

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ІЗМАЙЛОВ АРТЕМ ВІКТОРОВИЧ

УДК 004.383.3:[517.51-022.217-025.54]

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник Петришин Любомир Богданович, докт. техн. наук, професор

Івано-Франківськ – 2020

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». – Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

У дисертаційній роботі поставлена та вирішена актуальна задача зменшення обсягу пам'яті для зберігання корельованих даних шляхом розробки методів та засобів цифрової обробки інформації на основі трійкових симетричних перетворень.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження:

1. Уперше запропоновано метод ортогонального перетворення інформації, який, на відміну від відомих методів, передбачає використання системи ортогоналізованих добутоків 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 трьохоперандових 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 та 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, який застосовано у якості компонента пристроїв комплектації вузлів обліку та контролю параметрів передачі газу, для яких, у порівнянні з існуючими засобами ортогональних перетворень, зменшено обсяг пам'яті, необхідний для зберігання даних, і забезпечено збільшення часу автономного функціонування і підвищення точності обліку. Запропонований засіб рекомендовано для застосування у системах цифрової обробки високочастотних 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 трійкових симетричних функцій, які застосовано у якості компонентів

комплексу засобів наземного контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин СКУБ-М2, для якого, 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 процесів видобутку. Запропонований засіб рекомендовано для застосування у системах цифрової обробки послідовностей значень 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.

Проаналізовано галузі застосування ортогональних і вейвлет-перетворень, переваги та недоліки існуючих базисів таких перетворень і відповідних засобів цифрової обробки інформації. У результаті визначено, що для подолання недоліків, пов'язаних з ефективністю розв'язання такими засобами задач ущільнення інформації, необхідно модифікувати відповідні перетворення, чим підвищено апаратну складність відповідних засобів. У зв'язку з цим, визначено, що синтез перетворень на основі відмінних від застосованих, систем функцій є перспективним способом зменшення обсягів пам'яті, необхідних для зберігання даних, у системах цифрової обробки інформації при одночасному зменшенні апаратної складності їх компонентів.

Запропоновано систему ортогоналізованих добутоків трійкових симетричних функцій. Для запропонованої системи функцій доведені властивості лінійної незалежності, попарної ортогональності функцій та повноти.

Запропоновано метод дискретного трійкового симетричного ортогонального перетворення. Визначено рекурентні властивості матриць запропонованого перетворення, на основі яких, для запропонованого методу

розроблено швидкий алгоритм перетворення за принципом divide-and-conquer, для якого оцінено операційну складність.

Запропоновано синтез материнського вейвлета на основі запропонованої системи ортогоналізованих добутоків трійкових симетричних функцій. Обґрунтовано властивості запропонованого трійкового симетричного материнського вейвлета.

Запропоновано метод неперервного трійкового симетричного вейвлет-перетворення. Доведено ефективність застосування запропонованого методу для розв'язання задач виявлення короткотермінових особливостей та характеристик інформаційних сигналів, які накладені на довготермінові.

Запропоновано метод дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення. Для синтезу запропонованого перетворення уведено масштабну функцію та запропоновано застосування додаткового (другого) материнського вейвлета. Обґрунтовано властивості запропонованих масштабної функції та допоміжної вейвлет-функції, а також, їх сумісність із запропонованим трійковим симетричним вейвлетом. Визначено дискретні фільтри декомпозиції та відновлення, а також, фільтрову форму швидкого дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення. На основі визначених фільтрів доведено властивість ортогональності запропонованого дискретного вейвлет-перетворення.

Розроблено та здійснено моделювання спеціалізованого процесора для трійкового симетричного ортогонального перетворення на основі ПЛІС. Розроблений засіб задовольняє наступні функціональні вимоги: реалізація інфообміну із зовнішніми компонентами системи цифрової обробки інформації, реалізація перетворення вхідної послідовності даних за допомогою процедури відповідного швидкого перетворення та утворення вихідної послідовності коефіцієнтів. Для запропонованого засобу розроблено структурні схеми.

Розроблено та здійснено апаратну реалізацію апаратно-програмного спеціалізованого процесора для дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення на основі мікроконтролера. Програмна складова засобу

реалізована розробленою програмою «Symmetric Ternary Wavelet Transform MC Performer», яка забезпечує: інфообмін персонального комп'ютера з апаратною складовою засобу; підтримання діалогу з користувачем; зчитування вхідних даних та збереження результатів перетворення у вигляді файлу та вибір типу перетворення (пряме/обернене). Для запропонованого засобу розроблено структурні та принципові схеми.

Здійснено кількісну оцінку ефективності застосування запропонованих методів та засобів дискретних трійкових симетричних перетворень для зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, у порівнянні з існуючими перетвореннями. На основі отриманих результатів оцінки доведено ефективність їх застосування для відповідних задач цифрової обробки інформації.

Запропоновано застосування розробленого спеціалізованого процесора для 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, що у випадку проаналізованих пристроїв, зумовило відповідне збільшення часу автономного функціонування та підвищення точності обліку.

Запропоновано застосування розробленого спеціалізованого процесора для дискретного 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, при одночасному зменшенні похибки відновлення.

Одержані наукові результати впроваджено у Івано-Франківському спеціальному конструкторському бюро засобів автоматизації.

Результати наукових досліджень використано у навчальному процесі кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

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.

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. in technical science in specialty 05.13.05 «Computer Systems and Components». – Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk. – 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.

Scientific novelty of the thesis results:

1. For the first time, method of orthogonal transform of information that unlike the existing methods is based on system of orthogonalized products of symmetric ternary functions is proposed. It provides data compaction through reduction of the correlation between their elements. As the result, it leads to reduction of memory required for storage of the transform results from 44 to 66%.
2. For the first time, method of continuous wavelet transform that unlike the existing methods is based on continuous symmetric ternary functions is proposed. It provides increased recognition accuracy of identifying the short-term characteristics of data sequences that are imposed over the long-term ones, from 50 to 100%. As the result, it leads to increased accuracy of the functioning results of the computerized systems used for signal identification and automatic control of technological processes.

3. For the first time, method of discrete wavelet transform that unlike the existing methods is based on discrete symmetric ternary functions and three filter banks with the length of 3 is proposed. It provides increased speed of the calculation process for wavelet coefficients at the level from 11 to 50% and reduction of memory required for storage of the transform results for up to 57,2%.
4. For the first time, structural models of specialized processors for implementation of the fast symmetric ternary orthogonal and discrete wavelet transforms were proposed. Unlike the existing models, they involve usage of the three-operand operational blocks and banks of digital filters with the length of 3 and provide reducing the amount of memory for data storage in computerized means for signal identification and automatic control of technological processes and reducing their hardware complexity.

Practical significance of the thesis results:

1. Device of orthogonal transform based on system of orthogonalized products of symmetric ternary functions is developed and applied as the component of the devices for gas accounting and transmission control. It provides reduction of memory required for data storage, increased time of autonomous functioning and higher accounting accuracy for such devices in comparison to existing devices of orthogonal transforms. The proposed device is recommended for use in systems of digital processing of the highly correlated data with the permissible level of data recovery error up to 5%, e.g. in systems of expenses accounting of liquids and gases or in systems of processing and transmission of the telemetry data.
2. General structure of the device and the application software for discrete wavelet transform based on symmetric ternary functions are developed and applied as the components of the complex for ground-based control and management of drilling oil and gas wells "SKUB-M2". It provides reduction of memory required for data storage, reduction of data recovery error and higher accuracy for monitoring of the drilling processes in comparison to existing devices of wavelet transforms. The proposed device is recommended for use in systems of digital

processing of the periodic sequences of technological parameters with the permissible level of data recovery error up to 5%, e.g. in systems of monitoring and control of the state parameters of drilling and production equipment.

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 a promising way to reduce the amount of memory for data storage in systems of digital information processing with the simultaneous reduction of their hardware complexity.

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.

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

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 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. The developed device satisfies the following functional requirements: the implementation of information exchange with external components of the digital information processing system, the realization of the transform of the input data sequence using the procedure of the corresponding fast transform and the formation of the output sequence of the transform coefficients. Structural schemes are developed for the proposed device.

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: information exchange between the personal computer and the device; maintaining dialogue with the user; reading the input data from the file; saving transform results as a file and selection between direct and inverse types of the transform. Structural and principle schemes are developed for the proposed device.

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 corresponding 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 in case of analyzed devices 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.

The obtained scientific results are 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.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ 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. Измайлов, 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. Измайлов, “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. Измайлов, 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 ІТМ-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 ІТМ-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.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОРТОГОНАЛЬНИХ ТА ВЕЙВЛЕТ- ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ	31
1.1 Перетворення у апаратно-програмних засобах цифрової обробки інформації.....	31
1.2 Аналіз методів та засобів цифрової обробки інформації на основі ортогональних перетворень.....	38
1.2.1 Функції Віленкіна-Крестенсона та перетворення Фур'є у засобах цифрової обробки інформації	38
1.2.2 Методи та засоби перетворення Уолша.....	40
1.2.3 Перетворення на основі систем функцій золотого січення та Фібоначчі.....	44
1.2.4 Методи та засоби перетворення Хаара	47
1.3 Аналіз методів та засобів цифрової обробки інформації на основі вейвлет- перетворень	50
1.3.1 Методи та засоби вейвлет-перетворення Хаара.....	50
1.3.2 Методи та засоби вейвлет-перетворення Добеші	51
1.3.3 Методи та засоби перетворень на основі біортогональних вейвлетів	54
1.4 Критерії ефективності застосування методів та засобів ортогональних та вейвлет-перетворень у комп'ютеризованих і комп'ютерних системах і мережах.....	56
1.5 Визначення напрямку і формулювання задачі дослідження.....	61
Висновки до розділу 1.....	63

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ОРТОГОНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ НА ОСНОВІ ТРІЙКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ	64
2.1 Трійкові симетричні функції	64
2.1.1 Система трійкових симетричних функцій	64
2.1.2 Система добутків трійкових симетричних функцій	70
2.1.3 Система ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій	76
2.2 Ортогональне перетворення на основі трійкових симетричних функцій	83
2.2.1 Метод ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій	83
2.2.2 Метод швидкого ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій	85
Висновки до розділу 2	107
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ НА ОСНОВІ ТРІЙКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ	109
3.1 Метод неперервного вейвлет-перетворення на основі трійкових симетричних функцій	109
3.2 Метод дискретного вейвлет-перетворення на основі трійкових симетричних функцій	120
Висновки до розділу 3	131
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТРУКТУР СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПРОЦЕСОРІВ ДЛЯ ТРІЙКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ	132
4.1 Розробка та моделювання спеціалізованого процесора для трійкового симетричного ортогонального перетворення	132
4.2 Розробка та реалізація спеціалізованого процесора для дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення	150

Висновки до розділу 4.....	158
РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ТРІЙКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ.....	160
5.1 Ефективність застосування методів та засобів трійкового симетричного ортогонального перетворення.....	160
5.1.1 Оцінка ефективності застосування трійкового симетричного ортогонального перетворення для цифрової обробки інформації.....	160
5.1.2 Оцінка ефективності застосування спеціалізованого процесора для швидкого трійкового симетричного ортогонального перетворення	172
5.2 Ефективність застосування методів та засобів дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення	177
5.2.1 Оцінка ефективності застосування дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення для цифрової обробки інформації.....	177
5.2.2 Оцінка ефективності застосування апаратно-програмного спеціалізованого процесора для дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення	185
Висновки до розділу 5.....	191
ВИСНОВКИ.....	193
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	196
ДОДАТКИ.....	210
ДОДАТОК А Тестові сигнали для оцінки ефективності застосування неперервних вейвлет-перетворень.....	211
ДОДАТОК Б Тестові сигнали для оцінки ефективності застосування дискретних вейвлет-перетворень	215

ДОДАТОК В Перелік елементів спеціалізованого процесора для швидкого трійкового симетричного вейвлет-перетворення.....	216
ДОДАТОК Г Тестові послідовності значень технологічного параметра механічного лівого моменту для оцінки ефективності застосування дискретних вейвлет-перетворень	217
ДОДАТОК Д Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	220
ДОДАТОК Е Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	224

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВП – вейвлет-перетворення.

ОП – ортогональне перетворення.

ЦО – цифрова обробка.

ТСВП – трійкове симетричне вейвлет-перетворення.

ТСОП – трійкове симетричне ортогональне перетворення.

ТС – трійковий(-а, -е, -і) симетричний(-а, -е, -і).

ТСФ – трійкові симетричні функції.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Стрімкий розвиток науки і техніки зумовив появу нових задач у різних галузях економіки, управління, виробництва, сфери послуг, зв'язку та медицини. Для розв'язання цих задач розроблено відповідні технічні системи, які функціонують під управлінням комп'ютеризованих систем діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ, а також, систем ідентифікації сигналів та автоматичного контролю технологічних процесів. Розробка та функціонування таких систем пов'язані з обробкою цифрових даних, яку неможливо забезпечити без застосування методів та засобів цифрової обробки (ЦО) інформації [1]-[3]. Ці методи та засоби, на відміну від методів та засобів ЦО сигналів, оперують цифровим представленням сигналів – цифровими даними [1]-[3].

Базовими методами обробки цифрових даних є методи ортогональних та вейвлет-перетворень, на основі яких функціонують відповідні програмно-апаратні засоби опрацювання інформації [1]-[6]. В основі кожного з цих перетворень лежить система функцій, якою визначені властивості відповідного перетворення та ефективність його застосування для обробки даних певного типу [1]-[6]. Відповідно, у зв'язку з розширенням переліку прикладних галузей ЦО інформації, існуючі перетворення не завжди задовольняють вимоги щодо якості результатів обробки даних у тій чи іншій галузі. Цим зумовлена необхідність синтезу нових перетворень, удосконалення існуючих та аналізу ефективності застосування відповідних методів та засобів, що забезпечить вдосконалення існуючих комп'ютеризованих і комп'ютерних систем і мереж та їх апаратних і програмних засобів.

Актуальним завданням розробки та вдосконалення комп'ютеризованих і комп'ютерних систем і мереж та їх апаратних і програмних засобів є зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних [1]-[6]. Зазначене завдання потребує першочергового вирішення для систем і мереж, частиною яких є

мобільні пристрої, для яких характерні невеликі обсяги вбудованої пам'яті та систем, які інтегровані у IoT (Internet of Things) системи. Один із підходів до розв'язання цього завдання полягає у застосуванні ортогональних та вейвлет-перетворень для створення апаратно-програмного забезпечення процесів зберігання та обробки інформації в комп'ютерних системах і мережах. При такому підході 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. При цьому, порогові значення коефіцієнтів, якими можна знехтувати, визначають на основі допустимих похибок відновлення даних у заданій системі ЦО інформації [1]-[6].

При такому застосуванні ортогональних та вейвлет-перетворень, кількість близьких до нуля коефіцієнтів пов'язана із властивостями перетворення та типом даних, у тому числі, з рівнями автокореляції даних та відповідних їм коефіцієнтів перетворення [2]-[6]. Якщо послідовність даних володіє високим рівнем автокореляції, то розподіл енергії між її елементами близький до рівномірного і відкидання частини цих елементів приводить до високих значень похибок відновлення [2]-[6]. У такому випадку, застосування ортогональних та вейвлет-перетворень забезпечує утворення послідовності коефіцієнтів з нижчим рівнем автокореляції [2]-[6]. Відповідно, розподіл енергії між коефіцієнтами перетворення відмінний від рівномірного і у частині коефіцієнтів концентрація енергії вища, ніж у інших. Імовірність появи серед останніх, коефіцієнтів, якими можна знехтувати для зменшення обсягу пам'яті, збільшується із підвищенням декореляційних властивостей перетворення [4]-[6].

Проблемами розробки і удосконалення методів та засобів ортогональних та вейвлет-перетворень займаються наукові школи А. Белецького [7]-[9], Л.Б. Петришина [10]-[12], В.А. Лужецького [8, 9, 13], Л.А. Гнатіва [14, 15], С.В. Баловсяка [16, 17], С.А. Умняшкіна [18], А.В. Харченко [19, 20] та інших. Серед науковців зарубіжжя цими питаннями займаються І. Добеші [21], С. Малла [22], школа Н. Ахмеда та К. Рао [5, 23], Р. Вонг [24] та інші.

У практиці ЦО інформації доведено, що застосування кодування на основі трійкової симетричної (ТС) системи числення, породженої трійковими симетричними функціями (ТСФ), забезпечує приріст ефективності в межах $25\div 30\%$ (за критерієм інформаційної потужності кодової матриці та ефективності інфообміну) у порівнянні з двійковим кодуванням, а також кодовими системами Грея, Хаара та Уолша [25]-[29]. Відповідно, застосування кодування на основі ТС системи числення у системах ЦО інформації зменшує обсяг пам'яті, необхідної для зберігання даних.

Крім цього, встановлено, що оптимальними є розміри перетворення, які рівні степеням числа 3 [7]. При цьому, більшість існуючих перетворень має розміри рівні степеням числа 2, а перетворення з відмінними розмірами не мають апаратних реалізацій та існують виключно на теоретичному рівні [30]. Водночас, ТСФ є кусково-сталими і кількість проміжків сталості для них є рівною степеням числа 3, що вказує на відповідну розмірність перетворень на їх основі та їх оптимальність за критерієм розміру перетворення.

Тому, актуальним науково-технічним завданням дисертаційного дослідження є розробка методів та засобів ТС 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 здійснювалось здобувачем протягом 2015-2018 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 зменшення обсягу пам'яті для зберігання корельованих даних шляхом розробки методів та засобів цифрової обробки інформації на основі трійкових симетричних перетворень.

Досягнення мети передбачало виконання таких **завдань**:

1. Аналіз існуючих методів та засобів ортогональних та вейвлет-перетворень, які використовуються для цифрової обробки інформації.
2. Розробка 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 запропонованих методів і засобів та відомих.

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

Предмет дослідження – 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 відповідне кодування; методи функціонального аналізу для синтезу систем трійкових симетричних функцій та їх ортогоналізованих добутків, для 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 теорії проектування апаратних засобів цифрової обробки даних та схемотехніки для розробки та моделювання засобів запропонованих трійкових симетричних перетворень.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження:

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, властивості яких забезпечують підвищення ефективності виявлення 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 трьохоперандових 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 та 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, який застосовано у якості компонента пристроїв комплектації вузлів обліку та контролю параметрів передачі газу, для яких, у порівнянні з існуючими засобами ортогональних перетворень, зменшено обсяг пам'яті, необхідний для зберігання даних, і забезпечено збільшення часу автономного функціонування і підвищення точності обліку. Запропонований засіб рекомендовано для застосування у системах цифрової обробки високорельєзованих 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 трійкових симетричних функцій, які застосовано у якості компонента комплексу засобів наземного контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин СКУБ-М2, для якого, 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 процесів видобутку. Запропонований засіб рекомендовано для застосування у системах цифрової обробки послідовностей значень 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 самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [27] – аналітичний вираз системи трійкових симетричних функцій, аналіз ефективності базисів та систем функцій за критерієм інформаційної потужності кодової матриці, [31] – формула фазового зсуву функцій різних порядків у межах системи трійкових симетричних функцій, [32]-[34] – аналітичні вирази систем трійкових симетричних і похідних від них функцій та аналіз властивостей кожної із запропонованих систем функцій, [35, 36] – порівняльний аналіз властивостей методів функціональних перетворень, [37]-[39] – метод неперервного вейвлет-перетворення на основі трійкових

симетричних функцій та порівняльний аналіз запропонованого методу і відомих, [40]-[42] – метод дискретного вейвлет-перетворення на основі трійкових симетричних функцій та порівняльний аналіз запропонованого методу і відомих, [43] – метод швидкого ортогонального перетворення на основі системи ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій та оцінка його операційної складності.

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» (КАІТ-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'ятих 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Э. Айфичер и Б. Джервис, *Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание: Пер. с англ.*, М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
- [2] Э. Оппенгейм, *Применение цифровой обработки сигналов*, М.: Мир, 1980.
- [3] А. Б. Сергиенко, *Цифровая обработка сигналов*, СПб.: Питер, 2002.
- [4] Д. Сэломон, *Сжатие данных, изображений и звука: пер. с англ. В.В. Чепыжова*, М.: Техносфера, 2004.
- [5] N. Ahmed and K. R. Rao, *Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing*, Springer-Verlag, 1975.
- [6] А. В. Переберин, “О систематизации вейвлет-преобразований,” *Вычислительные методы и программирование*, т. 2, с. 15-40, 2002.
- [7] А. Белецкий, *Дискретные ортогональные базисы Виленкина-Крестенсона функций*, Saarbrücken: Palmarium Acad. Publ., 2015.
- [8] А. Я. Белецкий, и В. А. Лужецкий, “Синтез симметричных систем функций золотого сечения,” *Захист інформації*, т. 18, № 4, с. 283-292, 2016.
- [9] А. Я. Белецкий, и В. А. Лужецкий, “Сравнительный анализ эффективности алгоритмов быстрого преобразования Фурье в базисах систем функций Уолша и золотого сечения,” *Захист інформації*, т. 19, № 1, с. 23-32, 2017.
- [10] Л. Б. Петришин, *Теоретичні основи перетворення форми та цифрової обробки інформації в базисі Галуа: Навч. посібник*, Київ: ІЗІМН МОУ, 1997.
- [11] Н. В. Превисокова, “Аналіз ефективності виконання теоретико-числового перетворення Уолша на полях Галуа,” *Комп’ютинг*, т. 6, № 1, с. 67-72, 2007.
- [12] Н. В. Превисокова, “Аналіз ефективності методу кодування інформації на основі ортогонального перетворення Галуа,” *Вісник НТУ “ХПИ”. Серія: Інформатика та моделювання*, № 21(1193), с. 92-101, 2016.

- [13] В. В. Лукічов, В. А. Лужецький та А. С. Васюра, *Методи і засоби стеганографічного захисту інформації на основі вейвлет-перетворень*, Вінниця: ВНТУ, 2014.
- [14] Л. А. Гнатив, М. А. Гнатив, Я. Е. Визор и Г. Я. Ширмовский, “Устройство для быстрого ортогонального преобразования цифровых сигналов по Уолшу-Адамару”. СССР Патент 1615742, 23 декабря 1990.
- [15] Л. А. Гнатив, А. М. Лучук и И. Т. Пархоменко, “Устройство быстрого преобразования сигналов по Уолшу с упорядочением по Адамару”. СССР Патент 1265795, 23 октября 1986.
- [16] И. М. Фодчук, Ю. Т. Роман, и С. В. Баловсяк, “Новый подход к анализу рентгеновских дифрактограмм на основе вейвлет-преобразований,” *Металлофизика и новейшие технологии*, т. 39, № 7, с. 855-863, 2017.
- [17] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, “Автоматичне визначення рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях методом високочастотної фільтрації для виокремлених областей,” *Кибернетика и системный анализ*, т. 54, № 4, с. 164-172, 2018.
- [18] С. В. Умняшкин, и М. Е. Кочетков, “Анализ эффективности использования дискретных ортогональных преобразований для цифрового кодирования коррелированных данных,” *Известия вузов. Электроника*, № 6, с. 79-84, 1998.
- [19] А. В. Харченко, “Применение ортогональных преобразований при цифровой обработке сигналов в спутниковых радиоканалах,” *Информационно-управляющие системы*, № 5, с. 6-10, 2006.
- [20] Г. Н. Мальцев, А. В. Харченко, и А. С. Гарагуля, “Границы повышения помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации при цифровой обработке сигналов с компенсацией помех,” *Информационно-управляющие системы*, № 4, с. 111-116, 2014.
- [21] И. Добеши, *Десять лекций по вейвлетам: Пер. с англ.*, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.

- [22] С. Малла, *Вейвлеты в обработке сигналов: пер. с англ. Я.М. Жилейкина, 2-я ред.*, М.: Мир, 2005.
- [23] K. R. Rao and P. Yip, *Discrete Cosine Transform: Algorithms, Advantages, Applications*, Academic Press, 1990.
- [24] R. Wang, *Introduction to Orthogonal Transforms with Applications in Data Processing and Analysis*, Cambridge, 2010.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] А. В. Измайлов, 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.
- [28] B. Hayes, "Computing science. Third base," *A reprint from American Scientist, the magazine of Sigma Xi, the Scientific Research Society*, vol. 89, no. 6, pp. 490-494, 2001.
- [29] В. В. Шилов, "Вычисления в докомпьютерную эпоху. Уравновешенная троичная система счисления и Томас Фаулер.," *Виртуальный компьютерный музей*, 2009. [Online]. Available: <http://www.computer-museum.ru/precomp/fauler.htm>. [Accessed 29 May 2018].
- [30] Ю. С. Ямненко, Т. А. Хижняк, Т. О. Терещенко, та В. В. Левченко, "Кратномасштабний аналіз дискретних функцій із заданою кількістю фільтрів," *ElectronCommun*, т. 22, № 3, с. 73-79, 2017.

- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] I. I. Golub, 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.

- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] L. E. Franks, *Signal Theory*, Prentice Hall, 1969.

- [45] Л. А. Залманзон, *Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях*, М.: Наука, 1989.
- [46] P. W. Hawkes, *Advances in Electronics and Electron Physics, Vol. 88*, Academic Press, 1994.
- [47] Х. Ф. Хармут, *Теория секвентного анализа: основы и применения*, М.: Мир, 1980.
- [48] Я. Д. Ширман и В. Н. Манжос, *Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех*, М.: Радио и связь, 1981.
- [49] У. Прэтт, *Цифровая обработка изображений: в 2-х кн. Пер. с англ. Д.С. Лебедева*, М.: Мир, 1980.
- [50] Р. Х. Садыхов, П. М. Чеголин и В. П. Шмерко, *Методы и средства обработки сигналов в дискретных базисах*, Минск: Наука и техника, 1987.
- [51] P. S. Addison, *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance (Second Edition)*, CRC Press, 2016.
- [52] Н. Н. Красильников, *Цифровая обработка 2D и 3D-изображений: учеб. пособие*, СПб.: БХВ-Петербург, 2011.
- [53] С. В. Пашенцев, “Сжатие навигационных таблиц в базисе Уолша,” *Вестник МГТУ*, т. 3, № 1, с. 23-30, 2000.
- [54] Х. Ф. Хармут, *Передача информации ортогональными функциями*, М.: Связь, 1975.
- [55] Р. Блейхут, *Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ.*, М.: Мир, 1989.
- [56] Л. И. Магазинников, *Высшая математика III. Функции комплексного переменного. Ряды. Интегральные преобразования*, Томск: ТГУСУР, 2012.
- [57] Л. В. Канторович и Г. П. Акилов, *Функциональный анализ в нормированных пространствах*, М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959.

- [58] С. Г. Крейн, *Функциональный анализ, 2-е изд.*, М.: Наука, 1972.
- [59] Б. З. Вулих, *Введение в функциональный анализ*, М.: Наука ГРФМЛ, 1967.
- [60] А. В. Ефимов, *Математический анализ (специальные разделы)*, М.: Высшая школа, 1980.
- [61] И. М. Дремин, О. В. Иванов, и В. А. Нечитайло, “Вейвлеты и их использование,” *Успехи физических наук*, т. 171, № 5, с. 465-501, 2001.
- [62] Ю. К. Демьянович и В. А. Ходаковский, *Введение в теорию вейвлетов*, СПб.: ПГУПС, 2007.
- [63] R. Polikar, *The Wavelet Tutorial*, Iowa State University of Science and Technology, 1996.
- [64] Ч. Чуи, *Введение в вейвлеты: Пер. с англ*, М.: Мир, 2001.
- [65] К. Блаттер, *Вейвлет-анализ. Основы теории: Пер. с нем.*, М.: Техносфера, 2004.
- [66] Н. М. Астафьева, “Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения,” *Успехи физических наук*, т. 166, № 11, с. 1145-1170, 1996.
- [67] L. Chun-Lin, *A Tutorial of the Wavelet Transform*, Prentice Hall, 2010.
- [68] Н. К. Смоленцев, *Основы теории вейвлетов в MATLAB*, М.: ДМК Пресс, 2005.
- [69] А. М. Трахтман и В. А. Трахтман, *Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах*, М.: Сов. радио, 1975.
- [70] Б. Голд и Ч. Рэйдер, *Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ.*, М.: Сов. радио, 1973.
- [71] Г. Нуссбаумер, *Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток, 2-е изд., пер. с англ. Ю.Ф. Касимова, И.П. Пчелинцева*, М.: Радио и связь, 1985.
- [72] R. E. Garcia, R. R. Morton and D. J. Stopczynski, “System and method for performing an optimized discrete walsh transform”. US Patent 20080109507A1, 8 May 2008.

- [73] А. Я. Белецкий, “Криптографические приложения обобщенных матриц Галуа и Фибоначчи,” *Захист інформації*, т. 15, № 2, с. 128-133, 2013.
- [74] И. С. Ткаченко, и М. И. Семенович, “Установление взаимосвязей между последовательностями чисел Фибоначчи и Люка на основе свойств соответствующих им функций,” *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1, с. 50-57, 2011.
- [75] А. В. Ивашко, *Алгоритмы и устройства цифровой обработки и передачи данных на основе целочисленных экспоненциальных базисных последовательностей: дис. канд. техн. наук: 05.13.05*, Харьков, 1983.
- [76] В. Чернов, *Арифметические методы синтеза быстрых алгоритмов дискретных ортогональных преобразований*, М.: ЛитРес, 2018.
- [77] H. S. Hou, “Extended Haar transform”. US Patent 7,805476 B2, 28 September 2010.
- [78] H. S. Hou, “Shared Haar Wavelet Transform”. US Patent 7,640283, 29 December 2009.
- [79] S. Masud and J. V. McCanny, “Implementation of Wavelet Functions in Hardware”. US Patent 6785700, 31 August 2004.
- [80] W. C. Lynch, K. D. Kolarov, D. R. Hoover and W. J. Arrighi, “Method and Apparatus for Wavelet Based Data Compression”. EP Patent 0985193B1, 29 January 2003.
- [81] N. S. Jayant and P. Noll, *Digital Coding of Waveforms: Principles and Applications to Speech and Video (Prentice-Hall Signal Processing Series)*, Prentice-Hall, 1984.
- [82] A. N. Akansu and R. A. Haddad, *Multiresolution Signal Decomposition: Transforms, Subbands, and Wavelets*, New York: USA: Academic, 1992.
- [83] И. В. Кузьмин и В. А. Кедрус, *Основы теории информации и кодирования*, Киев: Вища школа, 1986.

- [84] O. Yilmaz, and A. N. Akansu, "Quantization of Eigen Subspace for Sparse Representation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 63, no. 14, pp. 3616-3625, 2015.
- [85] M. U. Torun, and A. N. Akansu, "An Efficient Method to Derive Explicit KLT Kernel for First Order Autoregressive Discrete Process," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 61, no. 15, pp. 3944-3953, 2013.
- [86] В. Н. Лоза, та Е. С. Ленков, "Особенности применения пакетных алгоритмов вейвлет-анализа при обработке сигналов," *Системи обробки інформації*, № 7 (144), с. 66-71, 2016.
- [87] А. В. Кудряшов, та К. Л. Горященко, "Використання вейвлет-перетворень у аналізі та відновленні мовних сигналів та моделювання в середовищі MATLAB," *Вісник Хмельницького національного університету, технічні науки*, № 3, с. 287-297, 2001.
- [88] И. Э. Комаров, "Исследование методики определения оптимального вейвлет-базиса на примере сигналов виброускорения," *Омский научный вестник*, № 3 (93), с. 270-273, 2010.
- [89] R. R. Coifman, and M. V. Wickerhauser, "Entropy-based algorithms for best basis selection," *IEEE Transactions on Information Theory (Special Issue on Wavelet Transforms and Multiresolution Signal Analysis)*, vol. 38, no. 3, pp. 1241-1243, 1992.
- [90] 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.
- [91] 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.

- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] П. П. Орнатский, *Теоретические основы информационно-измерительной техники*, Киев: Вища школа, 1983.
- [97] Б. И. Голубов, А. В. Ефимов и В. А. Скворцов, *Ряды и преобразования Уолша: Теория и применения*, М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
- [98] A. Haar, “Zur Theorie der orthogonalen Functionensysteme,” *Mathematische Annalen*, Bd. 69, pp. 331-371, 1910.
- [99] C. Fu, and B. J. Falkowski, “Ternary recursive fast transforms properties, mutual relations, and circuit realization,” *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 16, no. 02, pp. 155-168, 2007.
- [100] Т. С. Хуанг, Д. О. Эклунд и Г. Нуссбаумер, *Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений*, пер. с англ. А.А. Гурова, В.Б. Макулова, С.Л. Ярославского, М.: Радио и связь, 1984.

- [101] В. А. Власенко, Ю. М. Лаппа и Л. П. Ярославский, *Методы синтеза быстрых алгоритмов свертки и спектрального анализа сигналов*, М.: Наука, 1990.
- [102] Д. К. Фаддеев, *Лекции по алгебре: Учебное пособие для вузов*, М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
- [103] Е. Е. Тыртышников, *Матричный анализ и линейная алгебра*, М.: ВИНТИ, 2005.
- [104] А. В. Измайлов, “Трійкові симетричні функції та їх застосування для цифрової обробки інформації на основі ортогональних перетворень,” в *Інформаційні технології в моделюванні ІТМ-2017 : матеріали ІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, Миколаїв, 2017, с. 169-170.
- [105] А. В. Измайлов, “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.
- [106] А. В. Измайлов, “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.
- [107] А. В. Измайлов, “Трійкові симетричні функції та їх застосування для цифрової обробки інформації на основі вейвлет-перетворень,” в *Інформаційні технології в моделюванні ІТМ-2018 : матеріали ІІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, Миколаїв, 2018, с. 108-109.
- [108] А. В. Измайлов, “Ортогональне перетворення на основі трійкових симетричних функцій та способи його швидкого обчислення у цифровій обробці інформації,” в *Проблеми і перспективи розвитку ІТ-індустрії :*

матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, Харків, 2018, с. 32.

- [109] 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.
- [110] 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.
- [111] 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.
- [112] A. Izmailov, “Application Effectiveness of Wavelet Transform Based on Symmetric Ternary Functions,” in *Materialy 55 Konferencji Studenckich Kól Naukowych Pionu Hutniczego*, Kraków, 2018, p. 274.
- [113] Xilinx, Inc, *Spartan-3E Libraries Guide for Schematic Designs*, 2008.
- [114] Xilinx, Inc, *Spartan-6 Libraries Guide for Schematic Designs*, 2009.
- [115] G. Martino, “Arduino Mega 2560 Rev3,” Arduino.cc, 24 September 2018. [Online]. Available: https://content.arduino.cc/assets/MEGA2560_Rev3e_sch.pdf. [Accessed 2 October 2018].
- [116] J. Wood, “Reading and Writing CSV Files in C#,” Black Belt Coder. Free Developer Articles and Source Code, 26 March 2013. [Online]. Available: <http://www.blackbeltcoder.com/Articles/files/reading-and-writing-csv-files-in-c>. [Accessed 29 September 2018].
- [117] 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.
- [118] 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.
- [119] 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.
- [120] Л. П. Ярославский, *Введение в цифровую обработку изображений*, М.: Сов. Радио, 1979.
- [121] А. И. Солонина, Д. А. Улахович и Л. А. Яковлев, *Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов*, СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
- [122] А. Ю. Тропченко и А. А. Тропченко, *Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки. Учебное пособие по дисциплине «Теоретическая информатика»*, СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009.
- [123] Ю. Н. Матвеев, К. К. Симончик, А. Ю. Тропченко и М. В. Хитров, *Цифровая обработка сигналов. Учебное пособие по дисциплине «Цифровая обработка сигналов»*, СПб.: СПбГУ ИТМО, 2013.
- [124] Р. В. Бебих, А. И. Денисов и А. А. Саурин, “Устройство для выполнения быстрого преобразования Уолша”. СССР Патент 1141420, 23 февраля 1985.

- [125] К. О. Бохан, А. В. Корольов, Н. А. Корольова та М. І. Гіневський, “Пристрій двовимірного перетворення Хаара”. Україна Патент 72038, 17 січня 2005.
- [126] К. О. Бохан, Н. А. Корольова та М. І. Гіневський, “Спосіб швидкого двовимірного перетворення Хаара”. Україна Патент 69490, 15 вересня 2004.
- [127] “ТОВ СЛОТ - Каталог продукції,” ТОВ СЛОТ, 2018. [Online]. Available: <http://www.slot.if.ua/catalog/>. [Accessed 11 October 2018].
- [128] “ТОВ СЛОТ - ОЕ-22ЛА - Каталог продукції,” ТОВ СЛОТ, 2018. [Online]. Available: <http://www.slot.if.ua/catalog/10/>. [Accessed 11 October 2018].
- [129] “ТОВ СЛОТ - ТЕМР-ОЕ - Каталог продукції,” ТОВ СЛОТ, 2018. [Online]. Available: <http://www.slot.if.ua/catalog/25/>. [Accessed 11 October 2018].
- [130] ДП "Івано-Франківськстандартметрологія", *Лічильники газу мембранні. Методика повірки. СМУК. 407369.014 ИС1*, Івано-Франківськ: ДП "Івано-Франківськстандартметрологія", 2011.
- [131] “Івано-Франківське СКБ ЗА. Каталог продукції.” Івано-Франківське СКБ ЗА, 2018. [Online]. Available: <http://skbza.if.ua/catalog.htm>. [Accessed 11 October 2018].
- [132] “Івано-Франківське СКБ ЗА. Каталог продукції. СКУБ-М2.” Івано-Франківське СКБ ЗА, 2018. [Online]. Available: http://skbza.if.ua/cat_5ua.htm. [Accessed 11 October 2018].
- [133] Л. М. Заміховський, В. А. Ровінський та О. В. Євчук, *Діагностика технічного стану штангових глибоко-насосних установок*, Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2006.
- [134] В. А. Ровінський, *Вдосконалення ватметрографічних методів діагностування штангових глибоко-насосних установок для видобутку нафти та розробка технічних засобів для їх реалізації : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.13*, Івано-Франківськ, 2003.