрою 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.

14. **Удосконалені** структури протоколів обміну даними в мережах низових рівнів кіберфізичних систем шляхом використання надлишкових кодів на виходах АЦП при різних класах точності сенсорів, що дозволило підвищити заводо захищеність кодів фреймів у порівнянні зі стандартними протоколами HDLC, вилучити операцію "біт-стаффінг" та ліквідувати випадкові зміни кількості бітів у пакетах даних;

15. **Удосконалено метод** синтезованого формування алфавітно-цифрових даних на основі малогабаритної клавіатури, яка містить 16 клавіш, що у порівнянні з відомими QWERTY-клавіатурами ПК, дозволило у 8 разів зменшити кількість клавіш, а також забезпечило криптозахист при передаванні алфавітно-цифрових даних.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Возна Н.Я.** Структуризація поліфункціональних даних: теорія, методи та засоби / **Н.Я.Возна** // Монографія. – Тернопіль: ТНЕУ, 2018. – 378 с.
2. **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. – С.199-288.
3. **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.
4. 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.

5. Methods of effective protection of information flows / **Natalia Vozna** and others / edited by Valeriy Zadiraka, Yaroslav Nykolaichuk. - Ternopil: Terno-graf, 2014.- 308 p.
6. 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.
7. Метод структуризации дискретного косинусного преобразования Фурье в модульной арифметике теоретико-числового базиса Хаара–Крестенсона / Николайчук Я.Н., **Возна Н.Я.**, Круликовский Б.Б., Пих В.Я. // Кибернетика и системный анализ, 2018. – том 54, №3. - С.178-188 (*Scopus, Web of science*)
8. **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, Web of science*).
9. **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". ИПШ МОН і НАН України "Наука і освіта". – 2009. - №1. – С.26-34.
10. **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.
11. 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.
12. Методи спектрального косинусного перетворення Фур'є для розпізнавання сигналів у Хеммінговому просторі на основі різних кореляційних функцій та теоретико-числових базисів / Я. Николайчук, В. Пих, Т. Заведюк, **Н. Возна** // Вісник національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі». — 2013. — №773. — С. 89-98.
13. Метод розпізнавання та ідентифікації накидів та замикань на землю у високовольтних лініях електропересялень / **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.
14. 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
15. **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.
16. Круликовский 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.

17. 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.
18. 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
19. 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.
20. **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.
21. 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.
22. 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.
23. 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. ISSN 2304-7399.
24. **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.
25. 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.
26. **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.

27. **Возна Н.Я.** Формалізація моделей руху даних розподілених комп'ютерних систем та оцінювання їх структурної складності / **Н.Я.Возна** // Вісник Тернопільського національного технічного університету ім.І.Пулюя – 2011. - №1. Т.16. – С.167-179.
28. **Возна Н.Я.** Інформаційні технології формування техніко-економічних даних для об'єктів управління різних класів стаціонарності // Міжнародний науково-технічний журнал “Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології”. - 2011. - №2(22). - С. 74-78.
29. **Возна Н.Я.** Основи теорії структуризації поліфункціональних елементів складних систем / **Н.Я.Возна** // Вісник Хмельницького національного університету.- Хмельницький, 2015.- №2 (223) - С.204-208.
30. **Возная Н.Я.** Теоретические основы структуризации полифункциональных данных в различных теоретико-числовых базисах // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. - Baku. Azerbaijan, 2015. - Volume 3, № 1. - P.62–70.
31. **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.
32. **Возна Н.Я.** Теоретичні засади методу оцінки ентропії структуризованих поліфункціональних даних // Вісник національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі». - 2016. - №857. - С.17-28.
33. **Возна Н.Я.** Метод розпізнавання оптичних зображень у Хеммінговому просторі на основі критерію структурної складності // Інформатика та математичні методи в моделюванні – Одеса, 2017. - Том 7, №4. – С.339-348.
34. **Возна Н.Я.** Аналіз та обґрунтування вибору багатоканальних аналого-цифрових кодерів технологічних даних на низових рівнях РКС // Поступ в науку. Збірник наукових праць Буцацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач. – 2009. - №5. Т1. – С.134-138.
35. **Возна Н.Я.** Теорія та методологія побудови клавіатур вводу даних комп'ютерних систем // Поступ в науку. Збірник наукових праць Буцацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач. – 2010. - №6. Т1. – С.61-66.

**Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

36. **Vozna N.** Information Technology Traffic Data in the Banking System Based on Multi-matrix Models / **Natalia Vozna**, Alina Davletova, Igor Pituh // Матеріали X Міжнародної конференції Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій комп'ютерної інженерії.- TCSET'2010.- Львів-Славсько.- С.267.
37. **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 (*Scopus, Web of science*).
38. Information technologi distribution designing computer systems based on models of

- data traffic / Yaroslav Nykolaychuk, Igor Pituh, **Natalia Vozna**, Yuriy Franco // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції CADSM 2011.- Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2011 – С.200 (*Scopus*)
39. **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.
  40. 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 (*Scopus*).
  41. **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.
  42. 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.
  43. **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
  44. 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 (*Scopus, Web of science*).
  45. Ідентифікація структуризованих даних на основі нелінійного квадратично-імпульсного перетворення / **Н.Я. Возна** [та ін.] // Праці VII міжнародної школи-семінару "Теорія прийняття рішень" – Ужгород, УжНУ, 2014.-с.60-61.
  46. 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 (*Scopus, Web of science*).
  47. Image-cluster Method of Data Structuring of Multiparameter 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 (*Scopus, Web of science*).
  48. **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.
  49. 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 (*Scopus, Web of science*).

50. 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 (*Scopus, Web of science*).
51. 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 (*Scopus, Web of science*).
52. 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 (*Scopus, Web of science*).
53. Development and Research of Conveyor Structures of Binary Number Sorting Algorithms / Volodymyr Gryga, Yaroslav Nykolaichuk, **Nataliia Vozna**, Artur Voronych, Boris Krulikovskyi // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT'2018. —2018. — P. 123-127. ISSN 1613-0073 (*Scopus*).
54. Methods and Processors for Image Recognition in a Linear and Quadratic Hamming Space / Andriy Sydor, Yaroslav Nykolaychuk, **Nataliia Vozna**, Boris Krulikovskyi, Alina Davletova, Oleh Liura // Proceedings of the 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CADSM'2019. - PP. 2/9-2/12 (*Scopus*).
55. 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 (*Scopus*).
56. Methods of Crypto Protection of Color Image Pixels in Different Code Systems / **Nataliia Vozna**, Yaroslav Nykolaichuk, Orest Volynskyy, Petro Humennyi, Andriy Sydor // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT'2018. — 2018. — P. 110-113. ISSN 1613-0073 (*Scopus*).
57. 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. - 2019. - P. 205-208 (*Scopus, Web of science*).
58. Method of recognition of codes of road signs in the transport movement process / A. Sydor, L. Nykolaychuk, **N. Vozna**, A. Davletova, O. Zastavnyy, P. Humennyi // Proceeding of the International Conference “Advanced Computer Information Technologies”: ACIT'2019. - 2019. - P. 167-170 (*Scopus, Web of science*).
59. 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 (*Scopus*).

60. Structures and methods for synchronizing data exchange protocols in computer networks / A. Voronych, I. Pitukh, **N. Vozna**, L. Nyckolaychuk, O. Zastavnyy // Proceeding of the International Conference "Advanced Computer Information Technologies": ACIT'2019. -2019. - P. 195-199 (*Scopus, Web of science*).
61. **Vozna N.** Theory and methods of development of data flow models in distributed CS / **Natalia Vozna** // Advanced computer system and network: design and application: Proceedings of the 4-th international conference ACSN-2009. - Lviv, 2009, P.304-307.
62. **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
63. **Возна Н.Я.** Концепція структуризації даних в розподілених інформаційних системах // Збірник матеріалів міжнародної координаційної наради ISCM-2014. – Тернопіль, 2014. – С.55-57
64. **Возна Н.Я.** Критерії оцінки структурної, інформаційно-структурної та ентропійно-структурної складності проблемно-орієнтованих даних // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції "Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту", Івано-Франківськ, 2018. - с.187-188.
65. **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.

**Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

66. 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.
67. 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.
68. 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.
69. 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.
70. 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.

71. 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.
72. 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.
73. 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.
74. 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.
75. 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.
76. 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.
77. 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.
78. 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
79. 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
80. 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.

## АНОТАЦІЇ

**Возна Н.Я. Теорія, методи та засоби структуризації поліфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах.** – 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 МОН України, Тернопіль, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми розвитку теорії, методології 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 структурної організації поліфункціональних даних у

розподілених комп'ютерних та кіберфізичних системах. 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. Розробка теоретичних засад та практична реалізація методів оцінки та вдосконалення теорії структурної складності поліфункціональних даних дозволяє оптимізувати системні характеристики відповідних структурних рішень апаратно-програмних засобів складних комп'ютеризованих систем. Розроблені та реалізовані у мікроелектронному виконанні структурні рішення функціональних компонентів складних РКС.

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

**N. Y. Vozna. Theory, methods and tools of structuring multifunctional data in distributed computer systems.** – On the rights of the manuscript

The Thesis for a Doctor of Technical Sciences Degree in Speciality 05.13.05 – Computer Systems and Components. Ternopil National Economic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil, 2019.

The work presented in the thesis is devoted to solving an actual scientific problem of development of the 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, and methods of analysis and improvement of the structural organization of multifunctional data in complex distributed computer and cyber physical systems. As a result of carrying out theoretical, program-modeling and experimental research the following basic scientific results were obtained:

for the first time functions and attributes of the concept of multifunctional data structuring were developed; the existing criteria were generalized and new criteria were developed for assessing the structural and information and structural complexity of multifunctional data; the theoretical foundations of the following methods were developed: the structuring of MD in different Number Systems; determining the entropy of a quasi-stationary object states according to probabilistic and correlation information measures; structured conversion of color image pixel codes in the Haar-Krestenson's Number System; monitoring states of a quasi-stationary object on the basis of the characteristic functional of digital processing of technological process parameters; structural processing of harmonic signals and detection of disturbances in high-voltage power grids on the basis of integral-differential processing of signals. The method of synthesized formation of alphanumeric data was improved. The method of pixel protection by means of convolution with pseudorandom sequences was further developed.

Structural solutions of elements and functional components of complex DCSs were developed and implemented in microelectronics:

high-speed parallel multibasis ADC based on the use of para-phase comparators with advanced functionality and source codes in Rademacher's and Haar-Krestenson's Number Systems with a delay of 4 micro-clock signals; improved structures of single-bit half binary adders with single-phase and para-phase input and output signals; single-bit full adders with para-phase switched inputs and para-phase outputs with a delay of sums and transfers of 1 micro-clock signal; single-bit full binary adder based on 8 valves with inverted inputs and outputs and with a delay of 2 micro-clock signals; high-speed multi-bit adders with logic elements "Exclusive I" and advanced half single-bit adders with para-phase and direct inputs and outputs in their structure; multipliers in different Number Systems whose performance is in 1-2 orders higher than in the known multipliers of Brown, Dadda, etc.

Flow multiplier with reduced structural complexity of input and output buses by  $4n/2$  times in comparison with the parallel multipliers and a device for determining probabilistic entropy with deep parallelization of computation were developed. Structures of data exchange protocols in lower level networks of cyber-physical systems were further developed. Synthesized small size keyboard providing cryptographic protection when exchanging data was improved.

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

**Возная Н.Я. Теория, методы и средства структуризации полифункциональных данных в распределенных компьютерных системах.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 - компьютерные системы и компоненты. - Тернопольский национальный экономический университет МОН Украины, Тернополь, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научной проблемы развития теории, методологии совершенствования структур полифункциональных вычислительных средств, которые являются компонентами сложных компьютерных систем. В Украине и мировом пространстве практически отсутствует обобщенный подход к проблеме разработки теоретических основ структурной организации полифункциональных данных в распределенных компьютерных и киберфизичних системах. В диссертационной работе заложены новые и развиты существующие теоретические и прикладные основы критериев оценки и расчета структурной сложности создаваемых и используемых компонентов сложных распределенных компьютерных и киберфизичних систем, что позволило улучшить системные характеристики компонентов компьютеризированных систем и эффективность их применения в киберфизичних системах за счет уменьшения структурной, аппаратной и временной сложности. Разработка теоретических основ и практическая реализация методов оценки и совершенствования теории структурной сложности полифункциональных данных позволяет оптимизировать системные характеристики соответствующих структурных решений аппаратно-программных средств сложных компьютеризированных систем. Разработаны и реализованы в микроэлектронном выполнении структурные решения функциональных компонентов сложных РКС.

*Ключевые слова:* структурирование, структурированные полифункциональные данные, критерии структурной сложности, распределенные компьютерные системы, функциональная, структурная, информационная сложность.

Підписано до друку 12.10.2020 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Зам. № 20-357  
Умов.-друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 2,1.  
Тираж 100 прим.

Віддруковано ФО-П Шпак В. Б.  
Свідоцтво про державну реєстрацію В02 № 924434 від 11.12.2006 р.  
м. Тернопіль, бульвар Просвіти, 6/4. тел. 8 097 299 38 99.  
E-mail: tooums@ukr.net