

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ІЗМАЙЛОВ АРТЕМ ВІКТОРОВИЧ

УДК 004.383.3:[517.51-022.217-025.54]

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ТРІЙКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ
ДЛЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2020

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Прикарпатському національному університеті імені Василя Стефаника Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Петришин Любомир Богданович,
Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника, завідувач кафедри
комп'ютерних наук та інформаційних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лужецький Володимир Андрійович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри захисту інформації

доктор технічних наук, доцент
Баловсяк Сергій Васильович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, доцент кафедри комп'ютерних
систем та мереж.

Захист відбудеться «16» жовтня 2020 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, а також, на сайті університету.

Автореферат розісланий «14» вересня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Для вирішення задач галузей виробництва, управління та зв'язку застосовують технічні системи, які функціонують під управлінням комп'ютеризованих систем діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ. Розробка та функціонування таких систем пов'язані з обробкою цифрових даних, що забезпечена застосуванням методів та засобів цифрової обробки інформації, які, на відміну від методів та засобів цифрової обробки сигналів, оперують цифровим представленням сигналів – цифровими даними.

Актуальним завданням розробки та вдосконалення технічних і програмних засобів комп'ютерних систем та мереж є зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних. Один із підходів до розв'язання такого завдання полягає у застосуванні ортогональних та вейвлет-перетворень на етапі створення апаратно-програмного забезпечення процесів зберігання та обробки інформації в комп'ютерних системах і мережах. При цьому зберігають не самі дані, а коефіцієнти перетворення, частина з яких рівна нулю або близька до нуля. Такі коефіцієнти відкидають, а при відновленні даних – замінюють нулями.

Водночас доведено, що застосування кодування даних на основі трійкової симетричної системи числення у системах цифрової обробки інформації забезпечує зменшення обсягу пам'яті, необхідної для зберігання даних, а оптимальні розміри перетворень послідовностей даних рівні степеням числа 3. Вказане обґрунтовує актуальність науково-технічного завдання дисертаційного дослідження, яке полягає у розробці методів та засобів трійкових симетричних ортогональних і вейвлет-перетворень та створення на їх основі апаратно-програмного забезпечення процесів зберігання та обробки інформації в комп'ютерних системах та мережах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано відповідно до законів України «Про інформацію», «Про Концепцію Національної програми інформатизації», «Про Національну програму інформатизації», Постанови Верховної Ради України «Реформи галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвиток інформаційного простору України», а також постанови Президії НАН України від 20.12.2013 № 179 «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2014-2018 роки» підпункт 1.2.9.7. Розробка перспективних засобів обчислювальної техніки та постанови Президії НАН України від 30.01.2019 № 30 «Про Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019-2023 роки» підпункт 1.2.9.7. Розроблення перспективних засобів обчислювальної техніки.

Дисертаційне дослідження здійснено здобувачем протягом 2015-2019 років відповідно до наукового напрямку кафедри комп'ютерних наук та

інформаційних систем Прикарпатського національного університету ім. В. Стефаника при виконанні науково-дослідних робіт за темою «Теоретичні та методичні основи побудови комп'ютерних компонентів та систем на базі біторієнтованої вертикальної інфотехнології» (ДР № 0111U004751). Автор брав участь у виконанні науково-дослідних робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробки методів та засобів цифрової обробки інформації на основі трійкових симетричних перетворень, які дозволяють зменшення обсяги пам'яті для зберігання корельованих даних.

Для досягнення поставленої мети, сформульовано такі **задачі**

1. Аналіз існуючих методів та засобів ортогональних та вейвлет-перетворень, які використовують для цифрової обробки інформації;
2. Розробка теоретичних основ та методів ортогональних перетворень на основі трійкових симетричних функцій;
3. Розробка методів вейвлет-перетворень на основі трійкових симетричних функцій;
4. Розробка засобів, що реалізують ортогональні та вейвлет-перетворення на основі трійкових симетричних функцій;
5. Порівняльний аналіз ефективності запропонованих методів і засобів цифрової обробки інформації із відомими.

Об'єктом дослідження є процеси цифрової обробки інформації на основі ортогональних та вейвлет-перетворень у комп'ютерних системах.

Предметом дослідження є методи та засоби трійкових симетричних перетворень.

Методи дослідження. Для розв'язання задач дисертаційного дослідження використано основні положення теорії інформації та кодування для обґрунтування актуальності теми дослідження та синтезу систем трійкових симетричних функцій, які породжують відповідний спосіб кодування; методи функціонального аналізу для синтезу систем трійкових симетричних функцій та їх ортогоналізованих добутків з метою доведення властивостей лінійної незалежності, ортогональності та повноти запропонованих систем функцій; методи теорії ортогональних та вейвлет-перетворень для синтезу відповідних трійкових симетричних перетворень; методи алгебри матриць для ортогоналізації матриць запропонованого трійкового симетричного ортогонального перетворення та доведення властивості ортогональності запропонованого трійкового симетричного вейвлет-перетворення; методи теорії ймовірності та статистичного аналізу для оцінки ефективності застосування запропонованих трійкових симетричних перетворень для цифрової обробки інформації у порівнянні з існуючими; методи проектування компонентів апаратури цифрової обробки даних і схемотехніки для моделювання та розробки компонентів та засобів на базі запропонованих трійкових симетричних перетворень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Уперше запропоновано метод ортогонального перетворення інформації, який, на відміну від відомих методів, передбачає використання

системи ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій і забезпечує ущільнення послідовностей даних за рахунок зменшення взаємної кореляції їх елементів і, як наслідок, зменшення від 44 до 66% обсягу пам'яті комп'ютерної системи, необхідного для зберігання результатів перетворення.

2. Уперше запропоновано метод неперервного вейвлет-перетворення, який, на відміну від відомих методів, передбачає використання неперервних трійкових симетричних функцій і забезпечує підвищення точності розпізнавання короткотермінових особливостей та характеристик послідовностей даних, накладених на довготермінові, від 50 до 100% і, як наслідок, підвищення точності результатів функціонування комп'ютерних засобів, які використовуються для ідентифікації сигналів та автоматичного контролю технологічних процесів.

3. Уперше запропоновано метод дискретного вейвлет-перетворення, який, на відміну від відомих методів, передбачає використання дискретних трійкових симетричних функцій і трьох банків фільтрів довжиною 3 та забезпечує пришвидшення процесу обчислення вейвлет-коефіцієнтів від 11 до 50%, а також зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання результатів перетворення до 57%.

4. Уперше запропоновано структурні моделі спеціалізованих процесорів для реалізації швидких трійкових симетричних ортогонального та дискретного вейвлет-перетворень, які, на відміну від відомих моделей, передбачають використання запропонованих триоперандових операційних блоків та банків цифрових фільтрів довжиною 3 і забезпечують зменшення обсягів пам'яті, необхідних для зберігання даних, у комп'ютерних засобах для ідентифікації сигналів та автоматичного контролю технологічних процесів і зменшення їх апаратної складності.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено спеціалізований процесор для ортогонального перетворення на основі системи ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій, що застосований у якості компонента засобів обліку та контролю параметрів передачі газу, у яких, у порівнянні з існуючими системами ортогональних перетворень, зменшено обсяг пам'яті, необхідний для зберігання даних, і забезпечено збільшення часу автономного функціонування і підвищення точності обліку. Запропонований пристрій рекомендовано застосовувати у системах цифрової обробки корельованих даних з допустимою похибкою відновлення даних до 5%, зокрема, у комп'ютеризованих системах обліку витрат та контролю параметрів передачі рідин і газів та у системах обробки і передачі даних телеметрії.

2. Розроблено загальну структуру спеціалізованого процесора та прикладне програмне забезпечення для дискретного вейвлет-перетворення на основі системи трійкових симетричних функцій, які застосовано у якості компонента комплексу засобів наземного контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин СКУБ-М2, у якому, у порівнянні з існуючими засобами вейвлет-перетворень, зменшено обсяг пам'яті, необхідний для зберігання даних, при одночасному зменшенні похибки відновлення і

забезпечено підвищення точності моніторингу параметрів технологічного процесу. Запропонований пристрій рекомендовано застосовувати у системах цифрової обробки послідовностей даних технологічних параметрів, які мають періодичний характер, з допустимою похибкою відновлення даних до 5%, зокрема, у комп'ютеризованих системах діагностування та контролю параметрів стану бурового і виробничого обладнання.

Впровадження результатів роботи здійснено у:

- Івано-Франківському спеціальному конструкторському бюро засобів автоматизації;
- навчальному процесі кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які складають основний зміст роботи, отримані автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1], [26], [31] – метод неперервного вейвлет-перетворення на основі трійкових симетричних функцій та порівняльний аналіз запропонованого методу і відомих, [2], [6], [7] – аналітичні вирази систем трійкових симетричних і похідних від них функцій та аналіз властивостей кожної із запропонованих систем функцій, [4] – метод швидкого ортогонального перетворення на основі системи ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій та оцінка його операційної складності, [9] – формула фазового зсуву функцій різних порядків у межах системи трійкових симетричних функцій, [13] – аналітичний вираз системи трійкових симетричних функцій, аналіз ефективності базисів та систем функцій за критерієм інформаційної потужності кодової матриці, [18], [19] – порівняльний аналіз властивостей методів функціональних перетворень, [28]-[30] – метод дискретного вейвлет-перетворення на основі трійкових симетричних функцій та порівняльний аналіз запропонованого методу і відомих.

Апробація матеріалів дисертації. Результати дисертаційного дослідження доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях: XII Всеукраїнська конференція студентів і молодих науковців «Інформатика, інформаційні системи та технології», м. Одеса, 2015; 51, 52, 53, 54, 55 sesji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego AGH (Conference of Student's Scientific Circles AGH), Krakow, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018; V Міжнародна міжвузівська школа-семінар «Методи і засоби діагностики в техніці та соціумі», м. Івано-Франківськ, 2015; Звітна наукова конференція викладачів, докторантів, аспірантів та студентів ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», м. Івано-Франківськ, 2016, 2017, 2018, 2019; V та VI Міжнародна НПК «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», м. Вінниця, 2016, 2017; XXIV та XXV Міжнародна НПК «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD), м. Харків, 2016, 2017; III Всеукраїнська конференція молодих науковців «Інформаційні технології – 2016», м. Київ, 2016; II та III Всеукраїнська НПК студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні технології в моделюванні» (ITM), м. Миколаїв, 2017, 2018; Міжнародна НПК молодих вчених, аспірантів та студентів «Комп'ютерні науки, інформаційні

технології та системи управління» (CSYSC), м. Івано-Франківськ, 2017, 2018; Міжнародна НПК «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання», м. Івано-Франківськ, 2017, 2018, 2019; IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (IEEE UKRCON-2017), Kyiv, 2017; VI та VII Міжнародна НПК «Інформаційні системи і технології» (ICT), Коблеве-Харків, 2017, 2018; Міжнародна НПК «Проблеми і перспективи розвитку ІТ-індустрії», м. Харків, 2018; III Міжнародна НПК «Комп'ютерна алгебра та інформаційні технології» (KAIT-2018), м. Одеса, 2018; IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (IEEE UKRCON-2019), Lviv, 2019.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 34 наукові праці, включаючи 4 статті, що входять до переліку наукових фахових видань, 1 статтю у зарубіжних виданнях, 1 розділ колективної монографії, 28 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'ятьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 134 найменувань та додатків. Робота містить 230 сторінок загального обсягу, з яких 163 сторінки основного змісту, на яких розміщено поряд із текстом 66 рисунків і 23 таблиці та додатки на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено її зв'язок з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету та напрямок досліджень, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надано інформацію про їх впровадження, апробацію, публікації та структуру дисертації.

У першому розділі проаналізовано галузі застосування ортогональних і вейвлет-перетворень та значення їх використання у різних прикладних системах цифрової обробки (ЦО) інформації, зокрема спектрального аналізу даних, зменшення надлишковості, очищення даних від шуму, зменшення взаємної кореляції елементів тощо.

У загальному вигляді дискретне перетворення вхідного набору даних X в базисі, заданому матрицею M , подається у матричній формі наступним чином:

$$Y = MX. \quad (1)$$

При цьому, на матрицю M у виразі (1) здебільшого накладають вимогу щодо її ортогональності, що забезпечує спрощення процедури оберненого до (1) перетворення:

$$X = M^{-1}Y = M^T Y, \quad (2)$$

де Y – вектор коефіцієнтів перетворення, M^{-1} – матриця, обернена до матриці перетворення, M^T – транспонована матриця перетворення.

Дискретні перетворення, для яких має місце рівність (2), називають ортогональними перетвореннями (ОП). Вейвлет-перетворенням (ВП) називають

декомпозицію сигналу за системою вейвлетів – функцій, кожна з яких є зсунутою або масштабованою (стиснутою чи розтягнутою) копією однієї функції – породжуючого (материнського) вейвлета.

У системах ЦО інформації здебільшого застосовують дискретні ВП, які обчислюють за допомогою згорткових фільтрів, розрахованих відповідно до вигляду функції материнського вейвлета та масштабної функції, у вигляді

$$a_{j+1} = \downarrow_2 [a_j * h^*], d_{j+1} = \downarrow_2 [a_j * g^*], \quad (3)$$

де a_j – послідовність апроксимуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ВП, d_j – послідовність деталізуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ВП, $*$ – операція згортки, h^* – низькочастотний дискретний фільтр декомпозиції, g^* – високочастотний дискретний фільтр декомпозиції, $\downarrow_2 [X]$ – оператор двійкової децимації.

Відновлення сигналу здійснюється застосуванням операції оберненої до двійкової децимації, яка полягає у вставці нуля після кожного елемента послідовності коефіцієнтів перетворення, та подальшою згорткою отриманої послідовності з відповідними фільтрами відновлення

$$a_j = \uparrow_2 [a_{j+1}] * h + \uparrow_2 [d_{j+1}] * g, \quad (4)$$

де h – низькочастотний дискретний фільтр відновлення, g – високочастотний дискретний фільтр відновлення, $\uparrow_2 [X]$ – обернений до двійкової децимації оператор.

На основі ОП і ВП синтезовано методи та реалізовано компоненти ЦО інформації із застосуванням різних систем функцій, які володіють різною ефективністю вирішення тих чи інших задач ЦО інформації.

Проаналізовано переваги та недоліки базисів функцій Віленкіна-Крестенсона, Фур'є, Уолша, золотого січення, Фібоначчі та Хаара, як основ відповідних ОП. При цьому, здійснено порівняльний аналіз переваг та недоліків методів та засобів ЦО інформації на основі ОП Уолша-Адамара та Хаара, як близьких за своїми властивостями до ОП на основі запропонованого у роботі функціонального базису трійкових симетричних функцій (ТСФ).

Проаналізовано переваги та недоліки вейвлет-базисів Хаара, Добеші та біортогональних вейвлетів. При цьому здійснено порівняльний аналіз переваг та недоліків методів та засобів ЦО інформації на основі ВП Хаара, Добеші 4-го порядку (db4) та біортогонального з параметрами 2.6 (bior2.6), як близьких за своїми властивостями до ВП на основі запропонованого у роботі вейвлет-базису ТСФ.

Проаналізовано критерії оцінки ефективності застосування ОП і ВП у системах ЦО інформації та визначено перелік критеріїв, за якими здійснено оцінку ефективності запропонованих у роботі методів та засобів перетворень на основі ТСФ.

На основі проведеного аналізу визначено напрям та сформульовано задачі дослідження.

У другому розділі запропоновано метод дискретного трійкового симетричного ортогонального перетворення (ТСОП) та метод швидкого дискретного ТСОП. Для побудови матриці ТСОП застосовано систему ортогоналізованих добуток ТСФ. ТСФ, які визначені на проміжку $[0, 1)$, задано співвідношенням

$$Ter_{01_{n,i}}(\theta) = Ter_{|3^n-1-i|}(\theta \cdot 3^{3^n}), \quad (5)$$

де $n = \log_3 N$ – номер набору функцій у системі, N – кількість функцій у наборі, $i=0,1,2,\dots,N-1$ – порядковий номер функції у наборі, $Ter_n(\theta)$ – ТСФ, які задані аналітичним виразом (6) та визначені на всій числовій осі

$$Ter_n(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \text{mod}h(x - 3^n, 3^{n+1}) < 3^n, \\ 1, & 3^n \leq \text{mod}h(x - 3^n, 3^{n+1}) < 2 \cdot 3^n, \\ -1, & 2 \cdot 3^n \leq \text{mod}h(x - 3^n, 3^{n+1}) < 3^{n+1}, \end{cases} \quad (6)$$

де n – порядковий номер функції, x – цілочисельний аргумент, $\text{mod}h(x,p)$ – допоміжна функція

$$\text{mod}h(x, p) = \begin{cases} \text{mod}(x, p) + p, & \text{якщо } x < 0, \\ \text{mod}(x, p), & \text{якщо } x \geq 0, \end{cases} \quad (7)$$

де $\text{mod}(x,p)$ – функція залишку від ділення числа x на число p .

Доведено, що запропонована система функцій володіє властивостями лінійної незалежності, попарної ортогональності функцій та повноти і утворює функціональний базис, на основі якого синтезовано ТСОП. Матриця дискретного ТСОП має вигляд

$$T_N = \frac{1}{\sqrt{N}} T_N', \quad (8)$$

де T_N' – ортогоналізована квадратна матриця розміру $N=3^n$ ($n=0,1,\dots$) дискретних значень ортогоналізованих добуток ТСФ, одержаних в точках $\theta=s/N$, $s=0,1,\dots,N-1$.

Ортогоналізована матриця розміру 9×9 значень ортогоналізованих добуток ТСФ має вигляд

$$T_9' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\sqrt{3/2} & -\sqrt{3/2} & -\sqrt{3/2} & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3/2} & \sqrt{3/2} & \sqrt{3/2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -3/2 & 0 & 3/2 & 0 & 0 & 0 & -3/2 & 0 & 3/2 \\ 3/2 & 0 & -3/2 & 0 & 0 & 0 & -3/2 & 0 & 3/2 \\ 0 & 0 & 0 & -3/\sqrt{2} & 0 & 3/\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -\sqrt{3/2} & \sqrt{3} & -\sqrt{3/2} & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3/2} & -\sqrt{3} & \sqrt{3/2} \\ 1/2 & -1 & 1/2 & -1 & 2 & -1 & 1/2 & -1 & 1/2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Запропоноване дискретне ТСОП у матричному записі представлено співвідношенням

$$Y = T_N X, \quad (10)$$

де $Y = [Y(0), Y(1), \dots, Y(N-1)]^T$ – N -компонентний вектор коефіцієнтів ТСОП; $N = 3^n$; $n = 0, 1, \dots$; T_N – матриця перетворення розміру $N \times N$, задана виразом (8), $X = [X(0), X(1), \dots, X(N-1)]^T$ – N -компонентний вектор дискретних значень вхідного набору даних, для якого здійснюється перетворення.

Обернене ТСОП обчислюється згідно

$$X = (T_N)^T Y. \quad (11)$$

У зв'язку з тим, що перетворення (10) передбачає пряме обчислення матричного добутку, запропоновано метод швидкого дискретного ТСОП за принципом *divide-and-conquer*, який синтезовано на основі властивостей запропонованих у роботі допоміжних матриць та коефіцієнтів

$$C_N(i-1) = (T_N)_i^k, \quad k = \underset{j \in NZ(N,i)}{\operatorname{argmin}} (|(T_N)_i^j|), \quad (12)$$

де $(T_N)_i^j$ – елемент матриці T_N виду (8), який знаходиться у i -ому рядку та j -ому стовпці, $NZ(N,i)$ – множина номерів стовпців ненульових елементів i -ого рядка матриці T_N , $i = 1, 2, \dots, N$.

Доведено, що операційна складність запропонованого швидкого дискретного ТСОП в залежності від розмірності перетворення N за операціями додавання/віднімання складає $N - 1 + (4/3)N \log_3 N$, а за операціями множення на константу – N .

У третьому розділі запропоновано метод неперервного трійкового симетричного вейвлет-перетворення (ТСВП) та метод дискретного ТСВП, для якого розроблено фільтрову форму реалізації. Основою наведених перетворень є запропонований трійковий симетричний (ТС) материнський вейвлет, який визначено наступним чином

$$\psi_1(t) = \begin{cases} -\sqrt{\frac{3}{2}}, t \in [0, \frac{1}{3}), \\ \sqrt{\frac{3}{2}}, t \in [\frac{2}{3}, 1), \\ 0, t \notin [0, \frac{1}{3}) \cup [\frac{2}{3}, 1). \end{cases} \quad (13)$$

Для ТС материнського вейвлета ψ_1 (13) доведено властивості компактності носія, рівності середнього значення нулю по всій часовій області, скінченності енергії, одиничності норми у просторі L_2 та наявності одного нульового моменту. Наявністю одного і тільки одного нульового моменту доведено, що функція (13) є кусково-сталюю. Доведено, також, що функція (13) задовольняє умову допустимості

$$C_\psi = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{|f|} df < \infty, \quad (14)$$

де $\hat{\psi}(x)$ – Фур'є-образ вейвлета $\psi(x)$.

Графік ТС материнського вейвлета ψ_1 (13) наведено на рисунку 1. У зв'язку з тим, що функція (13) задовольняє усім вимогам до материнського вейвлета, на її основі побудовано відповідний вейвлет-базис для реалізації неперервного ТСВП. Неперервне ТСВП у інтегральній формі обчислюється із

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{1,a,b}(t)dt, a,b \in \mathbb{R}, a \neq 0, \quad (15)$$

де вейвлети $\psi_{1,a,b}(x)$ є масштабованими та зсунутими копіями материнського вейвлета $\psi_{1,a,b}(x)$ (13)

$$\psi_{1,a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi_1\left(\frac{x-b}{a}\right), a,b \in \mathbb{R}, a \neq 0. \quad (16)$$

Обернене до (15) перетворення визначено формулою:

$$f(x) \approx 0,10996 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a,b)\psi_{1,a,b}(x) \frac{da db}{a^2}. \quad (17)$$

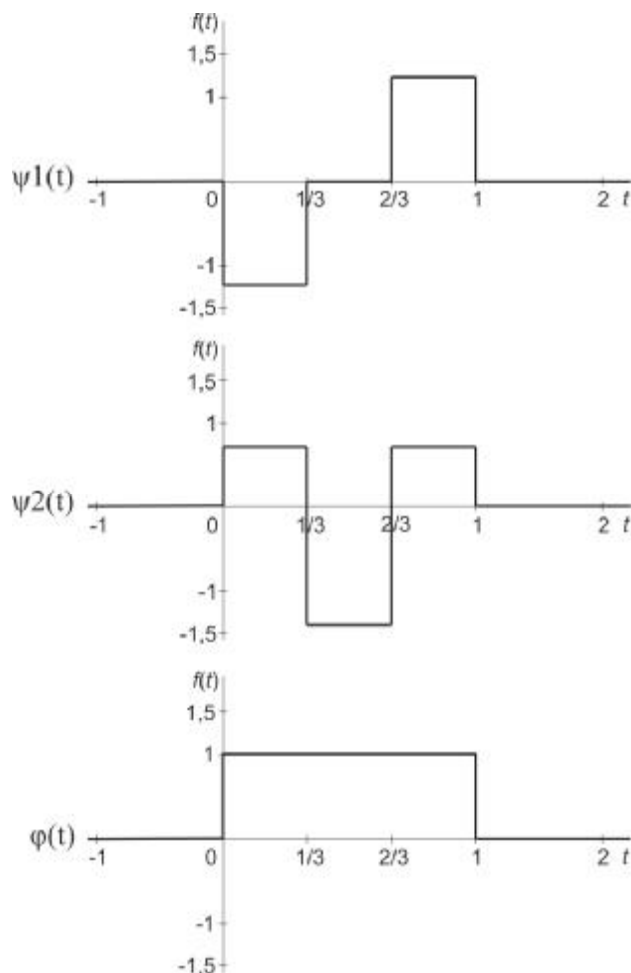


Рисунок 1 – Графіки ТС материнських вейвлетів та масштабної функції дискретного ТСВП

Доведено, що у задачах виявлення короткотермінових особливостей та характеристик сигналів, які накладені на довготермінові, запропоноване перетворення (15) забезпечує вищу (від 50 до 100%) точність виявлення у порівнянні з існуючими ВП у 75% випадків.

Для дискретизації неперервного ТСВП уведено масштабну функцію φ , у якості якої для відповідності вейвлету ψ_1 (13), запропоновано характеристичну функцію на проміжку $[0, 1)$ (18), яка є масштабною функцією у ВП Хаара

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, 1), \\ 0, & t \notin [0, 1). \end{cases} \quad (18)$$

Доведено, що функція φ (18) є масштабною функцією для вейвлету ψ_1 (13), зокрема, обидві функції є взаємно ортогональними. Графік масштабної функції φ (18) наведено на рисунку 1.

Зважаючи на трійкову природу вейвлету ψ_1 (13) для дискретного ТСВП запропоновано значення параметра стиску функцій при переході на новий рівень перетворення, рівний 3, а параметра зсуву – 1. Для подолання проблеми покриття спектру, яка при цьому виникає, запропоновано другий (допоміжний) ТС материнський вейвлет у вигляді

$$\psi_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, t \in [0, \frac{1}{3}) \cup [\frac{2}{3}, 1), \\ -\sqrt{2}, t \in [\frac{1}{3}, \frac{2}{3}), \\ 0, t \notin [0, 1). \end{cases} \quad (19)$$

Для вейвлета ψ_2 (19) доведені аналогічні ψ_1 (13) властивості. Доведена наявність у ψ_2 (19) двох нульових моментів, чим збільшено ефективність вейвлет-аналізу гладких функцій. Доведено, що для вейвлета ψ_2 (19) функція ϕ (18) також є масштабною. Графік другого ТС материнського вейвлета ψ_2 (19) наведено на рисунку 1.

Доведено, що функції ψ_1 (13), ψ_2 (19) та ϕ (18) утворюють, із параметрами стиску та зсуву рівними, відповідно, 3 та 1, системи взаємно ортогональних функцій. На основі запропонованих компонент дискретного ТСВП розраховано фільтри декомпозиції та відновлення, які наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Фільтри декомпозиції та відновлення для реалізації прямого і оберненого дискретного ТСВП

Призначення	Декомпозиція сигналу	Відновлення сигналу
Фільтр		
$h[n]$	$\left\{ \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right\}$	$\left\{ \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right\}$
$g_1[n]$	$\left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$	$\left\{ -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$
$g_2[n]$	$\left\{ \frac{1}{\sqrt{6}}, -\sqrt{\frac{2}{3}}, \frac{1}{\sqrt{6}} \right\}$	$\left\{ \frac{1}{\sqrt{6}}, -\sqrt{\frac{2}{3}}, \frac{1}{\sqrt{6}} \right\}$

Із урахуванням значення параметру стиску, яке рівне 3, для реалізації дискретного ТСВП запропоновано застосування оператора трійкової децимації та оберненого до нього оператора:

$$\downarrow_3 [X], \quad (20)$$

де X – дискретний вхідний сигнал довільної скінченної довжини;

$$\uparrow_3 [X]. \quad (21)$$

Оператор (20) з вхідного сигналу X залишає кожен третій елемент, відкидаючи решту, а оператор (21) – після кожного елемента вхідного сигналу X додає два нульових елементи. Із застосуванням операторів (20) та (21) пряме дискретне ТСВП у згортковій формі подається у вигляді

$$a_{j+1} = \downarrow_3 [a_j * h^*], d1_{j+1} = \downarrow_3 [a_j * g1^*], d2_{j+1} = \downarrow_3 [a_j * g2^*], \quad (22)$$

де a_j – послідовність апроксимуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ВП, $d1_j$ – послідовність деталізуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ВП, які відповідають вейвлет-функціям, породженим ψ_1 (13), $d2_j$ – послідовність деталізуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ВП, які відповідають вейвлет-функціям, породженим ψ_2 (19), $*$ – операція згортки, h^* , $g1^*$, $g2^*$ – дискретні фільтри декомпозиції (табл. 1).

У термінах операторів (20) та (21) обернене дискретне ТСВП у згортковій формі подається у вигляді

$$a_j = \uparrow_3 [a_{j+1}] * h + \uparrow_3 [d1_{j+1}] * g1 + \uparrow_3 [d2_{j+1}] * g2, \quad (23)$$

де $h, g1, g2$ – дискретні фільтри відновлення (табл. 1).

Форми запису (22) та (23) є реалізацією швидкого дискретного ТСВП за допомогою каскаду фільтрів та трійкової децимації.

У четвертому розділі запропоновано структури засобів дискретних ТС перетворень у вигляді спеціалізованих процесорів для ЦО інформації.

Засіб дискретного ТСОП реалізовано у вигляді спеціалізованого процесора на основі відповідного методу швидкого перетворення. Структурну схему спеціалізованого процесора для швидкого ТСОП наведено на рисунку 2.

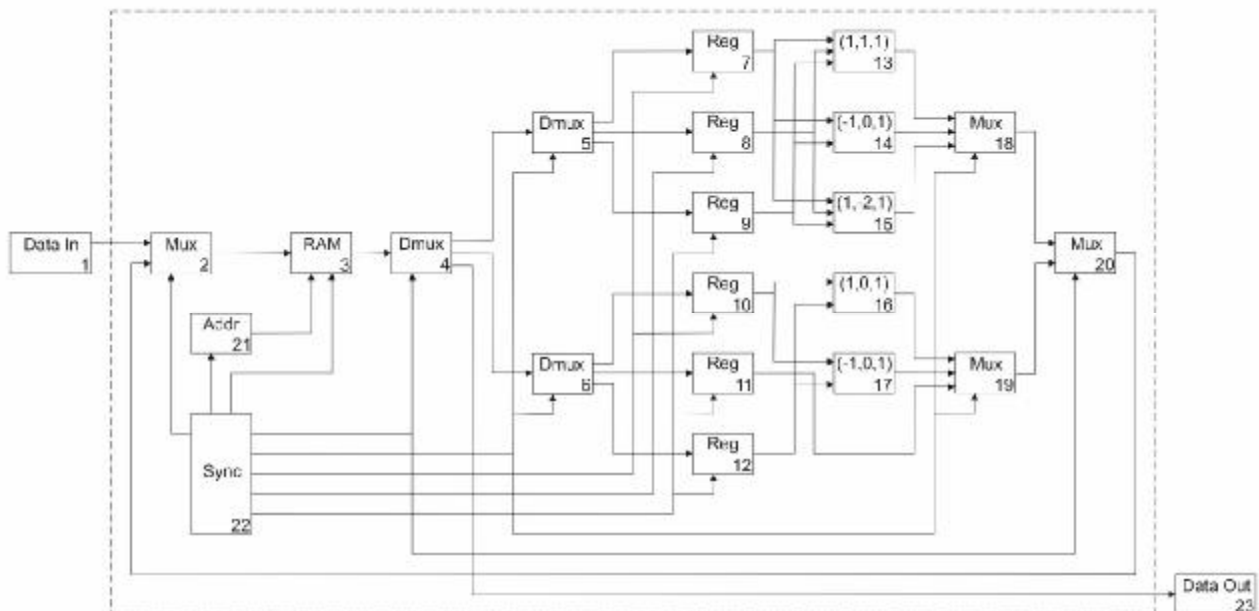


Рисунок 2 – Структурна схема спеціалізованого процесора для швидкого ТСОП

Запропонований засіб дискретного ТСОП працює наступним чином:

1) джерело інформації 1 подає на вхід засобу послідовно N значень вхідної послідовності даних, які через мультиплексор 2 записуються у запам'ятовуючий пристрій 3 за адресами, поданими генератором адрес 21;

2) блоком синхронізації 22 визначається, на який з демультіплексорів 5 чи 6 демультіплексором 4 буде передано три операнди, які зчитуються із запам'ятовуючого пристрою 3 за адресами, поданими генератором адрес 21;

3) демультіплексор 5 (6) під керуванням сигналів блоку синхронізації 22 забезпечує занесення зчитаних з пам'яті операндів у регістри пам'яті 7-9 (10-12), блоком синхронізації 22 забезпечується оновлення значень у цих регістрах та їх подальше зберігання до наступної ітерації обчислень;

4) блок синхронізації 22 забезпечує передачу з виходів операційних блоків 13-15 (16, 17 та регістру 11) результатів обчислень на поточній ітерації через мультиплексор 18 (19) на мультиплексор 20, а з нього через мультиплексор 2 на вхід запам'ятовуючого пристрою 3, у якому ці результати записуються за поданими з генератора 21 адресами;

5) блоком синхронізації 22 визначена необхідна кількість ітерацій для здійснення перетворення і доки вони не будуть виконані, робота засобу проходить у межах кроків 2-5 цього алгоритму, якщо усі ітерації перетворення реалізовані, то засіб здійснює перехід до наступного кроку;

6) блоком синхронізації 22 забезпечується виведення результатів обчислень із запам'ятовуючого пристрою 3 за адресами сформованими генератором 21 через демультіплексор 4 на вихід засобу 23;

7) після виведення результатів засіб переходить у режим очікування подання даних на вхід.

Запропонований спеціалізований процесор для швидкого ТСОП змодельовано за допомогою САД засобу Xilinx ISE, що забезпечує можливість його імплементації за допомогою ПЛІС сімейств Xilinx Spartan.

Засіб дискретного ТСВП реалізовано у вигляді апаратно-програмного спеціалізованого процесора із використанням фільтрової форми обчислення запропонованого перетворення (22) та (23). Для реалізації апаратної частини використано мікроконтролер ATmega2560. На рисунку 3 зображено загальний вигляд апаратної частини спеціалізованого процесора для дискретного ТСВП.

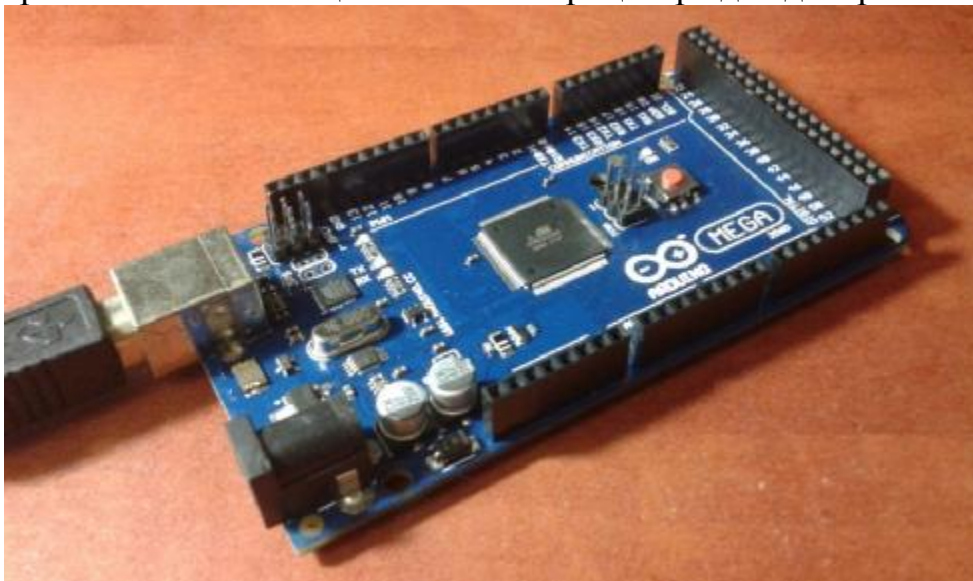


Рисунок 3 – Загальний вигляд апаратної частини спеціалізованого процесора для дискретного ТСВП

Програмна частина представлена розробленим автором програмним засобом «Symmetric Ternary Wavelet Transform MC Performer», який забезпечує взаємодію розробленого пристрою ТСВП з комп'ютером та реалізацію повного циклу ЦО інформації на основі запропонованого методу.

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень ефективності застосування методів та засобів ТС перетворень.

З метою визначення ефективності застосування запропонованого дискретного ТСОП (10) здійснено оцінку та порівняльний аналіз із ОП Уолша-Адамара та Хаара за критеріями операційної складності перетворення, ступеня декореляції елементів вхідного вектора, зменшення середніх затрат бітів на один елемент перетворення, середньоквадратичної похибки відновлення даних за частиною коефіцієнтів перетворення та відношення похибок відновлення при імпульсно-кодovій модуляції та кодуванні на основі перетворення. Дослідження здійснено на моделі вхідного одновимірного інформаційного потоку X , елементи якого є реалізацією одновимірного марківського процесу першого порядку з нульовим математичним сподіванням та одиничною дисперсією.

За результатами проведеної оцінки доведено, що у системах, у яких пріоритетним завданням є ущільнення даних, застосування ТСОП забезпечує перетворення вхідних даних у менш корельовані (у межах від 10 до 30%) коефіцієнти у порівнянні з ОП Уолша-Адамара та Хаара, що забезпечує відповідне зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних.

Здійснено моделювання роботи запропонованого автором спеціалізованого процесора для реалізації ТСОП у якості компонента пристроїв комплектації вузлів обліку та контролю параметрів передачі газу ОЕ-22ЛА (обчислювач об'єму газу) та ТЕМР-ОЕ (лічильник газовий роторний з електронним відліковим пристроєм). Значення показника ступеня зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, які забезпечені ТСОП (Ter) та ОП Уолша-Адамара (Wal) і Хаара (Har) у випадку різних архівів наведених пристроїв обліку та контролю параметрів передачі газу наведено у таблиці 2. Для запропонованого ТСОП значення показника знаходяться на рівні від 44 до 66%.

З метою визначення ефективності застосування запропонованого дискретного ТСВП (22) здійснено оцінку та порівняльний аналіз із дискретними ВП Хаара, Добеші db2, db3, db4 та біортогональними ВП bior1.3, bior2.2, bior3.7 за критеріями середньоквадратичної похибки відновлення даних за частиною коефіцієнтів ВП, мінімуму ентропії деталізуючих коефіцієнтів ВП та мінімуму середнього абсолютного значення деталізуючих коефіцієнтів ВП. Дослідження ефективності ТСВП за наведеними критеріями проводилось на множині 34 наборів даних, представлених у вигляді тестових сигналів Matlab.

За результатами проведеної оцінки доведено, що у системах, у яких пріоритетним завданням є ущільнення даних, застосування дискретного ТСВП забезпечило зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, до 2,5% при меншій до 70% похибці відновлення даних у порівнянні з існуючими ВП, без втрати швидкодії.

Таблиця 2 – Показники ступеня зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних пристроями обліку та контролю параметрів передачі газу, які забезпечені дискретними ОП

№	Шифр пристрою	Тип архіву	Кількість записів у архіві	Ступінь зменшення обсягу пам'яті, %		
				Ter	Wal	Haar
1	ОЕ-22ЛА	Хвилиний	760	44,54	44,01	44,01
2		Годинний	1530	44,51	44,02	44,02
3		Добовий	64	66,80	65,63	65,63
4	TEMP-ОЕ	Хвилиний	60	66,25	63,75	63,75
5		Годинний	150	67	65,5	65,5
6		Добовий	126	66,07	66,00	66,00
7		Місячний	31	60,48	60,03	63,21

Здійснено аналіз ефективності застосування запропонованого автором апаратно-програмного засобу ТСВП при його включенні до структури комплексу засобів наземного контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин СКУБ-М2. При оцінюванні зменшення обсягу пам'яті для зберігання даних, яке забезпечується дискретним ТСВП (ST) та дискретними ВП Хаара, Добеші db4 і біортогональним ВП bior2.6 використано послідовності значень параметра механічного лівого моменту. Значення показника ступеня зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, які забезпечені проаналізованими ВП для технологічного параметра механічного лівого моменту, при збереженні 70% коефіцієнтів перетворення наведено у таблиці 3. Для запропонованого перетворення значення показника знаходяться на рівні 57,2%.

Таблиця 3 – Показники ступеня зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, які забезпечені дискретними ВП для технологічного параметра механічного лівого моменту

Вейвлет-перетворення	Ступінь зменшення обсягу пам'яті, %
ST	57,2
Haar	57,23
db4	56,05
bior2.6	54,88

Результатами моделювання та експериментальних досліджень підтверджені значення показників ефективності, отриманих на основі аналізу за критеріями оцінки ефективності застосування запропонованих ТС перетворень. Цим доведена ефективність застосування запропонованих методів та засобів ЦО інформації на основі ТСОП та дискретного ТСВП для зменшення обсягу

пам'яті, необхідного для зберігання даних, у системах обробки та передачі корельованих даних та системах контролю параметрів процесів і середовищ.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана науково-технічна задача зменшення обсягу пам'яті для зберігання корельованих даних шляхом розробки методів та засобів цифрової обробки інформації на основі трійкових симетричних перетворень. В результаті дисертаційного дослідження отримано такі результати:

1. Уперше запропоновано систему ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій, для якої запропоновано систему наборів та піднаборів і яка задовольняє умови критерію зв'язку частотності з кількістю функцій у наборах системи. Для запропонованої системи функцій доведені властивості лінійної незалежності, попарної ортогональності функцій та повноти.

2. Уперше запропоновано застосування методу трійкового симетричного ортогонального перетворення для цифрової обробки інформації. На основі рекурентних властивостей матриць значень функцій запропонованої системи, вперше запропоновано метод швидкого трійкового симетричного ортогонального перетворення, який реалізовано за принципом *divide-and-conquer*, для якого оцінено операційну складність.

3. Уперше запропоновано синтез материнського вейвлета на основі запропонованої системи ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій. Обґрунтовано властивості запропонованого трійкового симетричного материнського вейвлета.

4. Уперше запропоновано застосування методу неперервного трійкового симетричного вейвлет-перетворення для цифрової обробки інформації. На основі порівняльного аналізу скейлограм, доведено ефективність застосування запропонованого методу для розв'язання задач виявлення короткотермінових особливостей та характеристик інформаційних сигналів, які накладені на довготермінові. При цьому, середній приріст ефективності у порівнянні з існуючими вейвлет-перетвореннями склав 50÷100%.

5. Уперше запропоновано застосування методу дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення для цифрової обробки інформації. Для синтезу запропонованого перетворення уведено масштабну функцію та додатковий (другий) материнський вейвлет. Для запропонованого вейвлет-перетворення визначено дискретні фільтри декомпозиції та відновлення, на основі яких, синтезовано фільтрову форму перетворення. За допомогою синтезованих фільтрів доведено ортогональність дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення.

6. Доведено перевагу застосування запропонованого методу трійкового симетричного ортогонального перетворення у порівнянні з існуючими ортогональними перетвореннями для зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних. У системах цифрової обробки даних з їх ущільненням, застосування перетворення забезпечило зменшення кореляції вхідних даних у

межах 10÷30% і зменшення обсягу пам'яті для їх зберігання до 3%, у системах з ущільненням даних на рівні бітів – у межах 4÷6,5%, у системах з оптимізацією кодування даних при збереженні та пересиланні каналами зв'язку, застосування запропонованого перетворення підвищило ефективність пакування даних до 2÷5%. При цьому, при ущільненні даних, застосування трійкового симетричного ортогонального перетворення забезпечило зменшення похибки відновлення даних на 2÷7% при відкиданні 50÷75% коефіцієнтів перетворення та на 5÷30% при відкиданні <50%.

7. Доведено перевагу застосування запропонованого методу дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення у порівнянні з існуючими вейвлет-перетвореннями для зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних. У системах цифрової обробки даних з їх ущільненням, застосування трійкового симетричного вейвлет-перетворення забезпечило зменшення обсягу пам'яті для зберігання даних до 2,5% при меншій до 70% похибці відновлення, при одночасному збереженні швидкодії функціонування системи. При цьому, застосування запропонованого перетворення для розв'язання задач спектрального аналізу інформаційних сигналів забезпечило приріст швидкодії у межах 35÷80% та приріст інформативності деталізуючих коефіцієнтів у межах 17÷21%, а для задач очищення сигналів від шуму за допомогою техніки «м'якого» порогу забезпечено приріст інформативності до 13÷20%.

8. Розроблено та здійснено моделювання спеціалізованого процесора для трійкового симетричного ортогонального перетворення на основі ПЛІС та апаратно-програмного спеціалізованого процесора для дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення на основі мікроконтролера і розробленої програми «Symmetric Ternary Wavelet Transform MC Performer».

9. Уперше запропоновано застосування розробленого засобу трійкового симетричного ортогонального перетворення у якості компонента пристроїв комплектації вузлів обліку та контролю параметрів передачі газу. Застосування розробки забезпечило зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, на рівні 44÷66%. У випадку проаналізованих пристроїв, це зумовило відповідне збільшення часу автономного функціонування та підвищення точності обліку. Запропонований засіб рекомендовано для застосування у системах цифрової обробки висококорельованих даних з допустимою похибкою відновлення даних до 5%, зокрема, у комп'ютеризованих системах обліку витрат та контролю параметрів передачі рідин і газів та у системах обробки і передачі даних телеметрії.

10. Уперше запропоновано застосування розробленого апаратно-програмного засобу трійкового симетричного вейвлет-перетворення у якості компонента комплексу засобів наземного контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин СКУБ-М2. Застосування розробки забезпечило зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, на рівні 57,2% при одночасному зменшенні похибки відновлення до 20%, у порівнянні з іншими вейвлет-перетвореннями. Запропонований засіб рекомендовано для застосування у системах цифрової обробки значень технологічних параметрів

періодичного характеру з допустимою похибкою відновлення даних до 5%, зокрема, у комп'ютеризованих системах діагностування та контролю параметрів стану бурового і виробничого обладнання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] I. Holub, and A. Izmailov, "Properties Analysis of Wavelet Transform Based on Symmetric Ternary Functions – Analiza właściwości transformaty falkowej na podstawie trójkowych symetrycznych funkcji," *Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego AGH*, no. 35, pp. 87-94, 2018.
- [2] А. В. Ізмайлов, та Л. Б. Петришин, "Трійкові симетричні функції та їх застосування у цифровій обробці інформації," *Системи обробки інформації*, № 4 (141), с. 41-44, 2016.
- [3] А. В. Ізмайлов, "Ефективність застосування ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій для цифрової обробки інформації," *Методи та прилади контролю якості*, № 1 (40), с. 97-104, 2018.
- [4] А. В. Ізмайлов, та Л. Б. Петришин, "Цифрова обробка інформації в розосереджених системах управління із застосуванням швидкого ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій," *Системи обробки інформації*, № 3 (154), с. 79-89, 2018.
- [5] А. В. Ізмайлов, "Дискретне трійкове симетричне вейвлет-перетворення та його застосування у комп'ютеризованих системах діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ," *Системи обробки інформації*, № 3 (158), с. 54-64, 2019.
- [6] А. В. Ізмайлов, та Л. Б. Петришин, "Аналіз властивостей систем трійкових симетричних функцій та їх застосування для цифрової обробки інформації у комп'ютеризованих системах управління," в *Інформаційні технології: сучасний стан та перспективи. Монографія за заг. ред. В.С. Пономаренка, Х., ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018, с. 208-222.*
- [7] A. Izmailov, and L. Petryshyn, "Symmetric ternary functions and their application in orthogonal transforms," in *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 836-841.
- [8] A. Izmailov, "Symmetric Ternary Wavelet Transform and Its Application in Digital Information Processing," in *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, 2019, pp. 1127-1132.
- [9] T. Volchok, M. Petryshyn, A. Izmailov, and A. Kostiuk, "Signal decomposition techniques on ternary symmetrical functions," in *Materiały 51 Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego*, Kraków, 2014, p. 286.
- [10] A. Izmailov, "Properties of bases and function systems, the effectiveness of their use in digital information processing," in *Materiały 51 Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego*, Kraków, Polska, 2014, p. 271.
- [11] А. В. Ізмайлов, "Аналіз властивостей лінійно збіжних дискретних базисів та систем функцій," в *Інформатика, інформаційні системи та технології : матеріали XII Всеукр. конф. студентів і молодих науковців*, Одеса, 2015, с. 58-59.

[12] A. Izmailov, "Effectiveness analysis of bases and function systems used in digital information processing," in *Materiały 52 Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego*, Kraków, 2015, p. 281.

[13] А. В. Ізмайлов, та Л. Б. Петришин, "Аналіз базисів та систем функцій, обґрунтування ефективності застосування трійкових симетричних функцій у цифровій обробці інформації," в *Методи і засоби діагностики в техніці та соціумі : матеріали V Міжнародної міжвузівської школи-семінару*, Івано-Франківськ, 2015, с. 41-44.

[14] А. В. Ізмайлов, "Застосування трійкових симетричних функцій у вейвлет-аналізі цифрових сигналів," в *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XXIV Міжнар. наук.-практ. конф., Ч.IV*, Харків, 2016, с. 141.

[15] А. В. Ізмайлов, "Застосування трійкових симетричних функцій у вейвлет-аналізі цифрових сигналів," в *Інформаційні технології – 2016 : матеріали III Української конф. молодих науковців*, Київ, 2016, с. 170-172.

[16] А. В. Ізмайлов, "Трійкові симетричні функції та їх застосування для цифрової обробки інформації на основі ортогональних перетворень," в *Інформаційні технології в моделюванні ITM-2017 : матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, Миколаїв, 2017, с. 169-170.

[17] А. В. Ізмайлов, "Трійкові симетричні функції та їх застосування для цифрової обробки інформації на основі ортогональних перетворень," в *Комп'ютерні науки, інформаційні технології та системи управління: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів*, Івано-Франківськ, 2017, с. 60-62.

[18] І. І. Голуб, та А. В. Ізмайлов, "Властивості методів частотного аналізу цифрових сигналів," в *Комп'ютерні науки, інформаційні технології та системи управління: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів*, Івано-Франківськ, 2017, с. 63-65.

[19] I. Holub, and A. Izmailov, "Properties of Methods for Frequency Analysis of Digital Signals," in *Materiały 54 Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego*, Kraków, 2017, p. 262.

[20] А. В. Ізмайлов, "Застосування трійкових симетричних функцій для цифрової обробки інформації на основі ортогональних перетворень," в *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції*, Івано-Франківськ, 2017, с. 187-190.

[21] А. В. Ізмайлов, "Застосування трійкових симетричних функцій для цифрової обробки інформації на основі ортогональних перетворень," в *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доповідей XXV Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2017*, Харків, 2017, с. 84.

[22] А. В. Ізмайлов, "Застосування трійкових симетричних функцій для цифрової обробки сигналів на основі ортогональних перетворень," в *Інформаційні системи і технології : матеріали Шостої Міжнародної науково-технічної конференції*, Харків, 2017, с. 232-233.

[23] А. В. Ізмайлов, “Застосування ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій для цифрової обробки інформації,” в *Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації : тези доповідей Шостої Міжнародної науково-практичної конференції*, Вінниця, 2017, с. 93-96.

[24] А. В. Ізмайлов, “Трійкові симетричні функції та їх застосування для цифрової обробки інформації на основі вейвлет-перетворень,” в *Інформаційні технології в моделюванні ITM-2018 : матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, Миколаїв, 2018, с. 108-109.

[25] А. В. Ізмайлов, “Ортогональне перетворення на основі трійкових симетричних функцій та способи його швидкого обчислення у цифровій обробці інформації,” в *Проблеми і перспективи розвитку IT-індустрії : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*, Харків, 2018, с. 32.

[26] I. Holub, and A. Izmailov, “Properties Analysis of Wavelet Transform Based on Symmetric Ternary Functions,” in *Materiały 55 Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego*, Kraków, 2018, p. 271.

[27] A. Izmailov, “Application Effectiveness of Wavelet Transform Based on Symmetric Ternary Functions,” in *Materiały 55 Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego*, Kraków, 2018, p. 274.

[28] А. В. Ізмайлов, та Л. Б. Петришин, “Дискретне трійкове симетричне вейвлет-перетворення та його застосування для цифрової обробки інформації у розподілених системах управління,” в *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції*, Івано-Франківськ, 2018, с. 152-155.

[29] А. В. Ізмайлов, та Л. Б. Петришин, “Застосування дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення для перетворення форми та цифрової обробки інформації у розподілених системах управління в умовах секторної кооперації,” в *Комп'ютерна алгебра та інформаційні технології: праці III Міжнародної науково-практичної конференції*, Одеса, 2018, с. 61-64.

[30] А. В. Ізмайлов, та Л. Б. Петришин, “Ефективність застосування дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення для цифрової обробки інформації у розподілених системах управління,” в *Інформаційні системи і технології: матеріали Сьомої Міжнародної науково-технічної конференції*, Коблеве-Харків, 2018, с. 194-197.

[31] І. І. Голуб, та А. В. Ізмайлов, “Детектування високочастотних характеристик цифрових сигналів на основі трійкового симетричного вейвлет-перетворення,” в *Комп'ютерні науки, інформаційні технології та системи управління: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів*, Івано-Франківськ, 2018, с. 60-62.

[32] А. В. Ізмайлов, “Застосування трійкового симетричного вейвлет-перетворення для підвищення ефективності керування процесом буріння нафтових і газових свердловин,” в *Комп'ютерні науки, інформаційні технології та системи управління: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів*, Івано-Франківськ, 2018, с. 63-64.

[33] А. В. Ізмайлов, “Застосування трійкового симетричного ортогонального перетворення для підвищення ефективності функціонування пристроїв обліку та контролю параметрів передачі газу,” в *Комп’ютерні науки, інформаційні технології та системи управління: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів*, Івано-Франківськ, 2018, с. 65-66.

[34] А. В. Ізмайлов, “Методи та засоби трійкових симетричних перетворень для цифрової обробки інформації,” в *Інформаційні технології та комп’ютерне моделювання: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції*, Івано-Франківськ, 2019, с. 126-129.

АНОТАЦІЯ

Ізмайлов А.В. Методи та засоби трійкових симетричних перетворень для цифрової обробки інформації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп’ютерні системи та компоненти». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

Проаналізовано переваги та недоліки існуючих базисів ортогональних та вейвлет-перетворень та відповідних засобів цифрової обробки інформації.

Запропоновано систему ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій та трійкове симетричне ортогональне перетворення на її основі. Для запропонованого перетворення розроблено швидкий алгоритм.

Запропоновано трійковий симетричний материнський вейвлет та неперервне трійкове симетричне вейвлет-перетворення на його основі. Запропоновано застосування допоміжного трійкового симетричного материнського вейвлета для реалізації дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення та його фільтрової форми.

Розроблено та здійснено моделювання спеціалізованого процесора для трійкового симетричного ортогонального перетворення на основі ПЛІС. Розроблено та здійснено апаратну реалізацію спеціалізованого процесора для дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення на основі мікроконтролера. Доведено, що застосування запропонованих методів та засобів цифрової обробки інформації забезпечило зменшення обсягу пам’яті, необхідного для зберігання даних, у системах обробки інформації.

Ключові слова: цифрова обробка інформації, ущільнення даних, дискретне ортогональне перетворення, неперервне вейвлет-перетворення, дискретне вейвлет-перетворення, материнський вейвлет, трійкові симетричні функції, ортогоналізовані добутки трійкових симетричних функцій, трійкові симетричні перетворення.

АННОТАЦИЯ

Измайлов А.В. Методы и средства троичных симметричных преобразований для цифровой обработки информации. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Компьютерные системы и компоненты». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2020.

Проанализированы преимущества и недостатки существующих базисов ортогональных и вейвлет-преобразований и соответствующих средств цифровой обработки информации.

Предложены система ортогонализованных произведений троичных симметричных функций и троичное симметричное ортогональное преобразование на ее основе. Для предложенного преобразования разработан быстрый алгоритм.

Предложены троичный симметричный материнский вейвлет и непрерывное троичное симметричное вейвлет-преобразование на его основе. Предложено применение вспомогательного троичного симметричного материнского вейвлета для реализации дискретного троичного симметричного вейвлет-преобразования и его фильтровой формы.

Разработано и осуществлено моделирование специализированного процессора для троичного симметричного ортогонального преобразования на основе ПЛИС. Разработано и осуществлено аппаратную реализацию специализированного процессора для дискретного троичного симметричного вейвлет-преобразования на основе микроконтроллера. Доказано, что применение предложенных методов и средств цифровой обработки информации обеспечило уменьшение объема памяти, необходимого для хранения данных, в соответствующих системах обработки информации.

Ключевые слова: цифровая обработка информации, сжатие данных, дискретное ортогональное преобразование, непрерывное вейвлет-преобразование, дискретное вейвлет-преобразование, материнский вейвлет, троичные симметричные функции, ортогонализованные произведения троичных симметричных функций, троичные симметричные преобразования.

ABSTRACT

Artem V. Izmailov. Methods and devices of symmetric ternary transforms for digital information processing. – Qualification research paper, manuscript copyright.

Thesis for the degree of Ph.D. degree in technical science in specialty 05.13.05 «Computer Systems and Components». – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2020.

In this thesis an actual task of reducing the amount of memory for correlated data storage by developing methods and devices of digital information processing based on symmetric ternary transforms was presented and solved.

Application areas of orthogonal and wavelet transforms with advantages and disadvantages of existing bases of such transforms and corresponding devices of digital information processing are analyzed. As the result, it is determined that in order to overcome the disadvantages associated with the effectiveness of information compression of such devices, it is necessary to modify the corresponding transforms, which increases the hardware complexity of the corresponding devices. In this regard, it is determined that the synthesis of transforms on the basis of function systems different from the applied is an effective way to increase the efficiency of solving the corresponding problems.

System of orthogonalized products of symmetric ternary functions is proposed. For the proposed system of functions, the properties of linear independence, pairwise orthogonality of functions and completeness are proved. Synthesis of mother wavelet on the basis of the proposed system of orthogonalized products of symmetric ternary functions is proposed. The properties of the proposed symmetric ternary mother wavelet are proved.

Method of discrete symmetric ternary orthogonal transform is proposed. On the basis of the recurrence properties of the transform matrices, the respective fast divide-and-conquer algorithm is developed for which the operational complexity is estimated.

Method of the continuous symmetric ternary wavelet transform is proposed. The application efficiency of the proposed method for solving the problems of detecting short-term characteristics of the information signals that are imposed on the long-term ones is proved.

Method of the discrete symmetric ternary wavelet transform is proposed. For synthesis of the proposed transform a scaling function is introduced and the use of an additional (second) mother wavelet is proposed. The properties of the proposed scaling function and the auxiliary wavelet function, as well as their compatibility with the proposed symmetric ternary wavelet, are proved. Discrete decomposition and recovery filters, as well as the filter form of the fast discrete symmetric ternary wavelet transform are determined. On the basis of the proposed filters, the property of orthogonality of the proposed discrete wavelet transform is proved.

Device of the symmetric ternary orthogonal transform based on the FPGA is developed and simulated. Device of the discrete symmetric ternary wavelet transform based on the microcontroller is developed and implemented. The software component of the device is implemented by the developed program "Symmetric Ternary Wavelet Transform MC Performer", which provides the full-stack application of the proposed method in digital information processing systems. Structural and principle schemes are developed for the proposed devices.

The efficiency of the reduction of memory required for data storage is estimated for the proposed methods and devices of discrete symmetric ternary transforms in comparison with the existing transforms. On the basis of the obtained

results, the efficiency of their application for the tasks of digital information processing is proved.

Application of the developed device of symmetric ternary orthogonal transform as the component of the devices for gas accounting and transmission control is proposed. It provides reduction of memory required for data storage, which results in the increased time of autonomous functioning and higher accounting accuracy.

Application of the developed device of discrete symmetric ternary wavelet transform as the component of the complex for ground-based control and management of drilling oil and gas wells “SKUB-M2” is proposed. It provides reduction of memory required for data storage with the simultaneous reduction of data recovery error.

The obtained scientific results are implemented in research project at Ivano-Frankivsk Special Design Bureau of Automation and introduced in the educational process of the Department of Computer Science and Information Systems at Vasyl Stefanyk Precarpathian National University.

Keywords: digital information processing, data compression, discrete orthogonal transform, continuous wavelet transform, discrete wavelet transform, mother wavelet, symmetric ternary functions, orthogonalized products of symmetric ternary functions, symmetric ternary transforms.

Підписано до друку 9.09.2020.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура "Times New Roman". Ум. друк арк. 0,9
Наклад 100 пр. Зам. № 118 від 9.09.2020.

Виготовлювач підприємець Голіней О. М.
76000, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Галицька, 128,
тел.: (0342) 580 432, +38 066 481 66 01,
+38 050 540 30 64
[e-mail:gsm1502@ukr.net](mailto:gsm1502@ukr.net)

Свідоцтво про державну реєстрацію фізичної особи-підприємця
Серія В01 №585433 від 19.07.2002 р.