

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЦИБЛІЄВ ДЕНИС ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.93:004.94

ДИСЕРТАЦІЯ

**КОМП'ЮТЕРНІ МЕТОДИ РОЗПІЗНАВАННЯ, АНАЛІЗУ ТА
ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ
СИГНАЛІВ**

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
Галузь знань 12 Інформаційні технології

Подається на здобуття ступеня доктора філософії.

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

_____ **Д. О. Циблієв**

Науковий керівник: **Рева Сергій Миколайович**, кандидат технічних наук

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Циблієв Д. О. Комп'ютерні методи розпізнавання, аналізу та вимірювання параметрів спектрометричних сигналів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки (Галузь знань 12 Інформаційні технології). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2026.

Дисертація присвячена розробці методів комп'ютерного аналізу спектрометричних сигналів, а також вдосконаленню математичних моделей і методів комп'ютерного моделювання таких сигналів. Основна мета дослідження полягає у створенні нових алгоритмічних підходів, які дозволять підвищити точність обробки даних у комп'ютерних системах спектрального аналізу.

У першому розділі було детально розглянуто існуючі дослідження й роботи присвячені методам розпізнавання та визначення параметрів спектрометричних сигналів. Наведено огляд основних етапів та підходів до обробки оцифрованих імпульсних сигналів, таких як: визначення базової лінії сигналу, розпізнавання окремих імпульсів, вимірювання їх параметрів (амплітуди, час реєстрації, тощо), в тому числі за допомогою машинного навчання і нейронних мереж. Розглянуто основні проблеми при визначенні вищезазначених параметрів, проаналізовані існуючі підходи для вирішення розглянутих проблем. Зокрема, було показано, що точність розпізнавання параметрів імпульсів може знижуватися, особливо при високих рівнях завантаження і частій суперпозиції імпульсів. Було наведено переваги і недоліки простих методів аналізу, а також більш складних методів, які виконують додаткову обробку оцифрованого сигналу.

Також було обґрунтовано необхідність вдосконалення та розробки математичних моделей і методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів. Адже точний склад даних, отриманих під час реальних експериментів

може бути відомим тільки наближено через випадковість та непередбачуваність процесів на вході детектора. Комп'ютерне моделювання цифрового образу сигналу дає можливість згенерувати масиви вхідних даних для методів комп'ютерного аналізу з повністю відомими параметрами та об'єктивно оцінити ефективність роботи вже відомих та розроблених методів. Зазначено, що з цією метою важливо також розробити програмний алгоритм верифікації результатів комп'ютерної обробки спектрометричних даних.

Відповідно до визначених проблем, притаманних комп'ютерним системам спектрального аналізу та можливим методам вирішення зазначених проблем, була поставлена мета та задача дослідження. Для досягнення мети були сформовані детальні завдання дослідження.

У другому розділі спочатку було представлено метод аналізу параметрів спектрометричних сигналів під назвою Відстеження. Особливостями запропонованого методу є використання програмних фільтрів, побудованих на основі застосування алгоритмів швидкого дискретного перетворення Фур'є, та подальша комп'ютерна обробка сигналу із використанням механізму корекції амплітуд імпульсів, що накладаються один на одного. Це дозволило здійснювати фільтрацію сигналу від шуму без суттєвої зміни корисної складової і точніше визначати амплітуди імпульсів при їх частій суперпозиції. Для підвищення швидкості роботи даного метода при низьких рівнях завантаження і відносно низькій щільності імпульсів було розроблено та детально описано спеціальний алгоритм оптимізації.

Також було розроблено новий метод аналізу спектрометричних сигналів, заснований на використанні дискретних вейвлет-перетворень та адаптивного алгоритму BayesShrink. Представлений метод є більш універсальним у застосуванні, ніж метод Відстеження, адже дозволяє автоматично визначати рівень шуму при фільтрації сигналу і не потребує підбору параметрів шумоподавлення для різних наборів спектрометричних даних.

Далі було детально розглянуто підхід до комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів, а також представлено вдосконалені моделі та методи моделювання цифрового образу сигналу. Було описано два методи синтезу цифрового образу спектрометричного сигналу з потрібним розподілом амплітуд імпульсів на основі попередньо завантаженого шаблону — табличної функції розподілу амплітуд. Перший підхід базується на використанні статистичних методів та відрізків ймовірностей для визначення амплітуд імпульсів в процесі створення цифрового образу сигналу. В основі другого підходу комп'ютерного моделювання покладено використання детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд імпульсів у створюваному сигналі. Окрім цього було представлено метод моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією. Це дозволило програмно генерувати цифровий образ сигналу з дискретністю, яка на порядок або більше перевищує частоту оцифрування діджитайзером, та враховує можливе зміщення фаз імпульсів відносно точок дискретизації.

Наприкінці представлено алгоритм верифікації точності розпізнавання параметрів імпульсів методами комп'ютерної обробки при їх дослідженні на симульованих даних. Це надало можливість більш об'єктивно оцінити точність розпізнавання параметрів імпульсного сигналу різними методами комп'ютерного аналізу та ввести поняття верифікованої точності роботи кожного з методів.

У третьому розділі дисертації було детально розглянуто та описано вибір програмних засобів для реалізації розроблених методів аналізу та методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів. Обґрунтовано вибір мови програмування C++ з поміж декількох поширених мов, за рахунок її функціональності, кросплатформності, ефективності роботи з пам'яттю та даними, а також можливості низькорівневого програмування. Також розглянуто декілька варіантів при виборі можливої інтегрованої середовища розробки, наведено їх основні переваги та недоліки, аргументовано вибір QT Creator в якості IDE. Було описано інтерфейс користувача та основні можливості розробленого в рамках дослідження програмного засобу. Створений додаток дозволяє виконувати комп'ютерне

моделювання спектрометричного сигналу, а також здійснювати програмний аналіз симульованих або завантажених з реальних експериментів даних за допомогою програмно реалізованих існуючих та запропонованих методів комп'ютерної обробки. Детально розглянуто архітектуру розробленого програмного забезпечення, основні компоненти, класи та функції, які вони виконують.

Далі було розглянуто програмну реалізацію розробленого методу Відстеження та методу з використанням вейвлет-перетворень для аналізу спектрометричних сигналів. Роботу даних методів було перевірено на симульованих даних з повністю відомими параметрами, які були згенеровані за кількома сценаріями з різними рівнями завантаження і різною вірогідністю суперпозиції імпульсів. Розроблені методи продемонстрували високу точність розпізнавання параметрів оцифрованих сигналів при перевірці на базових сценаріях (з низькою вірогідністю накладання імпульсів один на одного) та в сценаріях з більш високою інтенсивністю генерації імпульсів.

Також були досліджені програмно реалізовані моделі та методи комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону. Відмічено, що метод моделювання з використанням відрізків ймовірностей дозволяє послідовно моделювати весь хід експерименту, поступово формуючи у реальному часі спектральний сигнал із вказаним законом розподілу амплітуд. Проте при дослідженні даного методу з використанням штучно створеного шаблону з лінійним спектром, було виявлено певні закономірні статистичні відхилення від лінійного розподілу. Після цього було здійснено моделювання сигналу згідно заданого шаблону другим методом, що базується на використанні детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд імпульсів. Даний підхід в підсумку дозволив змоделювати сигнал згідно завантаженого файлу-шаблону з даними, що в точності відповідають спектру реального джерела випромінювання без статистичних відхилень.

Наприкінці розділу було представлено модель розподіленої комп'ютерної системи для отримання, передачі по мережі та комп'ютерного аналізу спектрометричних даних і описано програмну реалізацію прототипу такої системи.

В четвертому розділі було проведено оцінку точності та швидкодії роботи розроблених методів комп'ютерного аналізу спектрометричних сигналів (методу Відстеження та методу на основі дискретних вейвлет-перетворень) на симульованих даних та порівняння з існуючими методами Максимуму та Підбору. Для перевірки роботи розроблених методів у порівнянні із вже відомими за допомогою комп'ютерного моделювання були підготовлені масиви вхідних числових даних із наперед визначеними параметрами. Також був використаний розроблений алгоритм верифікації кожного розпізнаного імпульсу. В результаті були отримані основні характеристики методів, такі як точність розпізнавання сигналів та швидкість обробки даних, для кількох сценаріїв з різною тривалістю процесу моделювання та різним рівнем завантаження. Наведено порівняльні метрики ефективності для всіх описаних методів програмного аналізу. В підсумку, серед досліджених сценаріїв розроблені методи показали кращу розпізнавальну здатність, ніж розглянуті існуючі альтернативні методи.

Також запропоновані методи комп'ютерної обробки були використані для аналізу спектрометричних даних, отриманих під час реальних експериментів. За допомогою спектрометричного обладнання та діджитайзера було записано файли з оцифрованими сигналами від зразків матеріалів джерел випромінювання Cs^{137} та Co^{60} . Було проведено комп'ютерний аналіз таких файлів розробленими методами, обчислено та візуалізовано спектри досліджених зразків. В цілому побудовані діаграми відповідали очікуваним спектрам даних матеріалів, що підтверджує можливість впровадження та практичного застосування запропонованих методів обробки даних в комп'ютерних системах спектрального аналізу.

Далі було використано розроблений метод моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією для симуляції еталонного сигналу та визначення максимального значення похибки результатів комп'ютерного аналізу

цих даних простим методом Максимумів, що спричинена дискретизацією сигналу (для різних частот оцифрування діджитайзером). Врахування впливу такої похибки може бути особливо важливим при проведенні реальних експериментів з використанням напівпровідникових або сцинтиляційних детекторів з низьким рівнем власних шумів.

Наприкінці наведено практичні рекомендації щодо застосування розроблених методів комп'ютерного аналізу та моделювання спектрометричних сигналів.

Сукупність отриманих у дисертації наукових результатів, підтвердження факту їх достовірності, наукової та практичної значущості дають змогу вважати, що сформульована наукова задача розробки нових методів розпізнавання та визначення параметрів спектрометричних сигналів для досягнення поставленої мети підвищення точності обробки даних в комп'ютерних системах спектрального аналізу є розв'язаною, а поставлену мету — досягнутою.

Ключові слова: *комп'ютерний аналіз спектрометричних сигналів, комп'ютерна система, шум, моделювання, реконструкція, математичні моделі, модифікація, оптимізаційна задача, верифікація, сигнали, перетворення Фур'є, машинне навчання, нейронна мережа, детектор гамма-випромінювання, сцинтилятор.*

ABSTRACT

Tsyblyiyev D. O. Computer methods of recognition, analysis and measurement of spectrometric signals parameters. – Qualification scholarly paper: a manuscript.

The dissertation submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Informational Technology: Specialty 122 Computer science. V. N Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of methods for computer analysis of spectrometric signals, as well as the improvement of mathematical models and methods for computer modeling of such signals. The main goal of the research is to create new algorithmic approaches that allow to increase the accuracy of data processing in computer systems of spectral analysis.

The first chapter provides a detailed review of existing research and works devoted to methods for recognizing and determining the parameters of spectrometric signals. An overview of the main stages and approaches to processing digitized pulse signals is provided, such as: determining the signal baseline, recognizing individual pulses, measuring their parameters (amplitudes, registration time, etc.), including using machine learning and neural networks. The main problems in determining the above-mentioned parameters are considered, and existing approaches to solving the problems considered are analyzed. In particular, it was shown that the accuracy of pulse parameters recognition may decrease, especially at counting rates and frequent pulse superposition. The advantages and disadvantages of simple analysis methods, as well as more complex methods that perform additional processing of the digitized signal, are given.

The need to improve and develop mathematical models and methods for computer modeling of spectrometric signals was also substantiated. Because the exact composition of data obtained during real experiments can only be known approximately due to the randomness and unpredictability of processes at the detector input. Computer modeling of a digital signal makes it possible to generate input data arrays for computer analysis methods with fully known parameters and to objectively assess the efficiency of already

known and developed methods. It is noted that for this purpose it is also important to develop a software algorithm for verifying the results of computer processing of spectrometric data.

In accordance with the identified problems inherent in computer spectral analysis systems and possible methods for solving these problems, the goal and objective of the study were set. To achieve the goal, detailed research tasks were formed.

In the second chapter, a method for analyzing spectrometric signal parameters called Tracking was first presented. The features of the proposed method are the use of software filters built on the basis of the application of fast discrete Fourier transform algorithms, and subsequent computer processing of the signal using a mechanism for correcting the amplitudes of pulses superimposed on each other. This allowed filtering the signal from noise without significantly changing the useful component and more accurately determining the amplitudes of pulses with their frequent superposition. To increase the speed of this method at low counting rates and relatively low pulse density, a special optimization algorithm was developed and described in detail.

A new method for analyzing spectrometric signals was also developed, based on the use of discrete wavelet transforms and the adaptive BayesShrink algorithm. The presented method is more versatile in application than the Tracking method, as it allows for automatic determination of the noise level during signal filtering and does not require the selection of noise reduction parameters for different sets of spectrometric data.

Next, the approach to computer modeling of spectrometric signals was considered in detail, and improved models and methods for modeling the digital signal image were presented. Two methods for synthesizing the digital image of a spectrometric signal with the desired pulse amplitude distribution based on a pre-loaded template – a tabular amplitude distribution function – were described. The first approach is based on the use of statistical methods and probability intervals to determine the amplitudes of pulses in the process of creating a digital image of the signal. The second approach to computer modeling is based on the use of deterministic final values of the distribution of pulse amplitudes in the generated signal. In addition, a method of modeling spectrometric

signals with increased detailing was presented. This allowed for the programmatic generation of a digital signal image with a discreteness that is an order of magnitude (or more) higher than the digitizer's digitization frequency and takes into account the possible phase shift of the pulses relative to the sampling points.

At the end, an algorithm for verifying the accuracy of pulse parameter recognition by computer processing methods when studying them on simulated data is presented. This made it possible to more objectively assess the accuracy of pulse signal parameter recognition by various computer analysis methods and introduce the concept of verified accuracy of each method.

In the third section, the choice of software tools for implementing the developed methods of analysis and computer modeling of spectrometric signals was considered and described in detail. The choice of the C++ programming language from among several common languages is justified due to its functionality, cross-platform, efficiency of work with memory and data, as well as the possibility of low-level programming. Several options for choosing a possible integrated development environment are also considered, their main advantages and disadvantages are presented, and the choice of QT Creator as an IDE is justified. The user interface and main capabilities of the software tool developed as part of the research are described. The created application allows for computer modeling of a spectrometric signal, as well as for software analysis of simulated or downloaded data from real experiments using software-implemented existing and proposed computer processing methods. The architecture of the developed software, the main components, classes, and the functionality they perform are considered in detail.

Next, the software implementation of the developed Tracking method and the method using wavelet transforms for spectrometric signal analysis were considered. The performance of these methods was tested on simulated data with fully known parameters, which were generated under several scenarios with different counting rates and different probability of pulse superposition. The developed methods demonstrated high accuracy in recognizing the parameters of digitized signals when tested in basic scenarios (with a low probability of pulses overlapping each other) and in scenarios with a higher intensity

of pulse generation. Software-implemented models and methods of computer modeling of spectrometric signals according to a given template were also investigated. It was noted that the simulation method using probability ranges allows for the sequential simulation of the entire course of the experiment, gradually forming in real time a spectral signal with a specified amplitude distribution law. However, when studying this method using an artificially created template with a linear spectrum, certain regular statistical deviations from the linear distribution were found. After that, the signal was simulated according to the given template by a second method based on the use of deterministic final values of the pulse amplitude distribution. This approach ultimately allowed to simulate the signal according to the loaded template file with data that exactly matches the spectrum of a real radiation source without statistical deviations.

At the end, a model of a distributed computer system for receiving, transmitting over the network, and computer analysis of spectrometric data was presented and the software implementation of a prototype of such a system was described.

In the fourth chapter, the accuracy and speed of the developed methods of computer analysis of spectrometric signals (Tracking method and method based on discrete wavelet transforms) were assessed on simulated data and compared with the existing Maximum and Fitting methods. To verify the performance of the developed methods in comparison with the already known ones, arrays of input numerical data with predefined parameters were prepared using computer simulation. The developed algorithm for verifying each recognized pulse was also used. As a result, the main characteristics of the methods, such as the accuracy of signal recognition and data processing speed, were obtained for several scenarios with different duration of the modeling process and different counting rates. Comparative performance metrics are presented for all described software analysis methods. As a result, among the studied scenarios, the developed methods showed better recognition accuracy than the existing alternative methods considered.

The proposed computer processing methods were also used to analyze spectrometric data obtained during real experiments. Using spectrometric equipment and

a digitizer, files with digitized signals from samples of Cs¹³⁷ and Co⁶⁰ radiation source materials were recorded. Computer analysis of such files was carried out using the developed methods, the spectra of the studied samples were calculated and visualized. In general, the constructed diagrams corresponded to the expected spectra of these materials, which confirms the possibility of implementing and practical application of the proposed data processing methods in computer systems of spectral analysis.

Next, the developed method of modeling spectrometric signals with increased detail was used to simulate the reference signal and determine the maximum error value of the results of computer analysis of this data by the simple method of Maximum, which is caused by signal discretization. Considering the influence of such an error may be especially important when conducting real experiments using semiconductor or scintillation detectors with low self-noise.

At the end, practical recommendations are given for the application of the developed methods of computer analysis and modeling of spectrometric signals.

The set of scientific results obtained in the dissertation, confirmation of their reliability, scientific and practical significance allow us to believe that the formulated scientific task of developing new methods for recognizing and determining the parameters of spectrometric signals to achieve the set goal of increasing the accuracy of data processing in computer systems of spectral analysis has been solved, and the set goal – achieved.

Keywords: *computer analysis of spectrometric signals, computer system, noise, simulation, reconstruction, mathematical models, modification, optimization problem, verification, signals, Fourier transform, machine learning, neural network, gamma detector, scintillator.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз

1. Reva S., **Tsyblyiyev D.** Devising a computer method to recognize and analyze spectrometric signals parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6, No 9 (132). P. 86–96 (**Scopus**). DOI: 10.15587/1729-4061.2024.318558.

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Reva S.M., **Tsyblyiyev D.O.** Computer methods of recognition and analysis of X-ray and gamma radiation parameters. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series “Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems”*. 2022. Vol. 55. P.38-48. DOI: 10.26565/2304-6201-2022-55-04

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих методів розпізнавання параметрів рентгенівського і гамма-випромінювання та робіт присвяченій цій області, реалізація комп'ютерного моделювання цифрового образу спектрометричного сигналу, програмна реалізація методів спектрального аналізу та візуалізація результатів їх роботи, підготовка тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, перевірка тексту роботи, редагування та доповнення. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

3. Рева С. М., **Циблієв Д. О.** Математичні моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2023. Т. 58. С. 64-74. DOI: 10.26565/2304-6201-2023-58-07

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих математичних моделей генерації цифрового спектрометричного сигналу, розробка моделей та алгоритмів комп'ютерного моделювання цифрового образу сигналу згідно заданого шаблону, програмна реалізація розроблених підходів та візуалізація симульованих даних, написання частини тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, розробка підходу до моделювання цифрового сигналу згідно заданих файлів-шаблонів, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, написання частини тексту статті, перевірка роботи. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

4. Рева С. М., **Циблієв Д. О.** Комп'ютерне моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління».* 2025. Т. 65. С. 92-101. DOI: 10.26565/2304-6201-2025-65-08

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих моделей та методів генерації цифрового спектрометричного сигналу, розробка та програмна реалізація алгоритмів комп'ютерного моделювання цифрового образу сигналу з підвищеною деталізацією, візуалізація симульованих даних, проведення програмних експериментів, написання частини тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, постановка проблеми, розробка підходу до моделювання цифрового сигналу з підвищеною деталізацією, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, написання частини тексту статті, перевірка тексту роботи. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

5. Рева С. М., Циблієв Д. О. Розробка програмної платформи для комп'ютерного моделювання, аналізу та верифікації параметрів спектрометричних сигналів. *Інформаційні технології та суспільство*. 2025. № 3 (18). С. 145-151. DOI: 10.32689/maur.it.2025.3.20

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих підходів та програмних засобів для спектрального аналізу, програмна реалізація розроблених алгоритмів комп'ютерного моделювання, аналізу та верифікації спектрометричних сигналів, візуалізація результатів обробки даних, опис архітектури створеної програмної платформи, підготовка тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, формулювання вимог до функціональності розробленого програмного засобу, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, перевірка тексту роботи, редагування та доповнення. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

6. Рева С. М., Циблієв Д. О. Розробка методу комп'ютерного аналізу параметрів спектрометричних сигналів з використанням дискретних вейвлет-перетворень. *Інформаційні технології та суспільство*. 2025. № 4 (19). С. 144-153. DOI: 10.32689/maur.it.2025.4.23

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих підходів та методів аналізу спектрометричних сигналів, розробка та програмна реалізація нового методу аналізу з використанням дискретних вейвлет-перетворень, порівняння з існуючими підходами, підготовка тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, перевірка тексту роботи, редагування та доповнення. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. **Циблієв Д. О., Рева С. М.** Комп'ютерне моделювання та аналіз параметрів гамма-випромінювання. Науковий збірник праці 9-ї міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання у наукоємних технологіях (КМНТ-2023)». Харків, 2023. С. 158–161.

8. **Циблієв Д. О., Рева С. М.** Комп'ютерне моделювання та аналіз параметрів спектрометричних сигналів. Науковий збірник праці 10-ї міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання у наукоємних технологіях (КМНТ-2024)». Харків, 2024.

9. **Tsyblyiyev D., Reva S.** Method of computer modeling of spectrometric signals with increased detailing. IX International Scientific and Theoretical Conference «Theoretical and practical scientific achievements: research and results of their implementation». England, Liverpool, 2025. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-08.08.2025>

10. **Tsyblyiyev D., Reva S.** Comparative analysis of computer methods for recognition and determination of parameters of spectrometric signals. XI International Scientific and Theoretical Conference «Scientific Forum: Theory and Practice of Research». USA, San-Francisco, 2026. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-13.03.2026>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗПІЗНАВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ В КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ	29
1.1. Огляд методів комп'ютерного аналізу спектрометричних сигналів	29
1.2. Обґрунтування необхідності розробки моделей та методів комп'ютерного моделювання сигналів і механізмів верифікації результатів аналізу	45
1.3. Постановка задачі дослідження	46
Висновок до розділу 1	47
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО АНАЛІЗУ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЇ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ	49
2.1. Метод аналізу спектрометричних сигналів з механізмом фільтрації на основі перетворень Фур'є та обробкою суперпозиції імпульсів	49
2.2. Метод аналізу спектрометричних даних з використанням дискретних вейвлет-перетворень та обробкою суперпозиції імпульсів	57
2.3. Вдосконалення моделей і методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів.....	63
2.4. Алгоритм верифікації результатів роботи методів комп'ютерного аналізу. .	74
Висновок до розділу 2.....	79
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ.....	81
3.1. Вибір програмних засобів для реалізації запропонованих моделей та методів комп'ютерного моделювання і спектрального аналізу	81

3.2. Опис розробленого програмного засобу для комп'ютерного моделювання, аналізу та верифікації спектрометричних даних	90
3.3. Програмна реалізація та результати роботи розроблених методів комп'ютерного аналізу	98
3.4. Програмна реалізація моделей та методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону.....	103
3.5. Розробка моделі розподіленої комп'ютерної системи для оцифрування, передачі та аналізу спектрометричних даних	109
Висновок до розділу 3.....	112
РОЗДІЛ 4 ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ.....	114
4.1. Оцінка точності та швидкодії розробленого методу аналізу під назвою Відстеження на змодельованих даних та порівняння з існуючими методами ..	114
4.2. Перевірка точності та швидкодії розробленого методу аналізу на основі дискретних вейвлет-перетворень у порівнянні з існуючими підходами	123
4.3. Метрики ефективності розроблених та відомих методів спектрального аналізу на даних, змодельованих з підвищеною деталізацією.....	127
4.4. Застосування розроблених методів комп'ютерного аналізу на спектрометричних даних, отриманих під час реальних експериментів.....	130
4.5. Використання методу моделювання з підвищеною деталізацією для оцінки похибки аналізу простими методами, зумовленої дискретизацією сигналу	135
4.6. Практичні рекомендації по використанню розроблених методів аналізу та методів комп'ютерного моделювання	141
Висновок до розділу 4.....	143
ВИСНОВКИ.....	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	149
Додаток А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	160

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

DFD	– Data Flow Diagram, діаграма потоків даних
DFT	– Discrete Fourier Transform, дискретне перетворення Фур'є
DWT	– Discrete Wavelet Transform, дискретне вейвлет-перетворення
FDFT	– Fast Discrete Fourier Transform, швидке дискретне перетворення Фур'є
FWHM	– Full Width at Half Maximum, поширений спосіб опису ширини кривої, зокрема імпульсу або розподілу
LSB	– Least Significant Bit, в цифровій спектрометрії відповідає значенню молодшого розряду аналого-цифрового перетворювача
PSD	– Pulse Shape Discrimination, розрізнення за формою сигналу
STL	– Standard Template Library, стандартна бібліотека шаблонів мови програмування C++
UML	– Unified Modeling Language, уніфікована мова моделювання
АЦП	– Аналого-Цифровий Перетворювач
ШНМ	– Штучна Нейронна Мережа

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Протягом довгого часу класичні методи аналізу спектрометричних сигналів базувалися на використанні аналогової електроніки, але завдяки активному розвитку комп'ютерних технологій значного поширення набули комп'ютерні методи реєстрації та вимірювання спектрів. Під поняттям «спектрометричного сигналу» в спектрометрії іонізуючого випромінювання зазвичай розуміють послідовність імпульсів, яка генерується детекторами рентгенівського, гамма або іншого типу випромінювання. Саме імпульси, а точніше їх параметри, несуть в собі закодовану корисну інформацію про матеріали і процеси, що досліджуються [1, 2]. В цифровій спектрометрії для запису таких сигналів з метою їх подальшого аналізу використовуються спеціальні пристрої — оцифровувачі (*англ. digitizer*), у якості яких застосовуються спеціалізовані аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) конвеєрного типу. Передові компанії (Spectrum Instrumentation, Mirion, Caen) [3-5], що працюють у галузі розробки спектрометричного обладнання, на сьогоднішній день надають велику кількість пропозицій щодо оцифровувачів, які активно використовуються у сучасних спектрометричних системах. Принцип їх роботи полягає в розпізнаванні за певними критеріями та цифровому записі окремих кадрів (відрізків часу, протягом яких реєструються корисні сигнали детектора [6]).

Комп'ютерний аналіз дозволяє виконувати обробку отриманих масивів цифрових даних з метою визначення основних характеристик імпульсів (час появи, амплітуди), побудови спектрів та отримання корисної інформації про досліджені зразки. Спектрометричний сигнал, що виробляється детектором, являє собою набір імпульсів, які формуються у випадкові моменти часу та мають різні амплітуди. Однак випадковий характер появи імпульсів часто призводить до їх взаємного накладання (*pile-up effect*), в результаті чого змінюється їх амплітуда і тривалість, а це, в свою чергу, призводить до спотворення первинної інформації [7]. Відновити

її повністю методами аналогової спектрометрії практично неможливо, тобто, результуючий спектр завжди має певні похибки.

На відміну від аналогових методів вимірювання, в яких обробка сигналу здійснюється виключно апаратними засобами, комп'ютерний аналіз надає додаткові можливості. Це включає в себе не лише використання математичних методів обробки оцифрованого сигналу, але і його логічний аналіз з метою відновлення частково втраченої інформації, що може поліпшити достовірність отриманого кінцевого результату.

Теоретичні й практичні дослідження у галузі розробки комп'ютерних методів обробки спектрометричних сигналів та їх впровадження є важливими і можуть покращити роботу комп'ютеризованих систем спектрального аналізу. Особливо враховуючи, що вищезазначені системи використовуються в багатьох життєво необхідних галузях, таких як: моніторинг і охорона навколишнього середовища [8, 9], металургія, хімічна промисловість, наукові дослідження в області ядерної фізики [10, 11], тощо. Серед вчених, що приділяють увагу цим дослідженням слід зазначити: Даневича Ф. А., Кобичева В. В., Реву С. М., Онищенко Г. М., Wolszczak W., Dorenbos P., Pollastrone F., Cardarilli G., Riva M., Costa Pereira R., Fernandes A., Khilkevitch, E., Shevelev, A., Yoon S., Lee C., Won B., Hong S., Seo, H., Lopatin M., Moskovitch N., Trigano T., Sepulcre Y., M. Morhac, V. Matousek та інші [12-14, 16, 22, 24, 25, 27-30, 40-41].

Окрім корисної складової, оцифровані спектрометричні сигнали також зазвичай містять електричний шум, що є спричинений власними шумами детектора випромінювання або іншими компонентами електронного обладнання. Сучасні дослідження у галузі комп'ютерного аналізу таких сигналів часто підкреслюють важливість механізмів зменшення впливу електричного шуму в процесі обробки цифрових даних та спрямовані на покращення ефективності методів аналізу. Також роботи в цій області показують, що точність та швидкодія відомих методів комп'ютерної обробки може знижуватися внаслідок взаємного накладання імпульсів — суперпозиції. Варто відмітити, що більш прості

комп'ютерні методи аналізу, які працюють швидко, можуть демонструвати не найкращу точність розпізнавання, особливо при частій суперпозиції імпульсів. В свою чергу, методи, які виконують складну додаткову обробку оцифрованого сигналу і показують кращу точність розпізнавання, можуть працювати повільніше. Логічним є прагнення покращити обидва ці параметри або оптимізувати співвідношення точності розпізнавання та швидкості роботи методів аналізу.

Окрім того, існує проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого комп'ютерного методу обробки, оскільки немає можливості отримання повністю достовірних вхідних даних через випадковість та непередбачуваність процесів на вході детектора. Експериментальні методи досліджень є досить затратними і оцінюють ефективність комп'ютерної обробки лише за непрямими параметрами для чітко визначених умов експерименту. Вирішити цю проблему можна за допомогою комп'ютерного моделювання [15] цифрових вхідних даних із задалегідь відомими параметрами та верифікацією правильності розпізнавання імпульсів за результатами аналізу.

Викладене вище обумовлює актуальність рішення **науково-прикладної задачі** розробки нових методів аналізу параметрів спектрометричних сигналів з покращеною фільтрацією сигналу від шуму та додатковою обробкою імпульсів при суперпозиції з метою підвищення точності роботи комп'ютерних систем спектрального аналізу. Також важливими супутніми напрямками є розробка моделей і методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів та введення критеріїв верифікації результатів роботи методів комп'ютерної обробки даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи пов'язана з дослідженнями:

- Участь у НДР «Концептуальні моделі, методи і технології створення адаптивних інформаційних систем на основі знання-орієнтованих підходів та засобів розробки програмного забезпечення» за 2022 – 2024 рр. (ДР № 0121U110310), у якості виконавця.

Мета і задачі дослідження. Головною *метою* дисертаційної роботи є підвищення точності розпізнавання та вимірювання параметрів спектрометричних сигналів в комп'ютерних системах спектрального аналізу. Досягнення мети можливе завдяки удосконаленню або розробці нових методів комп'ютерної обробки даних з покращеним фільтруванням імпульсного сигналу від електричного шуму та додатковою обробкою імпульсів при їх суперпозиції. Разом з цим, важливими є також вдосконалення моделей та методів комп'ютерного моделювання цифрових образів сигналів та розробка алгоритмів програмної верифікації результатів роботи методів аналізу.

Для досягнення поставленої мети та рішення поставленої наукової задачі був визначений наступний ряд *завдань*.

1. Теоретичний аналіз існуючих математичних моделей, обчислювальних методів та підходів, що використовуються для визначення параметрів оцифрованих спектрометричних сигналів в комп'ютерних системах спектрального аналізу.

2. Розробка нових методів комп'ютерної обробки спектрометричних даних:

2.1. Методу комп'ютерного аналізу на основі дискретних перетворень Фур'є та обробкою суперпозиції імпульсів.

2.2. Методу комп'ютерного аналізу з використанням дискретних вейвлет-перетворень.

3. Удосконалення математичних моделей і методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів.

4. Розробка алгоритму верифікації результатів роботи різних методів комп'ютерної обробки даних.

5. Програмна реалізація розроблених методів аналізу, комп'ютерного моделювання та верифікації спектрометричних сигналів.

6. Розробка моделі розподіленої комп'ютерної системи для отримання, передачі та комп'ютерної обробки спектрометричних даних.

7. Проведення експериментів на змодельованих даних з метою оцінки ефективності розроблених методів комп'ютерного аналізу та порівняння з існуючими підходами.

8. Застосування розроблених методів для комп'ютерного аналізу спектрометричних даних, отриманих під час реальних експериментів.

9. Розробка науково-практичних рекомендацій по використанню розроблених моделей та методів в комп'ютерних системах спектрального аналізу.

Об'єкт дослідження — це процеси обробки даних в комп'ютерних системах аналізу спектрометричних сигналів, оцифрованих за допомогою спеціальних апаратних засобів.

Предмет дослідження — це комп'ютерні методи розпізнавання, аналізу та вимірювання параметрів оцифрованих спектрометричних сигналів.

Методи дослідження полягають у використанні принципів та методів системного аналізу, а також застосування імітаційного та математичного моделювання, чисельних методів, теорії математичної статистики, теорії ймовірностей, методів цифрової обробки сигналів, методів і алгоритмів аналітичної обробки та інтелектуального аналізу великих масивів даних.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному.

1. **Вперше розроблено** комп'ютерний метод розпізнавання та аналізу спектрометричних сигналів, особливістю якого є механізм фільтрації оцифрованого сигналу від електричного шуму з використанням алгоритмів швидкого дискретного перетворення Фур'є та додаткова обробка імпульсів при накладанні один на одного (суперпозиції), що в сукупності забезпечує підвищення точності розпізнавання параметрів сигналів в комп'ютерних системах спектрального аналізу.

2. **Вперше розроблено** комп'ютерний метод аналізу параметрів спектрометричних сигналів, що відрізняється від існуючих механізмів фільтрації сигналу від шуму за допомогою дискретних вейвлет-перетворень та алгоритму

BayesShrink для автоматичного визначення шумового порогу, а також алгоритмом аналізу рівня сигналу з обробкою суперпозиції імпульсів. Це дозволило підвищити універсальність застосування методу та точність визначення параметрів спектрометричних даних.

3. **Удосконалено** математичні моделі і алгоритми моделювання спектрометричних сигналів, шляхом реалізації можливості симуляції образу сигналу з потрібним розподілом амплітуд імпульсів на основі попередньо завантаженого шаблону — табличної функції розподілу амплітуд. Це дало можливість створення цифрових образів сигналів з повністю визначеними вхідними даними з розподілом амплітуд імпульсів, наближеним до реального джерела випромінювання або ідеалізованим розподілом, які можуть бути використані для подальшої перевірки ефективності роботи комп'ютерних методів спектрального аналізу.

4. **Набув подальшого розвитку** метод комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів, шляхом підвищення деталізації генерації образу сигналу та реалізації можливості випадкового зміщення часу виникнення і амплітуди імпульсів відносно точок дискретизації. Це дозволило програмно генерувати цифровий образ сигналу з дискретністю, яка наближує його до реального аналогового сигналу.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження було виконане здобувачем самостійно, всі сформульовані в роботі положення, рекомендації та висновки були обґрунтовані особистими дослідженнями автора. Для аргументації окремих положень використані праці інших науковців, на які зроблені відповідні посилання. В індивідуальних наукових працях застосовано лише авторські ідеї та розробки.

Дисертант брав активну участь у наукових дискусіях, підготовці та написанні наукових статей, що були опубліковані за темою дисертації. Також автор доповідав результати досліджень на міжнародних наукових конференціях.

У праці [1] було показано результати розробки методу аналізу спектрометричних сигналів з механізмом фільтрації оцифрованого сигналу від електричного шуму за допомогою алгоритмів швидкого дискретного перетворення Фур'є та додатковою обробкою імпульсів при суперпозиції. Автору належить розробка та програмна реалізація нового методу аналізу, розробка алгоритму верифікації розпізнаних даних, а також порівняння з існуючими методами спектрального аналізу після отримання основних метрик їх роботи. В роботі [2] було розглянуто існуючі підходи до комп'ютерного моделювання та аналізу спектрометричних сигналів, а також розглянуто метод розпізнавання основних параметрів імпульсів. Автору належить опис та програмна реалізація існуючого підходу до комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів і програмна реалізація можливого методу їх аналізу. Робота [3] присвячена розробці математичних моделей і методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону. Здобувачу належить розробка моделей і методів симуляції цифрових образів сигналів, програмна реалізація запропонованих підходів та візуалізація результатів їх роботи. В роботі [4] було представлено метод комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією. Автор брав участь у розробці підходу до моделювання, виконав програмну реалізацію запропонованого методу симуляції та отримав результати обробки модельованих даних простими методами комп'ютерного аналізу. В роботі [5] було представлено розроблену програмну платформу, яка може здійснювати комп'ютерне моделювання, аналіз та верифікацію спектрометричних даних. Автору належить програмна реалізація даного додатку, опис його функціональних можливостей та внутрішньої архітектури. Робота [6] присвячена розробці нового методу комп'ютерного аналізу спектрометричних даних з використанням дискретних вейвлет-перетворень. Автором було розроблено та програмно реалізовано новий метод аналізу, отримано метрики точності та швидкодії його роботи у порівнянні з кількома існуючими підходами. В наукових працях [7–10] здобувач розробляв програмне забезпечення для реалізації запропонованих

методів і моделей, брав участь у написанні тексту матеріалів тез доповідей та виконував доповіді на конференціях. Результатом всіх зазначених наукових робіт стало написання матеріалів дисертаційної роботи.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблені методи комп'ютерного аналізу параметрів спектрометричних сигналів з покращеною фільтрацією від шуму та обробкою суперпозиції імпульсів можуть бути використані при розробці програмно-апаратних комплексів спектрального аналізу. Отримані результати зазначають, що дані методи можуть показувати високу точність визначення параметрів оцифрованих сигналів, отриманих зі сцинтиляційного детектора, в яких присутні електричні шуми характерні для цього типу детекторів.

Вдосконалені математичні моделі та методи комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів можуть використовуватися для створення цифрових образів сигналів, які досить складно або дорого вартісно отримати експериментальним шляхом. Окрім цього, використання розробленого програмного засобу, що реалізує описані підходи до моделювання та запропонований метод верифікації, дозволяє обґрунтовано оцінити точність роботи як вже відомих, так і нових методів спектрального аналізу. Наведені результати оцінки максимальної похибки дискретизації, що виникає під час аналізу оцифрованих спектрометричних сигналів простими методами, можуть бути враховані при виборі конкретної моделі діджитайзера і частоти оцифрування для проведення експериментальних досліджень.

Отримані результати дослідження також можуть бути використані у процесі викладання навчальних курсів «Системи автоматичного контролю і управління» та «Інтелектуальні автоматизовані системи обробки сигналів» у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати розробки, висновки і пропозиції, які вказані в дисертації, обговорювалися та були схвалені на засіданнях кафедри комп'ютерних систем та

робототехніки Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Ключові положення дослідження оприлюднені у доповідях на науково-технічних конференціях всеукраїнського та міжнародного рівнів (2023–2026 роки).

– Міжнародній науково-технічній конференції «Комп’ютерне моделювання в наукоємних технологіях» КМНТ–2023р (Україна, м. Харків, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, 2023р).

– Міжнародній науково-технічній конференції «Комп’ютерне моделювання в наукоємних технологіях» КМНТ–2024р (Україна, м. Харків, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, 2024р).

– Міжнародній науково-теоретичній конференції «Theoretical and practical scientific achievements: research and results of their implementation» (Велика Британія, Англія, м. Ліверпуль, 2025р).

– Міжнародній науково-теоретичній конференції «Scientific Forum: Theory and Practice of Research» (США, м. Сан-Франциско, 2026р).

Публікації. Теоретичні положення, результати тестування і висновки дисертації викладені у 10 наукових працях, з яких 1 — у наукових фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз [1], 5 — у наукових фахових виданнях України [2–6] та 4 є тезами наукових доповідей [7–10].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Загальний обсяг дисертації становить 163 сторінки, у тому числі: анотації на 11 сторінках, зміст на 2 сторінках, основний текст на 130 сторінках, список використаних джерел із 86 найменувань на 11 сторінках та один додаток на 4 сторінках. Робота містить 10 таблиць та 61 рисунок.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗПІЗНАВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ В КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

1.1. Огляд методів комп'ютерного аналізу спектрометричних сигналів

Останні десятиліття, на противагу класичним методам аналізу спектрометричних сигналів з використанням аналогової електроніки, інтенсивного розвитку набули комп'ютерні методи реєстрації та вимірювання спектрів, в основі яких в першу чергу покладено програмну обробку оцифрованих сигналів, що надходять з детекторів. Для того, щоб отримати такі цифрові дані під час реальних експериментів, зазвичай використовуються спеціальні комп'ютеризовані системи, що включають в себе наступні складові:

- джерело рентгенівського або гамма-випромінювання – радіоактивний ізотоп, рентгенівська трубка або ін.;
- сцинтиляційний або напівпровідниковий детектор;
- фотоелектронний помножувач (ФЕП);
- аналого-цифровий перетворювач (АЦП) або діджитайзер;
- комп'ютер або розподілена комп'ютерна система.

Загальна схема такого обладнання зображена на Рис. 1.1 [16]. Основний принцип роботи такої системи базується на тому, що при потраплянні частинок випромінювання на кристали сцинтиляційного детектора виділяються фотони світла [17], і ці сигнали мають різну форму, залежно від типу випромінювання (гамма, нейтронне, рентгенівське випромінювання та ін.) та його інтенсивності [18-20]. Більш деталізований принцип роботи устаткування полягає в наступному. Спершу кванти з джерела випромінювання, потрапляючи у сцинтиляційний детектор, генерують фотони світла. В подальшому сигнали з сцинтиляційного детектора конвертуються в електричні сигнали і підсилюються за допомогою фотоелектронного помножувача (PMT – photo-multiplier tube).

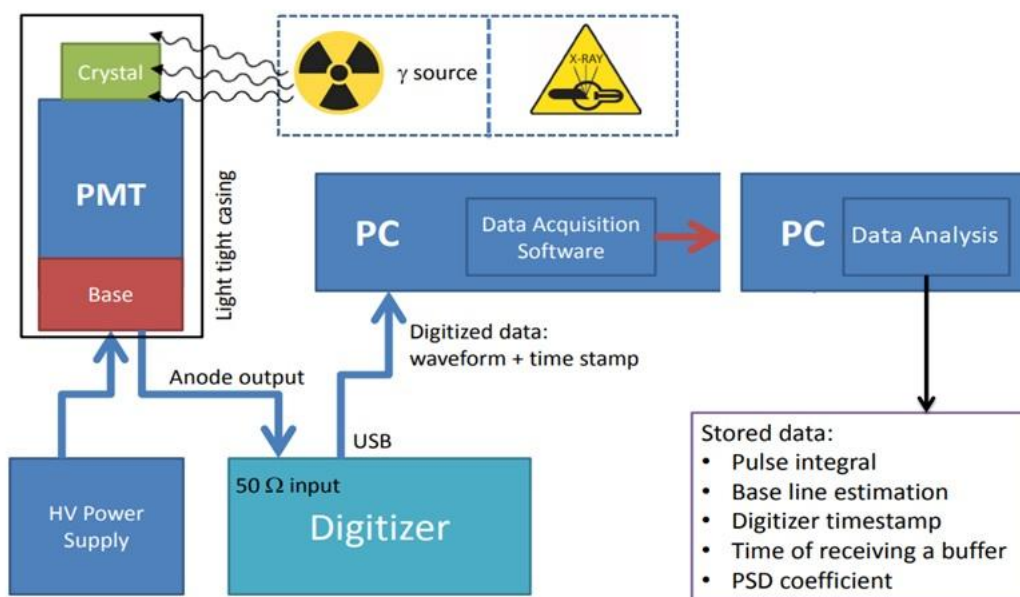


Рис. 1.1. Схема комп'ютеризованої системи для отримання цифрових даних та аналізу спектрометричних сигналів.

Підсилені електричні сигнали з помножувача перетворюються з аналогового у цифровий формат та передаються до комп'ютерної системи за допомогою оцифровувача сигналу — діджитайзера. Дані в цифровій формі передаються до комп'ютерної системи, яка може провести їх опрацювання для розпізнавання і аналізу параметрів записаних сигналів, оскільки отримані цифрові масиви даних у певному вигляді відтворюють характеристики випромінювання. На рисунку 1.2 представлено вищезазначені потоки даних та процеси або перетворення, що відбуваються з ними, у вигляді DFD діаграми (Data Flow Diagram) [21]. Комп'ютерні методи аналізу оцифрованих спектрометричних сигналів використовуються для обробки цифрових даних за певними алгоритмами, що дозволяють визначити основні параметри імпульсів, такі як час появи і амплітуди. Оскільки амплітуди зареєстрованих імпульсів є співмірними з енергіями зареєстрованих квантів випромінювання, то в результаті комп'ютерної обробки можна побудувати спектр і зробити висновки про якісний та кількісний склад матеріалу, що досліджується.

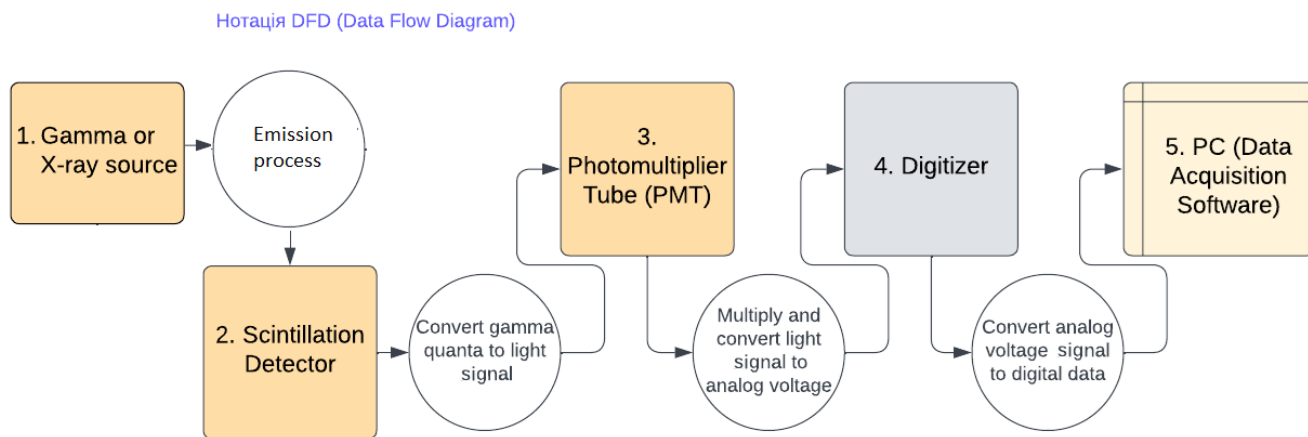
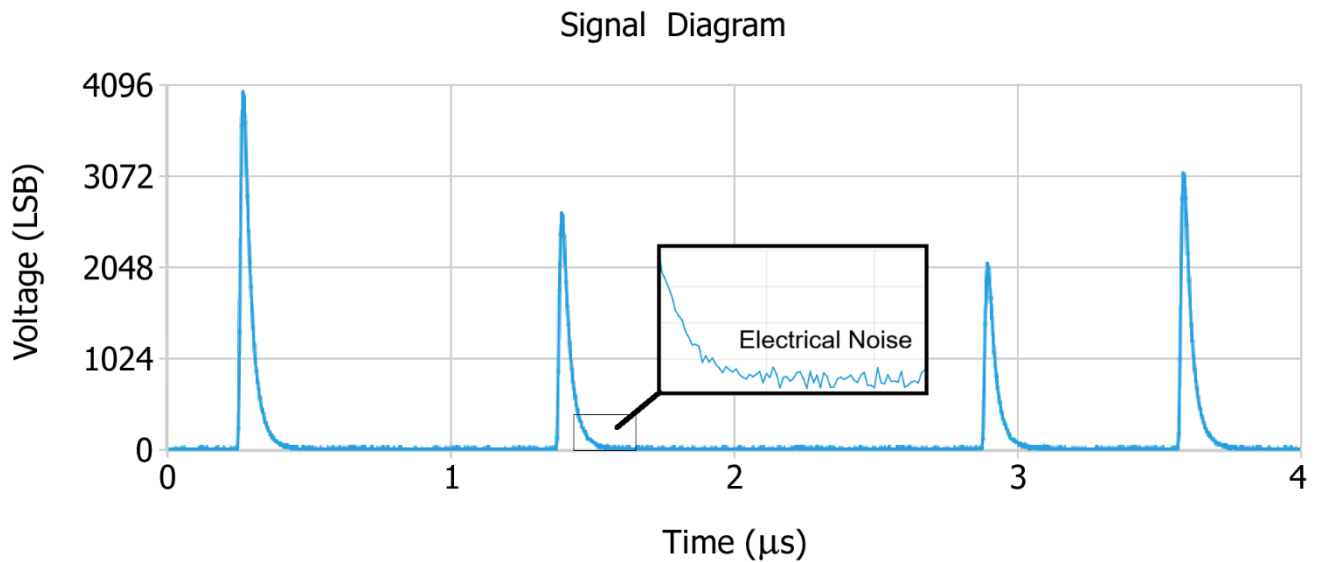
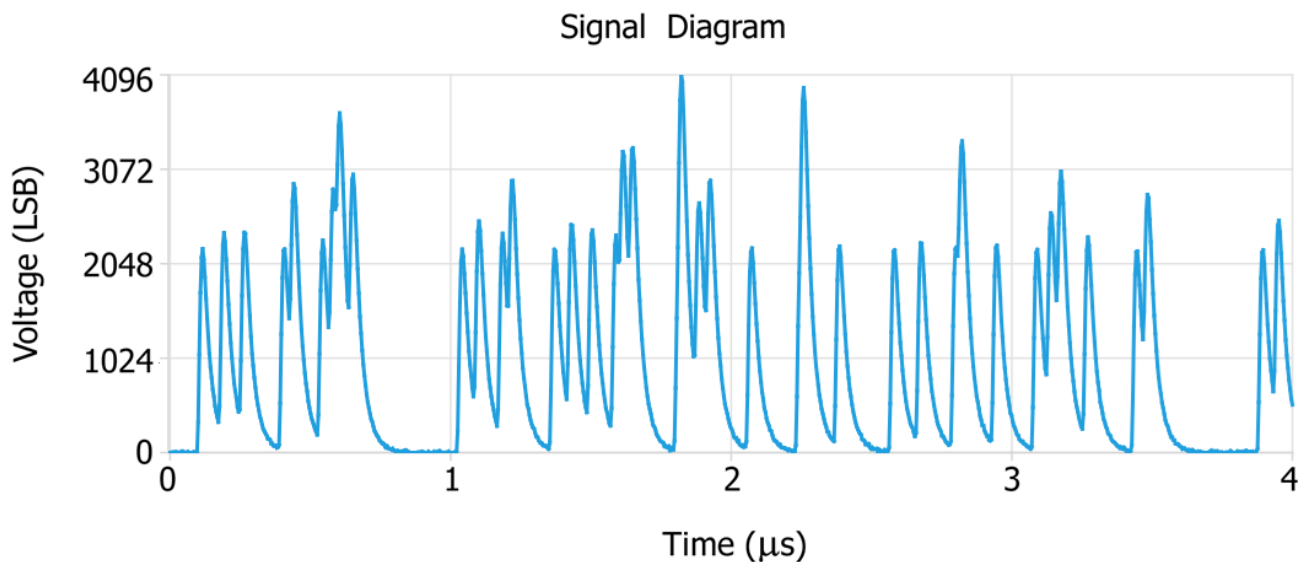


Рис. 1.2. Діаграма потоків даних, що відображає процес отримання цифрових масивів даних для подальшої комп'ютерної обробки.

Поява імпульсів спектрометричного сигналу є випадковою, тому вони можуть накладатися один на одного, створюючи так званий pile-up ефект. Це може суттєво змінювати форму сигналу та ускладнювати аналіз. Інтенсивність та ймовірність суперпозиції імпульсів залежить від середньої кількості частинок випромінювання, яка реєструється детектором за одиницю часу. Цей параметр ще називають рівнем завантаження детектора. На рисунку 1.3 (а, б) зображено вигляд оцифрованого імпульсного сигналу при різних рівнях завантаження, де можна побачити наскільки змінюється форма сигналу при високих рівнях завантаження і частій суперпозиції імпульсів. Також потрібно відмітити, що цифрові сигнали, отримані з детекторів, містять компонент електричного шуму. Внаслідок шумів відбувається певна модифікація форми сигналу, як показано на рис. 1.3 а, яка може впливати на точність визначення параметрів імпульсів методами комп'ютерної обробки. Як можна побачити з рисунку 1.3 б, форма сигналу при високих рівнях завантаження і дуже частому накладанні імпульсів є значно видозміненою. Прості методи розпізнавання параметрів імпульсів можуть некоректно визначати їх амплітуди та час появи при таких рівнях завантаження. Завдання правильного визначення параметрів імпульсів при їх частій суперпозиції потребує більш складних алгоритмів аналізу та додаткової обробки сигналу.



(a)



(б)

Рис. 1.3. Вигляд оцифрованого імпульсного сигналу при різних рівнях завантаження детектора (імпульсів за секунду): а – 10^6 , б - 10^7 .

1.1.1. Методи визначення базової лінії сигналу

Одним з першочергових етапів комп'ютерного аналізу оцифрованого сигналу є визначення базової лінії сигналу (baseline). Ця лінія являє собою рівень електричного сигналу за умови відсутності імпульсів у поточний період часу, а також є свого роду нижнім порогом, від якого починають формуватися імпульси. В частині випадків устаткування може бути налаштоване таким чином, щоб базова

лінія сигналу розташовувалася близько нуля. Проте також існують сценарії, коли дана лінія може бути зміщеною від нуля, і необхідно програмно визначити її зміщення відносно нульового рівня. Потрібно відмітити, що базова лінія, як і імпульси, містить також компоненту електричного шуму, що ускладнює аналіз. На рисунку 1.4 можна побачити індикацію того, де проходить базова лінія для візуалізованого імпульсного сигналу.

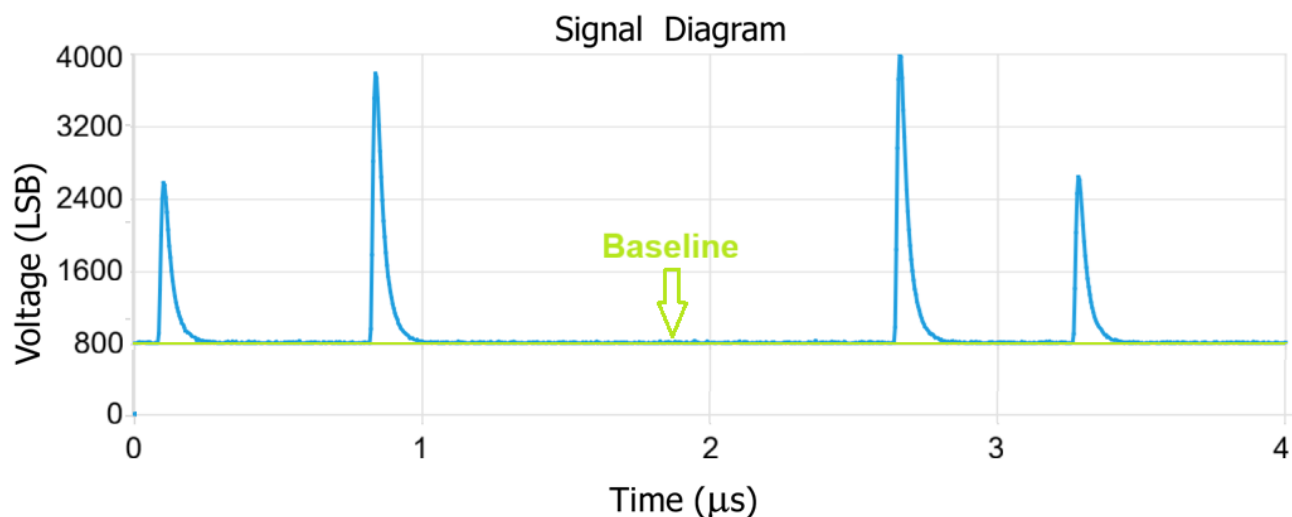


Рис. 1.4. Індикація базової лінії сигналу.

Існують декілька алгоритмів знаходження базової лінії, одними з яких є [22]:

- Використання середньоарифметичного або медіанного значення.
- Усереднення за вибраним набором (Average over the selection set).
- Усереднення за вибраним набором плоских відрізків (Average over the flat chunk selection set).

Найбільш точними та ефективними є два останні підходи з вищенаведеного списку. Алгоритм усереднення за вибраним набором базується на тому, щоб ітеративно визначати дві ключові характеристики дискретних значень сигналу — середнє арифметичне і медіанне значення, порівнювати їх між собою і відкидати певну частину найбільших або найменших значень сигналу, поки не буде знайдено базову лінію. В свою чергу алгоритм усереднення за вибраним набором плоских відрізків є оптимізованою версією попереднього алгоритму.

1.1.2. Прості методи розпізнавання та аналізу параметрів імпульсів

Насамперед розглянемо базові методи розпізнавання та визначення основних параметрів оцифрованих імпульсних сигналів, а саме, час появи та амплітуди імпульсів, що можуть застосовуватися в комп'ютеризованих системах спектрального аналізу. Одними з представників таких базових підходів є методи Максимуму та Сум [22].

Метод Максимуму (Maximum). Даний метод є одним з найпростіших і швидких, принцип його роботи полягає в наступних кроках:

1. Визначення набору інтервалів, на яких значення сигналу перевищує значення базової лінії на величину встановленого порогу (регульований параметр методу). Тобто, для кожного значення сигналу s_i потрібно знайти всі інтервали індексів $B_j \dots E_j$, в яких $\forall i \in [B_j \dots E_j] : |s_i| > r$, де r – поріг дискримінації. Ці інтервали відображають початок і кінець кожного імпульсу.

2. Визначення локального максимуму значення сигналу в кожному інтервалі, який і буде прийнято за амплітуду імпульсу.

Основними недоліками цього методу є те, що отримані значення амплітуд є чутливими до електричного шуму. Окрім того, через дискретність діджитайзера, навіть за відсутності електричного шуму, значення часу появи імпульсу або амплітуди може бути визначено з похибкою, максимальна величина якої залежить від ширини кроку дискретизації (частоти оцифрування). Також важливо відмітити, що даний алгоритм не здатний правильно визначати амплітуди імпульсів при їх накладанні один на одного (суперпозиції).

Метод Сум (Sum). Одним з можливим підходів для зменшення впливу електричного шуму на результат визначення амплітуди імпульсу є використання суми значень сигналу s_i в визначеному діапазоні початку B_j та кінця E_j імпульсу:

$$S = \sum_{i=B_j}^{E_j} s_i. \quad (1.1)$$

Значення суми залежить від того, наскільки імпульс потрапляє в інтервал: для імпульсів з більшою амплітудою, більше точок потраплятимуть у інтервал

обчислення суми. Таким чином значення амплітуди імпульсу може бути обчислене за наступною формулою:

$$A_j = \frac{\sum_{i=B_j}^{E_j} s_i}{\sum_{i=B_j}^{E_j} p(i-t_j)}, \quad (1.2)$$

де A_j – значення амплітуди імпульсу; $p(t)$ – змодельована нормалізована форма імпульсу, що згенерований одним зареєстрованим квантом (залежить від типу детектора і типу випромінювання); t_j – час появи імпульсу j , який є невідомим. Значення t_j може бути знайдене таким чином, що різниця між позицією центру мас отриманих значень сигналу s_i та одного імпульсу зі зміщенням t_j є мінімальним згідно наступної формули:

$$\min \left(\left| \frac{\sum_{i=B_j}^{E_j} s_i \cdot (i-i_{max})}{\sum_{i=B_j}^{E_j} s_i} - \frac{\sum_{i=B_j}^{E_j} p(i-t_j) \cdot (i-i_{max})}{\sum_{i=B_j}^{E_j} p(i-t_j)} \right| \right). \quad (1.3)$$

Даний алгоритм дозволяє зменшити вплив електричного шуму на точність визначення амплітуд імпульсів, проте також не здатний правильно визначати їх амплітуди при суперпозиції.

Коротко підсумовуючи огляд базових методів аналізу, можна зробити висновки, що ці методи є досить швидкими та можуть застосовуватися для визначення параметрів спектрометричних сигналів при невеликих рівнях завантаження ($< 10^4$ імпульсів за секунду), коли ймовірність накладання імпульсів є низькою. Проте дані підходи є в тій чи іншій мірі чутливими до електричного шуму та не можуть правильно визначати амплітуди імпульсів при високих рівнях завантаження і частій суперпозиції.

1.1.3. Методи розпізнавання та аналізу параметрів імпульсів з більш складною обробкою даних

Далі розглянемо методи розпізнавання та вимірювання параметрів імпульсів, які виконують більш складну обробку сигналу з метою зменшення впливу

електричного шуму на результати аналізу або для реалізації можливості коректного визначення амплітуди та часу появи імпульсів при їх частій суперпозиції.

Метод аналізу з використанням фільтрів сигналу. У роботі [16] було представлено метод аналізу оцифрованого спектрометричного сигналу (рентгенівського та гамма-випромінювання) отриманого зі сцинтиляційного детектора, одним з етапів роботи якого є фільтрація сигналу за допомогою застосування цифрових фільтрів (ковзне середнє, фільтр Бесселя, Чебишева або Баттерворта) [23]. Загальна схема алгоритму обробки цифрових даних наводиться на рисунку 1.5.

Основними етапами роботи даного методу є:

1. Фільтрація та згладжування форми сигналу за допомогою обраного фільтра.
2. Визначення базової лінії сигналу.
3. Розпізнавання початку та кінця імпульсу при перевищенні рівня сигналу певного порогу відносно базової лінії (пори́г дискримінації).
4. Обчислення інтегралу функції сигналу за часом (співмірного енергії імпульсу) та визначення того, чи перевищує це значення заданий поріг.
5. Визначення кількості перетинів нуля лінії постійного дробового дискримінатора (Digital Constant Fraction Discriminator - DCFD) для розпізнавання та відкидання імпульсів, які накладаються один на одного.
6. Обчислення співвідношенням інтегралів коротких і довгих частин імпульсу (коефіцієнту форми імпульсу I_1/I_2) для визначення типу зареєстрованого кванту випромінювання за формою сигналу.
7. Додавання інформації про параметри імпульсу в масив розпізнаних імпульсів.

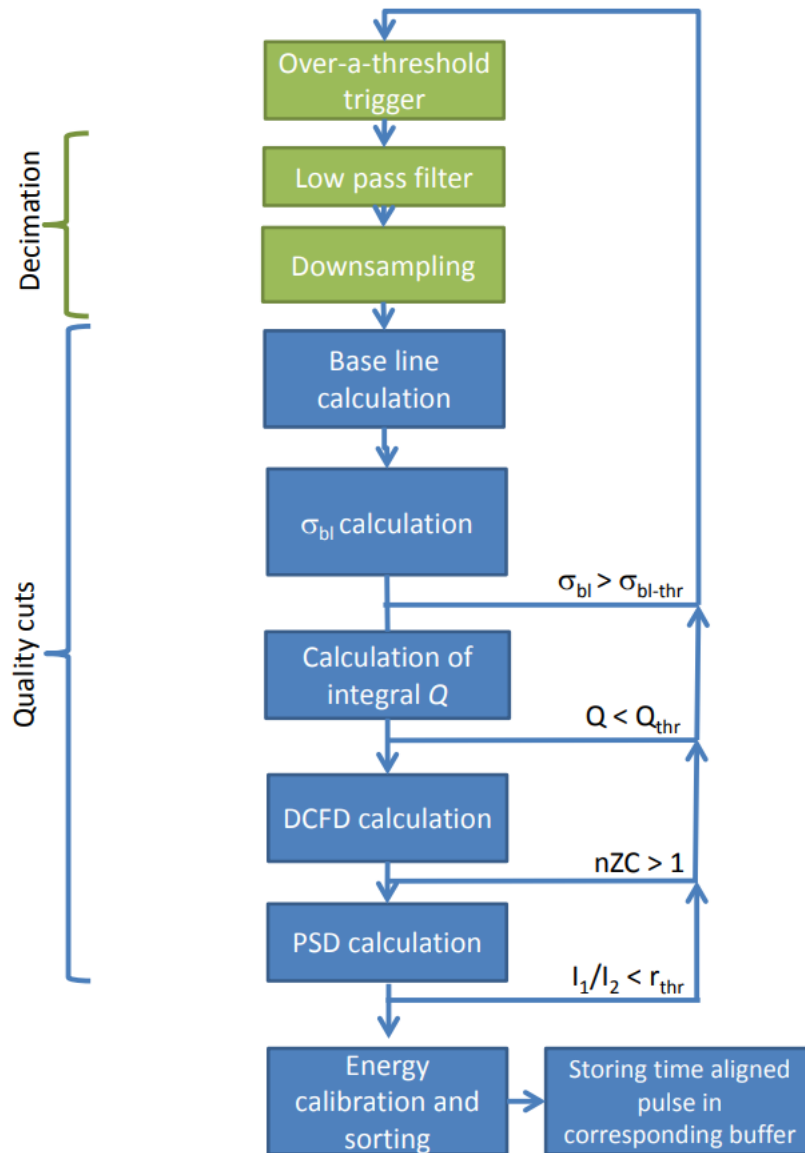


Рис. 1.5. Діаграма процесу обробки даних. σ_{bl} – стандартне відхилення від базової лінії; σ_{bl-thr} – максимальний поріг відхилення від базової лінії; Q – інтеграл функції сигналу імпульсу; Q_{thr} – мінімальний поріг інтегралу імпульсу; nZC – кількість перетинів нуля лінії DCFD сигналу; I_1/I_2 – коефіцієнт форми імпульсу; r_{thr} – поріг розрізнення типу імпульсів за формою.

Для усереднення та фільтрації цифрового сигналу від електричного шуму в представленому методі було розглянуто можливість використання одного з фільтрів, таких як: ковзне середнє, фільтр Бесселя, Чебишева або Баттерворта. На

рисунку 1.6 можна побачити приклад застосування вищезазначених фільтрів на ступінчатий сигнал та результуючу форму сигналу після фільтрації.

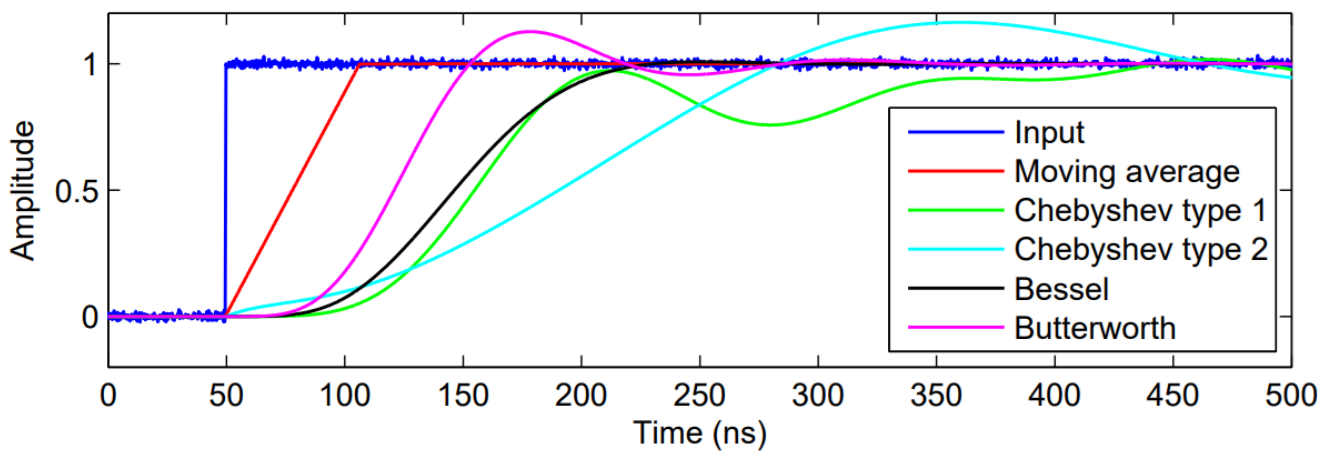


Рис. 1.6. Порівняння результатів застосування п'яти різних цифрових фільтрів до вхідного ступінчатого сигналу.

Але варто зазначити, що застосування вищезазначених фільтрів може модифікувати також і сам сигнал в сторону сповільнення наростання, зміни амплітуди або іншим чином. Це може призводити до відхилень при визначенні амплітуди або точного часу появи імпульсу, особливо у випадках коротких імпульсів з різким фронтом та спадом. Відкритим питанням в даному підході залишилася можливість фільтрації сигналу від електричного шуму без суттєвої модифікації корисної складової, що аналізується.

Метод Підбору (Fitting) представлений в роботі [24] виконує більш складну обробку, порівняно з базовими методами аналізу, та дозволяє розрізнити імпульси при суперпозиції. Основний принцип його роботи полягає в наступному:

1. Визначення набору інтервалів $B_j \dots E_j$, на яких значення сигналу s_i перевищує значення базової лінії на величину допустимого порогу, та визначення в цих інтервалах локальних максимумів, що ідентифікують імпульси.
2. Підбір амплітуди і часу реєстрації кожного імпульсу j шляхом пошуку мінімальної залишкової функції, яка обчислюється за формулою:

$$R(t_j, A_j) = \sum_{i=C_j}^{D_j} |s'_i - A_j p(i - t_j)|, \quad (1.4)$$

де $C_j < t_j^0$ та $D_j > t_j^0$ визначають інтервал обчислення залишкової функції (t_j^0 – час, коли сигнал s_i досягає локального максимуму); A_j та t_j є амплітудою та часом реєстрації імпульсу j , $p(t)$ – змодельована нормалізована форма одного імпульсу. s'_i – скориговане значення сигналу, що враховує вплив спадаючої компоненти попередніх імпульсів, та в свою чергу обчислюється за формулою:

$$s'_i = s_i - \sum_{k=0}^{j-1} A_k p(i - t_k), \quad (1.5)$$

де s_i – значення сигналу, A_k та t_k – амплітуда та час появи k -го попереднього імпульсу відповідно.

Для певного обраного t_j , значення A_j , яке мінімізує функцію $R(t_j, A_j)$, може бути визначено методом найменших квадратів і обчислюється наступним чином:

$$A_j(t_j) = \frac{\sum_{i=C_j}^{D_j} s'_i \cdot p(i - t_j)}{\sum_{i=C_j}^{D_j} p(i - t_j)^2} \quad (1.6)$$

Значення часу реєстрації t_j , при якому залишкова функція $R(t_j, A_j)$ досягає мінімуму, може бути обчислена за допомогою методу бінарного чи тернарного пошуку, які з одного боку працюють досить швидко, а з іншого — надають достатню точність при визначенні часу реєстрації імпульсу.

Методи Деконволюції (Deconvolution) розглянуті в роботах [22, 25] в основному використовуються коли потрібно розрізнити імпульси, які дуже часто накладаються один на одного. Сигнал $s(t)$ представляється як згортка багатьох дельта-функцій з ядром згортки (що являє собою форму одного імпульсу) згідно наступної формули:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t' - t) \sum_{i=0}^L A_i \cdot \delta(t' - t_i) dt' + n(t), \quad (1.7)$$

де L – число зареєстрованих імпульсів, A_j та t_j – амплітуда та час реєстрації імпульсу j , $p(t)$ – змодельована нормалізована форма одного імпульсу, $n(t)$ – компонента шуму, що накладається на сигнал. У дискретній формі, якщо знехтувати компонентою електричного шуму, ця формула може бути наближено представлена у вигляді $s = P \cdot A$, де s є вектором дискретних значень сигналу, P є двомірною матрицею згортки, A – вектор амплітуд імпульсів. Значення матриці є рівними $P_{ij} = p(i-j)$. Якщо час реєстрації імпульсу t_i є цілим числом, тоді значення A_{t_i} в векторі є рівним значенню амплітуди імпульсу. Якщо ж час реєстрації є дробовим числом, то можна припустити, що сума двох сусідніх елементів вектору $A_{[t_i]} + A_{[t_i]+1}$ є приблизно рівним амплітуді імпульсу в разі достатньо високої частоти оцифрування порівняно з тривалістю формування імпульсу. Для реалізації процедури деконволюції зазвичай використовуються ітеративні алгоритми, наприклад Gold алгоритм [26-28].

Загалом у роботі [22] було детально досліджено та отримано порівняльні характеристики одразу кількох вищезазначених методів аналізу спектрометричних сигналів, а саме методів Максимуму, Сум, Підбору та Деконволюції. Було отримано результати роботи цих методів на змодельованих цифрових даних і візуалізовано на діаграмах залежність розпізнавання кількості імпульсів від рівня завантаження детектора. Окрім цього, за допомогою кожного з методів було отримано спектри та проаналізовано їх характеристики. Варто відмітити, що методи Підбору та Деконволюції продемонстрували в цих дослідженнях кращі результати аналізу даних за інші підходи. При цьому для змодельованих сигналів найкращі результати з точки зору кількості розпізнаних імпульсів та енергетичної роздільної здатності при рівнях завантаження до $2 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ для детектора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ показав метод Підбору. В цілому авторами були приведені детальні характеристики роботи описаних методів, такі як загальна кількість розпізнаних імпульсів, ширина на піввисоті для піків (FWHM) різних енергій, вплив шуму та час виконання. Беручи до уваги той факт, що при високих рівнях завантаження (кількість імпульсів за одиницю часу) декілька імпульсів можуть накладатися,

формуючи один з великою амплітудою, невирішеним питанням залишилася верифікація результатів розпізнавання кожним методом. Тобто, перевірка того, чи розпізнаний імпульс співпадає з тим, що був згенерований під час моделювання, що важливо для об'єктивного визначення точності розпізнавання. Окрім цього, представлені у цих роботах результати показують, що при високих рівнях завантаження ефективність існуючих методів аналізу знижується внаслідок суперпозиції імпульсів.

В [29] було запропоновано **алгоритм кластеризації** для розпізнавання параметрів оцифрованих сигналів з детектора для частинок випромінювання різного типу (нейтронів, гамма-квантів). Принцип його роботи загалом базується на визначенні шаблонних форм сигналів декількох типів імпульсів та використанні фільтра міри співпадіння в процесі аналізу. Разом з тим, ефективність даного підходу потребує подальшого вивчення, особливо при високій вірогідності накладання імпульсів, адже форма сигналу може бути суттєво змінена в цьому випадку і точність розпізнавання може бути низькою.

У роботі [30] було представлено **алгоритм послаблення впливу накладання імпульсів (pile-up ефекту)** на результуючий спектр. Даний алгоритм базується на розрідженій апроксимації сигналу для розділення накладених імпульсів та використанні методів регресійного аналізу Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) [31]. Представлений підхід дозволив зменшити вплив pile-up ефекту та покращити результуючий досліджений спектр у діапазоні енергій 0-1000 keV, проте подальшого аналізу потребують артефакти виявлені в діапазоні 1500 keV та вище. Оскільки перевірка роботи запропонованого алгоритму проводилася на реальних спектрах, аналіз результатів його роботи на змодельованих відомих вхідних даних з додаванням верифікації, можливо, дозволив би краще дослідити точність розпізнавання імпульсів даним методом.

У ряді досліджень для обробки цифрових даних або сигналів застосовуються алгоритми вейвлет-перетворень (Wavelet Transform) [32]. Дані алгоритми активно використовуються у різних галузях, зокрема для обробки або стиснення зображень

[33], аналізу медичних даних [34], обробки сигналів, тощо. У роботі [35] було представлено метод аналізу спектрів гамма-випромінювання на основі неперервних вейвлет-перетворень (Continuous Wavelet Transform), який дозволив покращити відображення спектру та інтенсивність піків. Проте в даному дослідженні алгоритми вейвлет-перетворень використовувалися для обробки вже готових спектрів, а не для розпізнавання та аналізу параметрів спектрометричних сигналів з метою побудови спектру.

Останнім часом активного розвитку набули технології штучного інтелекту з використанням штучних нейронних мереж (ШНМ). Дані технології успішно застосовуються для вирішення широкого класу задач, таких як розпізнавання або класифікація зображень [36, 37], аналіз мовлення [38], обробка або генерація відео [39] та багато інших. Також існують дослідження, в яких аналіз спектрометричних сигналів виконується за допомогою глибинного машинного навчання. В основному в таких роботах нейронні мережі використовувалися для вирішення задач класифікації та розрізнення за формою сигналу одних типів квантів випромінювання від інших (наприклад, нейтронів від гамма-квантів), а не для розпізнавання окремих імпульсів та вимірювання їх параметрів. Так у працях [40, 41] були представлені підходи до класифікації квантів випромінювання за допомогою згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Networks) [42], а у статті [43] – за допомогою нейронних мереж Трансформерів (Transformers) [44]. Розрізнення типів імпульсів за формою сигналу (Pulse Shape Discrimination - PSD) є також важливою задачею [45-47], що являє собою окремий напрямок для дослідження.

Разом з тим з'являються праці [48, 49], в яких автори досліджують можливість використання глибинного машинного навчання саме для розпізнавання та визначення параметрів імпульсних спектрометричних сигналів. У роботі [48] було запропоновано новий **метод для визначення часової інформації про параметри імпульсів з обмеженого набору вибірок діджітайзера, що базується на глибинному навчанні.** Спочатку було здійснено

кількісний аналіз традиційного методу підбору\апроксимації кривої (аналог методу Підбору) щодо трьох видів варіацій: довгострокового дрейфу, короткострокових змін та випадкового шуму. Далі була представлена архітектура нейронної мережі та проведено дослідження у порівнянні з методом підбору кривої, щоб продемонструвати потенціал глибокого навчання в цій проблемі. Запропонована нейронна мережа складалася з двох частин: шумоподавляючого автоенкодера та регресійної мережі. Автоенкодер використовувався з метою відновлення оригінального чистого сигналу з його версії з електричним шумом. Регресійна мережа, що розміщувалася після автоенкодера, слугувала для безпосереднього виведення параметрів, що становили інтерес. В цілому метод з використанням нейронних мереж зміг продемонструвати переваги у порівнянні з класичним методом підбору кривої, але саме у визначених для дослідження аспектах на змодельованих вибірках даних, які були попередньо оброблені та приведені до потрібного формату. Тим не менш, автори відмічають, що нейронні мережі мають свої особливі вимоги, які ставлять нові виклики для проектування детекторних систем.

1.1.4. Обчислення енергій зареєстрованих квантів випромінювання за формою оцифрованого сигналу

Також одним з ключових параметрів, які досліджуються за допомогою комп'ютерного аналізу після етапу розпізнавання окремих імпульсів, які відповідають зареєстрованим в детекторі квантам випромінювання, є визначення їх енергій. Для обчислення відповідних енергій на основі форми імпульсного сигналу потрібно розрахувати інтеграл (площу під лініями імпульсів), як показано на рисунку 1.7. В даному випадку, підінтегральна функція задана набором числових даних отриманих з експерименту, тому замість аналітичних підходів (формули Ньютона-Лейбніца) обчислення інтегралів може бути здійснене за допомогою методів чисельного інтегрування.

Найбільш відомими чисельними методами знаходження інтегралів є [50, 51]:

- формули прямокутників;

- методи Ньютона–Котеса, Гауса, Чебишева, які основані на використанні так званих квадратурних формул, отриманих заміною підінтегральної функції інтерполяційними багаточленами;
- методи Монте–Карло, основані на використанні статистичних моделей.

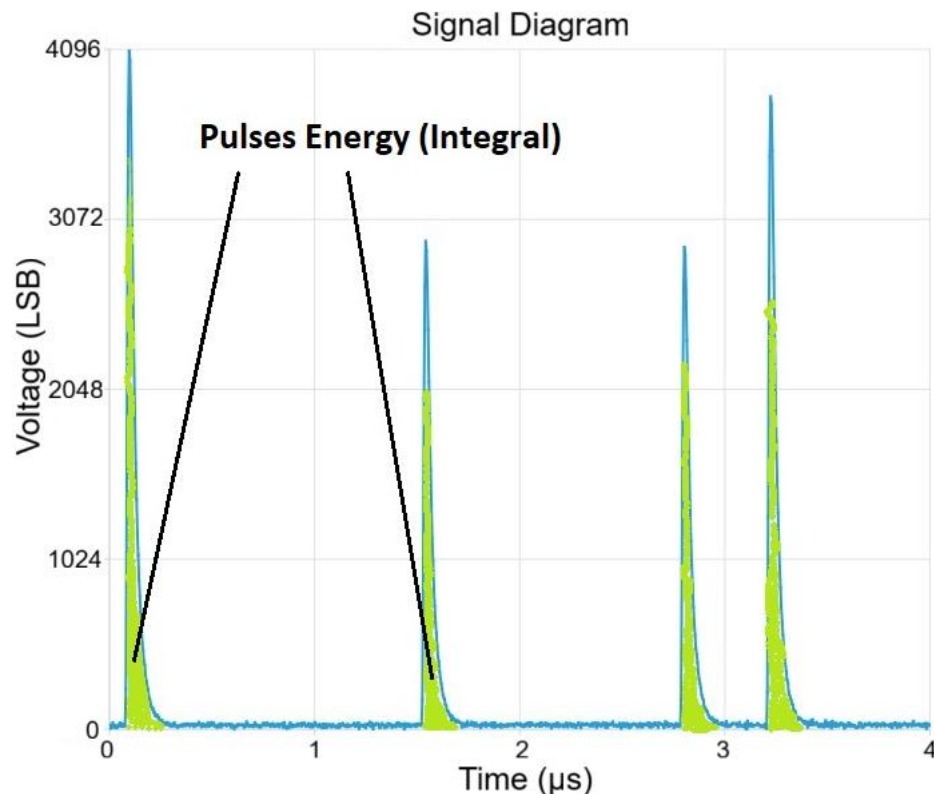


Рис. 1.7. Обчислення енергій квантів випромінювання, які є пропорційними площі під лініями імпульсів оцифрованого сигналу.

Підсумовуючи розглянуті методи розпізнавання та визначення параметрів спектрометричних сигналів, варто відмітити, що існуючі підходи та методи дозволяють розпізнавати та вимірювати параметри імпульсних сигналів, навіть при частій суперпозиції імпульсів. Проте, представлені в розглянутих роботах результати показують, що при використанні фільтрів сигналу залишається невирішеним питання можливості реалізації методу комп'ютерної обробки, який би виконував фільтрацію електричного шуму з мінімальними змінами самого

цифрового сигналу. Також при високих рівнях завантаження ефективність методів аналізу знижується внаслідок суперпозиції імпульсів, тому питання підвищення точності розпізнавання залишається актуальним. Окрім цього, в розглянутих статтях не наведено чітких критеріїв оцінювання достовірності розпізнаних імпульсів, які дозволили б об'єктивно оцінити точність їх розпізнавання при використанні різних методів цифрової обробки сигналу.

1.2. Обґрунтування необхідності розробки моделей та методів комп'ютерного моделювання сигналів і механізмів верифікації результатів аналізу

Оцінкою ефективності застосування тих чи інших методів цифрової обробки спектрометричних сигналів має бути ступінь достовірності отриманих результатів та їх відповідність реальним сигналам, які були зареєстровані детектором під час експерименту. Однак проблема полягає у тому, що не відомо, які саме спектральні складові випромінювання призвели до генерації сигналу саме такої форми, і чи є окремий імпульс результатом реєстрації одного гамма-кванту, чи він утворився в результаті суперпозиції кількох відгуків детектора на гамма-кванти з іншими енергіями. Крім того, наявність шуму у каналі вимірювання може спотворювати амплітуду та час виникнення імпульсів у вихідному сигналі детектора. Визначити вплив цих факторів на формування спектру та його достовірність, а також ефективність цифрових методів відновлення інформації не дозволяє відсутність гарантовано визначених вхідних даних експерименту. Саме тому важливо дослідити різні методи цифрової обробки спектрометричних даних на основі штучно згенерованого зразкового сигналу з повністю відомими параметрами кожного з імпульсів, які входять до його складу. Для цього в рамках дослідження необхідно вдосконалити або розробити нові підходи до комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів, які б дозволили б отримати цифровий образ сигналу максимально наближений до реального, проте усі складові якого є абсолютно відомими (кількість імпульсів, їх амплітуди і час появи, тощо).

Окрім цього потрібно розробити чіткі механізми верифікації ефективності роботи комп'ютерних методів аналізу, таких як точність розпізнавання параметрів імпульсів та швидкість обробки даних. Це дасть можливість на симульованих даних порівняти змодельовані та програмно розпізнані імпульси, щоб отримати обґрунтовані метрики ефективності того чи іншого методу комп'ютерної обробки для різних умов.

1.3. Постановка задачі дослідження

Беручи до уваги вищезазначені фактори, визначені проблеми, притаманні комп'ютерним методам спектрального аналізу, й огляд існуючих підходів до їх вирішення стає можливим визначити мету дослідження. Таким чином, **мета дослідження** полягає в підвищенні точності розпізнавання параметрів спектрометричних сигналів в комп'ютерних системах спектрального аналізу. Досягнення мети можливе завдяки вирішенню **задачі дослідження**, а саме розробці нових методів комп'ютерної обробки даних з покращеним фільтруванням імпульсного сигналу від електричного шуму та обробкою суперпозиції імпульсів. Разом з цим, важливо вдосконалити моделі та методи комп'ютерного моделювання цифрових образів сигналів та розробити алгоритм програмної верифікації результатів роботи методів комп'ютерного аналізу.

Для досягнення даної мети як рішення поставленої наукової задачі в цілому, були сформульовані ряд **завдань**. До їхнього числа належать.

1. Теоретичний аналіз існуючих математичних моделей, обчислювальних методів та підходів, що використовуються для визначення параметрів оцифрованих спектрометричних сигналів в комп'ютерних системах спектрального аналізу.

2. Розробка нових методів комп'ютерної обробки спектрометричних даних:

2.1. Методу комп'ютерного аналізу на основі дискретних перетворень Фур'є та обробкою суперпозиції імпульсів.

2.2. Методу комп'ютерного аналізу з використанням дискретних вейвлет-перетворень.

3. Удосконалення математичних моделей і методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів.

4. Розробка алгоритму верифікації результатів роботи різних методів комп'ютерної обробки даних.

5. Програмна реалізація розроблених методів аналізу, комп'ютерного моделювання та верифікації спектрометричних сигналів.

6. Розробка моделі розподіленої комп'ютерної системи для отримання, передачі та комп'ютерної обробки спектрометричних даних.

7. Проведення експериментів на змодельованих даних з метою оцінки ефективності розроблених методів комп'ютерного аналізу та порівняння з існуючими підходами.

8. Застосування розроблених методів для комп'ютерного аналізу спектрометричних даних, отриманих під час реальних експериментів.

9. Розробка науково-практичних рекомендацій по використанню розроблених моделей та методів в комп'ютерних системах спектрального аналізу.

Висновок до розділу 1

В розділі 1 було здійснено огляд існуючих робіт та досліджень, присвячених методам комп'ютерного аналізу параметрів спектрометричних даних. Детально описано ключові етапи комп'ютерної обробки таких даних, що включають в себе визначення базової лінії оцифрованого сигналу, розпізнавання окремих імпульсів, обчислення їх основних характеристик (амплітуди, часу появи), побудову спектру. Важливими факторами, які можуть видозмінювати форму сигналу та впливати на ефективність аналізу, є наявність електричного шуму і суперпозиція імпульсів.

Було розглянуто базові методи аналізу, а також більш складні підходи з додатковою обробкою оцифрованого сигналу, детально описано їх переваги та недоліки. Показано, що точність визначення параметрів імпульсів існуючими методами може знижуватися, особливо при високій інтенсивності генерації імпульсів та їх частій суперпозиції. Тому перспективною є розробка нових алгоритмічних підходів з покращеною фільтрацією сигналу від електричного шуму та додатковою обробкою суперпозиції імпульсів.

Також було аргументовано необхідність застосування та вдосконалення методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів. Через те, що точний склад спектрометричних даних, отриманих під час реальних експериментів, є відомим не повністю через випадковість процесів на вході детектора. Відмічено, що моделювання цифрових образів сигналів із заздалегідь відомими, регульованими параметрами в якості вхідних даних для комп'ютерного аналізу в сукупності з програмною верифікацією результатів, дасть можливість більш об'єктивно оцінити точність розпізнавання спектрометричних даних різними методами комп'ютерної обробки.

За результатами проведеного огляду була поставлена мета та задача дослідження. Для досягнення мети були сформульовані детальні завдання дослідження, які будуть вирішуватися в наступних розділах.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [1, 2, 6-7].

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО АНАЛІЗУ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЇ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

2.1. Метод аналізу спектрометричних сигналів з механізмом фільтрації на основі перетворень Фур'є та обробкою суперпозиції імпульсів

2.1.1. Опис методу

Як було зазначено в попередньому розділі, оцифровані спектрометричні сигнали містять компоненту електричного шуму, яка впливає на точність визначення часу появи та амплітуд імпульсів. Для вирішення завдання фільтрації цифрового сигналу від електричного шуму з мінімальними змінами корисної складової та додатковою корекцією амплітуд імпульсів при їх суперпозиції в рамках дослідження був розроблений новий метод аналізу **під назвою Відстеження** [14]. Загалом принцип роботи запропонованого методу складається з наступних кроків:

1. Визначення базової лінії сигналу.
2. Фільтрація сигналу від електричного шуму.
3. Аналіз рівня сигналу для розпізнавання окремих імпульсів та визначення їх параметрів (час появи, амплітуди).
4. Додаткова обробка (корекція амплітуд) імпульсів при їх суперпозиції.

Визначення базової лінії сигналу виконується за допомогою методу усереднення за вибраним набором плоских відрізків, що був описаний у розділі 1.1.1.

Основний підхід до фільтрації сигналу від шуму в розробленому методі базується на використанні дискретного перетворення Фур'є (Discrete Fourier Transform - DFT) [52], яке часто застосовується для обробки цифрових сигналів та зображень [53, 54]. Дискретне перетворення Фур'є дозволяє розкрити частотний склад сигналу та представити сигнал у вигляді частотних складових. Застосування прямого DFT перетворює дискретний сигнал на елементарні гармонічні складові з різними частотами та обчислюється за наступною формулою [55]:

$$S[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \exp\left(-\frac{2\pi i k n}{N}\right), \quad (2.1)$$

для $n=0, 1, \dots, N-1, k = 0, 1, \dots, N-1$, де N – розмір масиву оцифрованих значень сигналу $s[n]$. Результат прямого дискретного перетворення Фур'є, масив $S[k]$, є послідовністю комплексних чисел (виду $a+ib$), яка є функцією від дискретних частотних компонентів k , а не від часу.

Фільтрація сигналу від шуму виконується шляхом обробки масиву $S[k]$ і відсікання високочастотної складової, яка в даному випадку є електричним шумом. Для цього потрібно встановити в нуль елементи масиву $S[k]$, які мають значення магнітуди ($\sqrt{a^2 + b^2}$) нижче певного порогу M_{tr} , який є регульованим параметром алгоритму. На рисунку 2.1 наводиться вигляд діаграми значень магнітуди цифрового імпульсного сигналу в частотному домені після застосування прямого перетворення Фур'є, а також візуалізовано підхід з подавленням високочастотної компоненти для фільтрації сигналу від шуму. Вісь X містить значення дискретних частотних компонентів k , а вісь Y значення магнітуди перетвореного сигналу.

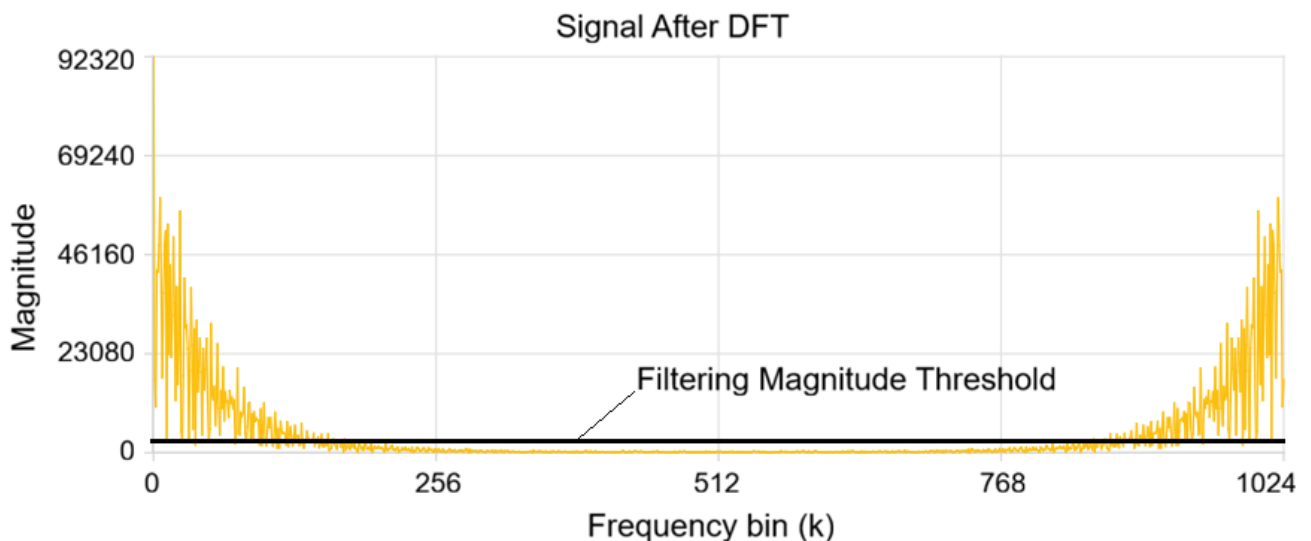


Рис. 2.1. Механізм фільтрації високочастотної компоненти сигналу, представленого у частотному домені після застосування прямого дискретного перетворення Фур'є.

Якщо після цього до обробленого масиву $S[k]$ застосувати зворотне дискретне перетворення Фур'є (Inverse Discrete Fourier Transform), то можна отримати значення відфільтрованого сигналу $sf[n]$ згідно формули:

$$sf[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S[k] \exp\left(\frac{2\pi i k n}{N}\right). \quad (2.2)$$

Варто зазначити, що пряме та зворотне перетворення Фур'є за формулами (2.1) та (2.2) є дуже затратними в плані обчислень через те, що мають обчислювальну складність $O(N^2)$. Тому на практиці в чистому вигляді алгоритми DFT застосовується не так часто, адже існує алгоритм швидкого дискретного перетворення Фур'є (Fast Discrete Fourier Transform - FDFT) [56, 57]. Даний алгоритм має обчислювальну складність $O(N \log N)$ і працює набагато швидше, особливо на великих масивах даних. Один з можливих варіантів реалізації алгоритму швидкого дискретного перетворення Фур'є на мові програмування C++ можна знайти у книзі [58]. Основною умовою його використання є те, що розмір масиву, який піддається перетворенням, має бути кратний 2 або повинен бути доповнений нулями в кінці для досягнення розміру такої кратності. На рис. 2.2 можна побачити результат застосування фільтру з використанням вищеописаного способу і візуалізацію форми оригінального та відфільтрованого сигналу. Даний рисунок ілюструє, що після застосування механізму фільтрації з використанням прямого та зворотного дискретного перетворення Фур'є форма сигналу є згладженою, не містить різких перепадів, зумовлених високочастотним електричним шумом. Також важливо відмітити, що фільтрація даним способом не змінила суттєво форму імпульсу або його амплітуду.

Після застосування фільтрації, розпізнавання окремих імпульсів виконується шляхом послідовного аналізу рівня обробленого сигналу на предмет зростання або спадання, визначаючи початок і кінець кожного імпульсу та корегуючи їх амплітуди при суперпозиції.

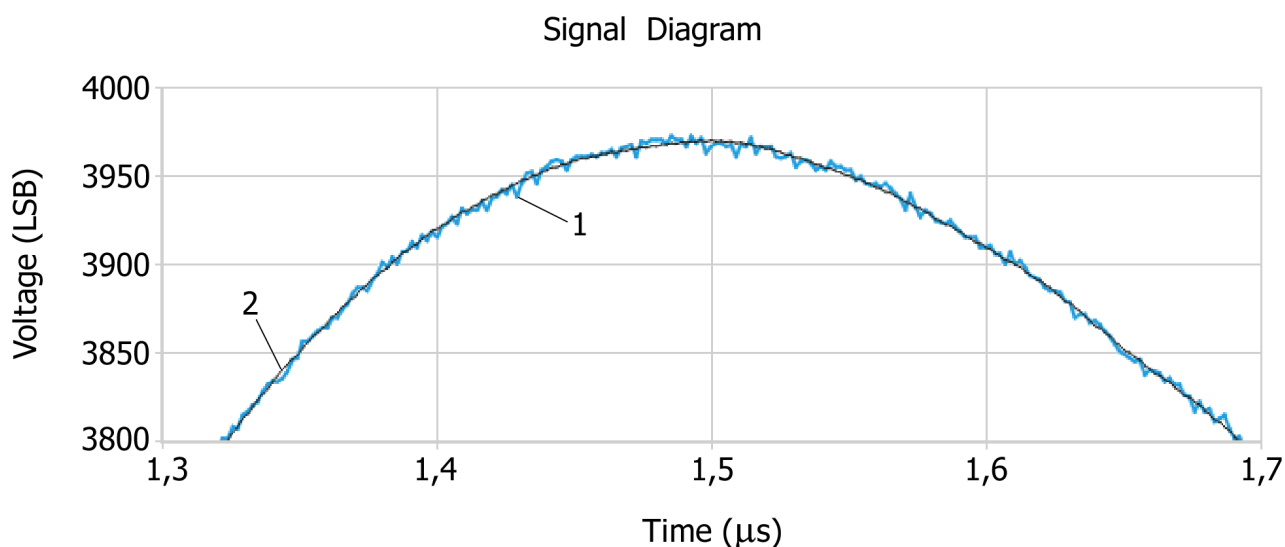


Рис. 2.2. Вигляд відфільтрованого сигналу за допомогою алгоритмів FDFT: 1 – оригінальний сигнал; 2 – відфільтрований сигнал.

Деталізований принцип роботи розробленого методу, що включає як етап фільтрації сигналу, так і розпізнавання імпульсів, складається з наступних кроків:

1. Розбиття всього масиву значень сигналу на окремі послідовні рівномірні відрізки, які мають розмір кратний 2, з метою оптимізації обчислень. Останній відрізок доповнюється нульовими значеннями до потрібного розміру за необхідності. Наступні кроки послідовно виконуються для кожного відрізка.

2. Фільтрація масиву цифрових значень сигналу $s[i]$ описаним вище алгоритмом на базі швидкого дискретного перетворення Фур'є та отримання масиву значень відфільтрованого сигналу $sf[i]$.

3. Прохід по масиву $sf[i]$ та аналіз попереднього та поточного значення рівня сигналу, відслідковуючи параметр стану сигналу (SignalState), який може мати наступні значення: Baseline (сигнал не перевищує значення базової лінії на максимальне значення електричного шуму), SignalGrowth (зростання сигналу), SignalEquality (рівність сигналу), SignalDescend (спадання сигналу). Можливі переходи станів, умови переходів та пов'язані з ними операції по розпізнаванню імпульсів та вимірюванню їх параметрів зображені на UML [59] діаграмі станів [60] на рис. 2.3. Окремо варто зазначити, що виявлений імпульс додається до масиву нових розпізнаних імпульсів, тільки якщо його амплітуда перевищує

мінімальний поріг A_{min} , який є параметром алгоритму. В іншому випадку знайдений імпульс вважається продовженням поточного імпульсу. Це робиться з метою відкидання хибних виявлень, які можуть бути спричинені випадковими відхиленнями спадаючої компоненти імпульсного сигналу.

Signal Analysis State Diagram

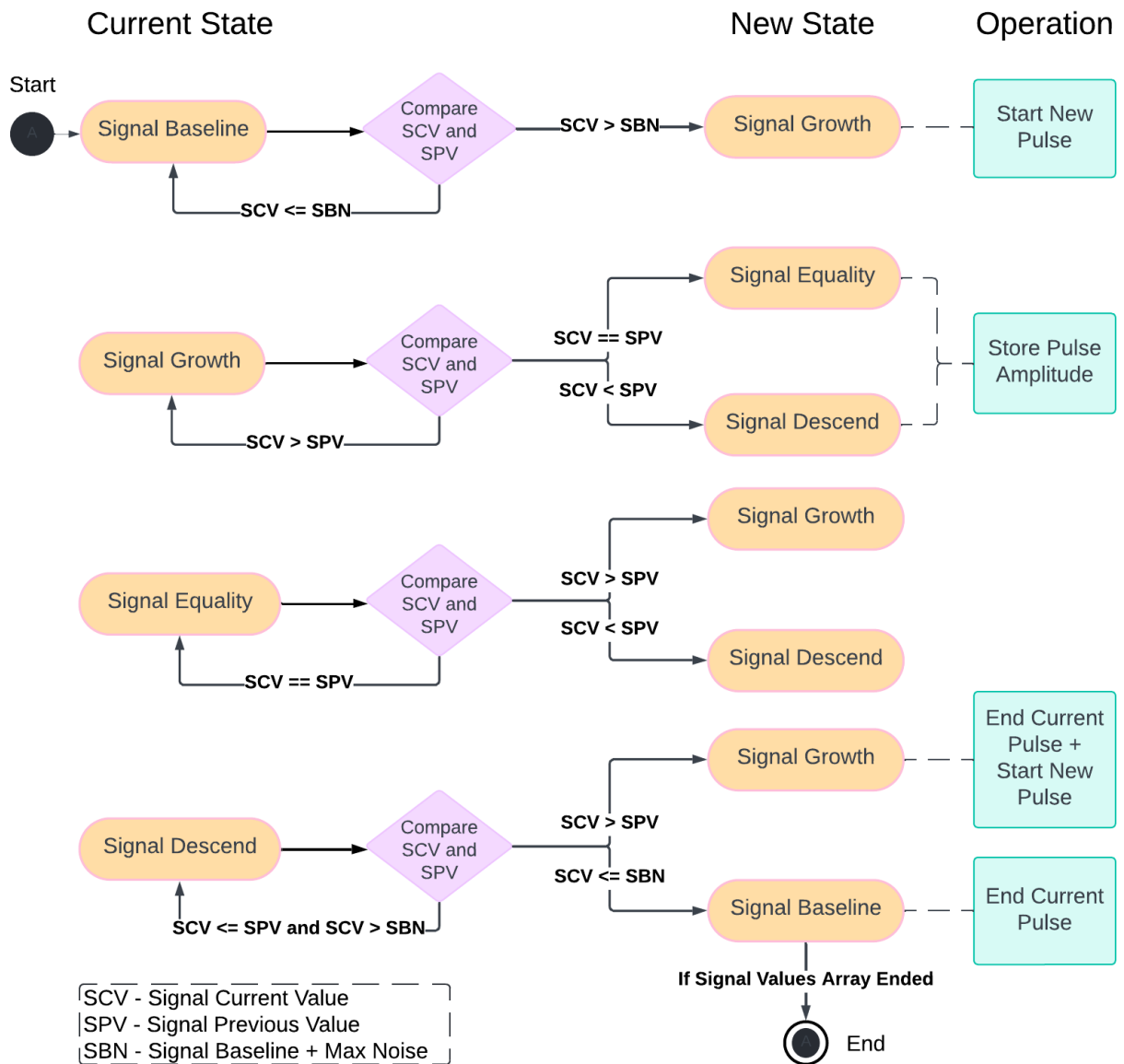


Рис. 2.3. UML діаграма станів та операцій в процесі аналізу розробленим методом Відстеження.

4. Для більш правильної обробки випадків накладання імпульсів, при обчисленні фінального значення амплітуди розпізнаного імпульсу виконується

додаткова корекція. Це робиться шляхом реконструкції форми імпульсу, а саме відніманням значення змодельованої спадаючої компоненти сигналу попередніх імпульсів, обчисленого за наступною формулою [22]:

$$s'_i = s_i - \sum_{k=0}^{j-1} A_k p(i - t_k), \quad (2.3)$$

де s'_i – скориговане значення сигналу, s_i – оригінальне значення сигналу, A_k та t_k – амплітуда та час появи k -го попереднього імпульсу відповідно, $p(t)$ – змодельована нормалізована форма імпульсу, що відповідає одному кванту зареєстрованому в детекторі (залежить від характеристик детектора та спектрометричного обладнання для запису даних, можливий приклад міститься в статті [24]).

2.1.2. Алгоритм оптимізації швидкості роботи методу для низьких рівнів завантаження

У випадку низьких рівнів завантаження, зареєстровані імпульси з'являються відносно рідко і оцифрований сигнал може містити великі проміжки, де рівень сигналу знаходиться близько базової лінії та присутній лише електричний шум, як показано на рисунку 2.4.

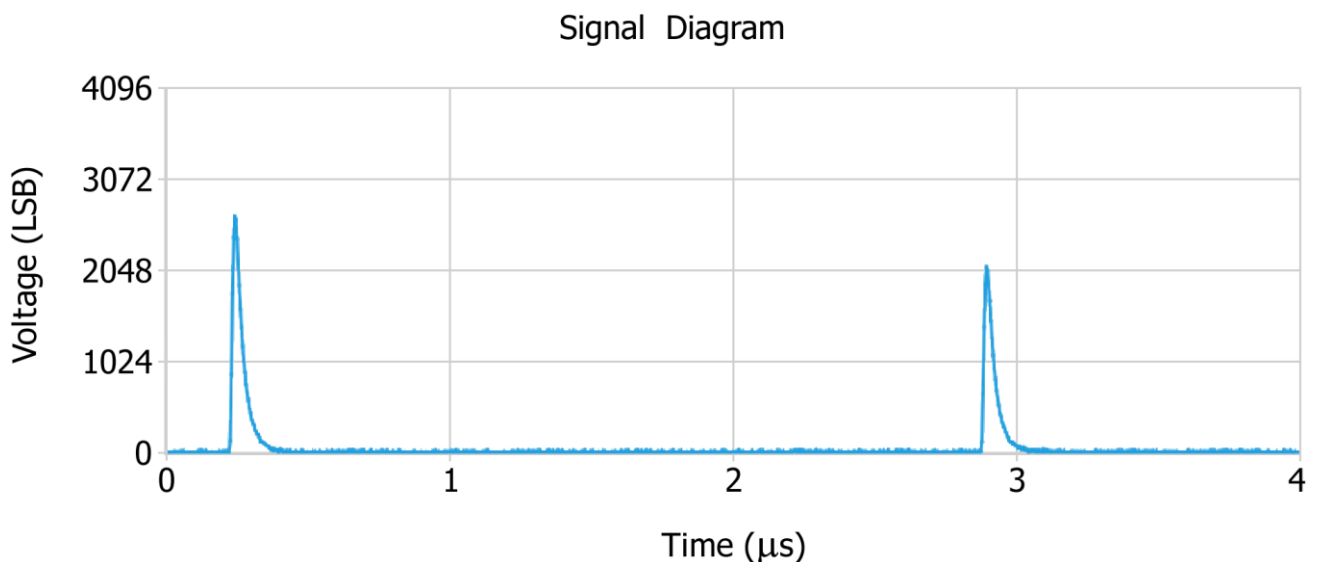


Рис. 2.4. Вигляд оцифрованого сигналу для низького рівня завантаження.

Варто відмітити, що при записі даних під час реальних експериментів діджитайзер може бути налаштований таким чином, щоб запис даних спрацьовував тільки після перевищення сигналу певного підібраного порогу, і тоді можна уникнути запису великих проміжків, де відсутні корисні імпульси. Проте в разі отримання усіх даних з детектора або в разі моделювання повного образу цифрового сигналу для низьких рівнів завантаження, імпульси можуть з'являтися відносно рідко.

Для таких умов швидкість роботи методу може бути оптимізована. Адже для значних відрізків, де міститься тільки електричний шум, немає сенсу застосовувати пряме та зворотне швидке дискретне перетворення Фур'є і витрачати на це обчислювальні ресурси. Тому був розроблений спеціальний алгоритм оптимізації швидкодії методу для низьких рівнів завантаження, принцип роботи якого полягає в наступному:

1. Попередня обробка масивів даних, що містять значення оцифрованого сигналу $s[i]$, та визначення значних проміжків, де рівень сигналу не перевищує базову лінію на величину заданого порогу дискретизації. При цьому значення сигналу копіюються в новий масив $sm[i]$, окрім виявлених відрізків, де присутній лише електричний шум. Такі відрізки відкидаються не повністю, а потрібно залишити невелику частину сигналу (параметр алгоритму) з електричним шумом перед початком і після кінця кожного імпульсу для більш коректної роботи механізму фільтрації за допомогою перетворення FDFT. Таким чином, ми отримуємо модифікований масив $sm[i]$ меншого розміру, в якому імпульси розташовані більш компактно і відсутні значні проміжки з даними, які не несуть корисної інформації.
2. Збереження інформації про виявлені відрізки сигналу, де присутній лише електричний шум в окремій структурі в пам'яті – $sig_map[key, value]$. Дана структура має являти собою асоціативний контейнер, який зберігає дані у форматі ключ-значення і дозволяє швидко шукати по ключу. Наприклад, для мови програмування C++ це може бути контейнер `std::unordered_map`

або `std::map` зі стандартної бібліотеки шаблонів STL. Структура *sig_map* зберігає в якості ключа індекс початку відрізка з шумом в оригінальному масиві $s[i]$ та в якості значення – кількість елементів цього масиву, які були відкинуті і не скопійовані в модифікований масив $sm[i]$. Це потрібно для того, щоб після застосування методу аналізу на модифікованому масиві мати можливість обчислити та отримати необхідні індекси в оригінальному масиві.

- Застосування описаних раніше у розділі 2.1.1 кроків методу аналізу до модифікованого масиву значень сигналу $sm[i]$ з метою визначення часу появи та амплітуд окремих імпульсів. При цьому індекс часу появи або пікового значення імпульсу ind_{sm} в масиві $sm[i]$ може бути конвертовано у відповідний індекс ind_s в оригінальному масиві значень сигналу $s[i]$ за наступною формулою:

$$ind_s = ind_{sm} + \sum_{k=0}^{ind_{sm}-1} sig_map[k], \quad (2.4)$$

де k – ключі в контейнері *sig_map*, які є меншими за ind_{sm} , $sig_map[k]$ – значення в цьому контейнері (кількість відкинутих елементів масиву з електричним шумом), що зберігається по ключу k .

На рисунку 2.5 наводиться ілюстрація вищезазначених структур даних та принципів роботи вищезазначеного алгоритму.

Після програмної реалізації, практичне застосування даного алгоритму оптимізації у сценаріях оцінки ефективності роботи розробленого методу аналізу, які наводяться далі у розділі 4.1, дозволило збільшити швидкість обробки даних методом Відстеження у 2-3 рази для низьких рівнів завантаження.

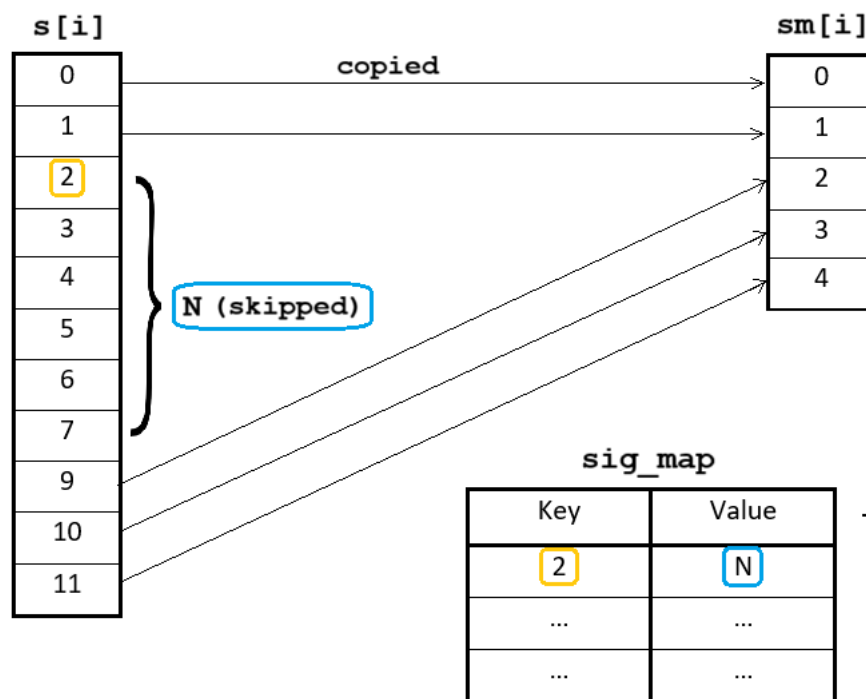


Рис. 2.5. Ілюстрація структур даних та принципів роботи алгоритму оптимізації швидкодії методу аналізу.

2.2. Метод аналізу спектрометричних даних з використанням дискретних вейвлет-перетворень та обробкою суперпозиції імпульсів

При використанні розробленого методу Відстеження, представленого в попередньому розділі, на різних наборах спектрометричних даних (в тому числі реальних експериментальних даних) з різними формами імпульсів, виникає необхідність ручного підбору та встановлення порогу фільтрації сигналу від шуму (M_{tr}), який є параметром даного методу. Для підвищення універсальності, тобто можливості ефективного застосування (при певних умовах) на спектрометричних даних з різними формами імпульсів та різним рівнем шумів, було розроблено метод аналізу з автоматичним визначенням шумового порогу [61].

Підхід до фільтрації спектрометричного сигналу від електричного шуму в запропонованому методі базується на використанні дискретних вейвлет-перетворень (Discrete Wavelet Transform - DWT). Дані перетворення є потужним інструментом обробки сигналів, який дозволяє аналізувати сигнал як у часовій, так

і в частотній області. Загалом дискретне вейвлет-перетворення для заданої функції $f(k)$ виражається наступною формулою [62]:

$$DWT(m, n) = a_0^{-\frac{m}{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) \psi^*(a_0^{-m}k - nb_0), \quad (2.5)$$

де $a_0 > 1$ – параметр масштабування (розширення); $b_0 > 0$ – параметр позиції; $m, n \in \mathbb{Z}$; $\psi^*(t)$ – є так званим «материнським вейвлетом».

Зазвичай значення a_0 приймається рівним 2, а значення b_0 рівним 1, при цьому таке перетворення називається діадним вейвлет-перетворенням, для якого розроблені швидкі алгоритми обчислень. Існує багато варіантів материнських вейвлетів, найбільш відомими з яких є вейвлети Хаара, Симлета, Добеши, Коїфлетса, Гауса, Морле, Шенона, Мейера, біортогональний та інші [63].

Ідея вейвлет-аналізу та фільтрації сигналу із застосуванням DWT полягає в розкладанні оцифрованого сигналу на множину частотних складових у різних масштабах за алгоритмом, запропонованим Маллатом [64]. Цей алгоритм складається з серії послідовних розкладів сигналу (довжиною 2^n) на дві компоненти: коефіцієнти деталізації D_j та коефіцієнти апроксимації A_j , обидві зі зменшеним розміром 2^{n-j} , де j — рівень розкладання. На кожному рівні вхідний сигнал розкладається за допомогою фільтра високих частот, який зберігає високочастотні компоненти, та фільтрів низьких частот для вилучення низькочастотних компонентів для наступного масштабу. Процедура повторюється з наборами фільтрів високих та низьких частот, доки не буде досягнуто заданого рівня j ($j \leq n$). Для фільтрації сигналу від шуму вейвлет-коефіцієнти, отримані шляхом розкладання, згодом піддаються процесу порогового регулювання (thresholding). Порогове регулювання передбачає або видалення, або зменшення коефіцієнтів, значення яких є нижчим ніж задане порогове значення, розглядаючи їх як шумові компоненти. Можуть бути використані різні методи порогового регулювання, включаючи жорстке порогове регулювання (встановлення коефіцієнтів нижче порогового значення рівними нулю) або м'яке порогове регулювання (зменшення коефіцієнтів до нуля шляхом стиснення). Після цього

змінені коефіцієнти вейвлету використовуються для реконструкції знешумленого сигналу шляхом застосування зворотного дискретного вейвлет-перетворення (Inverse Discrete Wavelet Transform). Крім того, у роботі [65] було представлено адаптивний алгоритм під назвою BayesShrink для фільтрації зображень від шумів за допомогою вейвлетів, який може визначати шумовий поріг на основі даних, що піддаються обробці. Даний алгоритм також може ефективно застосовуватися для обробки оцифрованих сигналів, представлених масивами миттєвих значень сигналу.

Враховуючи вищезазначене, механізм фільтрації в розробленому методі аналізу спектрометричних сигналів складається з наступних кроків:

1. Перетворення оцифрованого спектрометричного сигналу $s[i]$ на множини частотних складових у різних масштабах за допомогою застосування діадних дискретних вейвлет-перетворень згідно алгоритму Маллата з рівнем розкладання сигналу j , який є параметром методу. За замовчуванням рівень розкладання є рівним трьом.

2. Застосування адаптивного алгоритму BayesShrink для автоматичного визначення шумового порогу та відсікання компоненти шуму за допомогою м'якого порогового регулювання (soft thresholding).

3. Відновлення відфільтрованого сигналу $sf[i]$ за допомогою зворотного дискретного вейвлет-перетворення.

Додатково було проаналізовано використання різних материнських вейвлетів для фільтрації спектрометричних сигналів від шуму за допомогою даного підходу з метою вибору оптимального вейвлету. На рисунку 2.6 візуалізовано верхню частину одного імпульсу спектрометричного сигналу (записаного під час реальних експериментів) після фільтрації вищеописаним способом, використовуючи при цьому різні материнські вейвлет функції. Як можна побачити з рисунку 2.6, при використанні материнських вейвлетів Haar (рис. 2.6, а) та db1 (2.6, б) відфільтрована форма сигналу є дещо ступінчатою. Застосування вейвлетів Biort6.8 (рис. 2.6, в) та symlet4 (рис. 2.6, д) дозволяє

отримати вже більш згладжену форму сигналу після фільтрації. В свою чергу використання db10 (рис. 2.6, г) або symlet8 (рис. 2.6, е) дає в результаті найбільш плавну форму відфільтрованого сигналу, адже дані вейвлети мають більшу довжину внутрішніх фільтрів і більшу плавність у порівнянні зі своїми простішими аналогами (db1 та symlet4 відповідно).

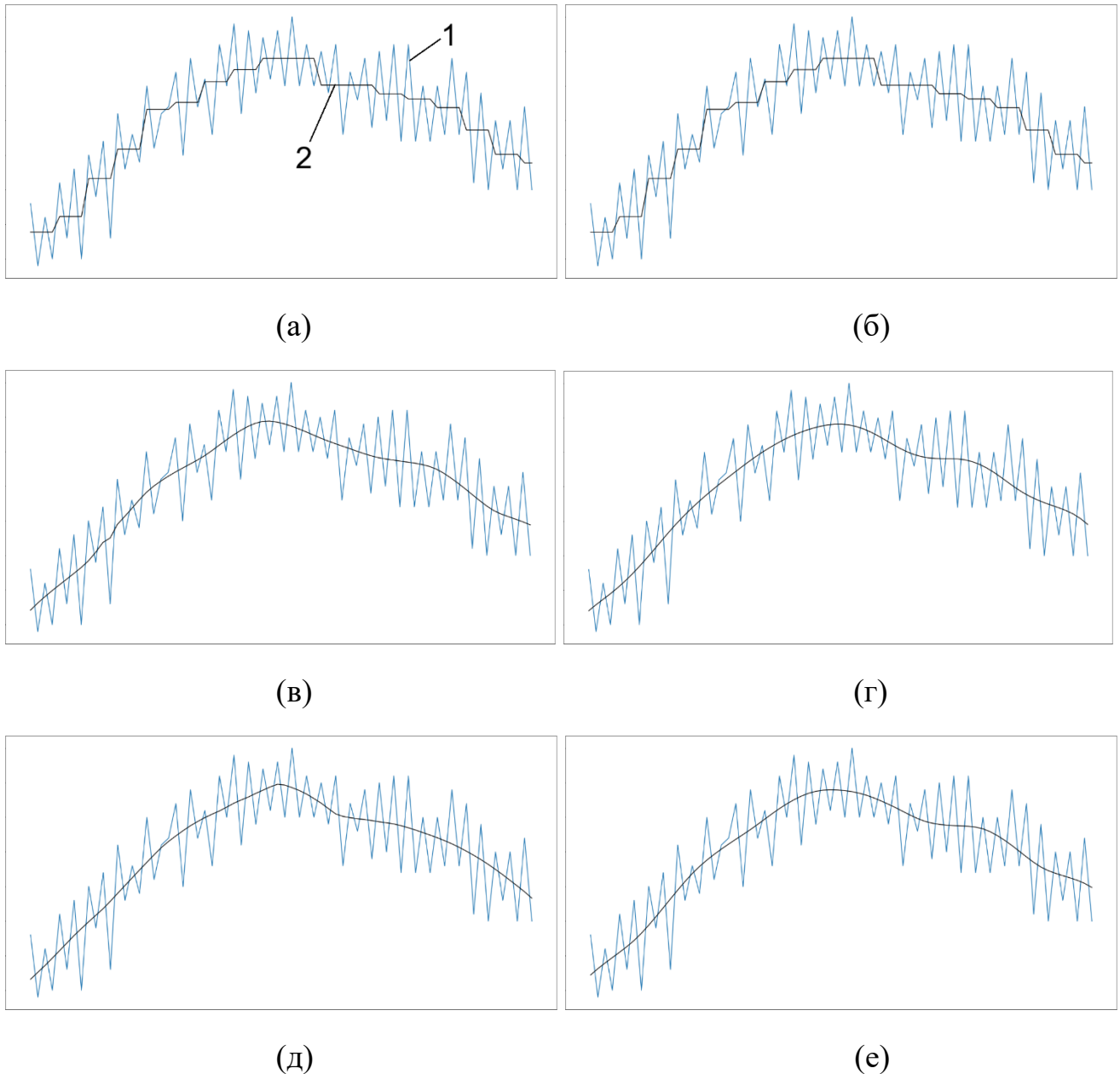


Рис. 2.6. Вигляд відфільтрованого сигналу (1 – оригінальний сигнал; 2 – відфільтрований сигнал) за допомогою дискретних вейвлет-перетворень при використанні різних материнських вейвлетів: а – Haar, б – db1, в – Bior6.8, г – db10, д – symlet4, е – symlet8.

Однак варто зауважити, що застосування вейвлетів `db10`, `symlet8` може в певній мірі видозмінювати корисну складову сигналів з короткими імпульсами, що мають гострі вершини. Тому для таких сигналів використання простіших вейвлетів `symlet4` або `Bior6.8` може бути більш оптимальним. Для універсальності в розробленому методі аналізу спектрометричних сигналів по замовчуванню використовується материнський вейвлет `symlet4`. Але в програмній реалізації даного методу закладена можливість вибору іншого вейвлету за необхідності.

Після фільтрації спектрометричного сигналу, розпізнавання окремих імпульсів може бути здійснене шляхом послідовного аналізу рівня обробленого сигналу на предмет зростання або спадання з метою визначення початку і кінця кожного імпульсу. Також необхідно корегувати амплітуди розпізнаних імпульсів, при накладанні один на одного (суперпозиції). Деталізований принцип роботи запропонованого методу аналізу, який включає в себе усі етапи обробки даних, наведено нижче:

1. Розбиття всього масиву значень сигналу $s[i]$ на окремі послідовні рівномірні відрізки, які мають розмір кратний 2, з метою оптимізації обчислень. В програмній реалізації методу розмір таких відрізків складав 32768. Наступні кроки послідовно виконуються для кожного відрізка.

2. Застосування описаного вище механізму фільтрації на основі вейвлет-перетворень до масиву цифрових значень сигналу $s[i]$. В результаті ми отримуємо масив значень відфільтрованого від шуму сигналу $sf[i]$.

3. Прохід по масиву $sf[i]$ та аналіз попереднього та поточного значення рівня сигналу, відслідковуючи параметр стану сигналу (`SignalState`), який може мати наступні значення: `Baseline` (сигнал не перевищує значення базової лінії на заданий поріг дискретизації), `SignalGrowth` (зростання сигналу), `SignalDescend` (спадання сигналу). Можливі переходи станів, умови переходів та пов'язані з ними операції по розпізнаванню імпульсів та визначення їх параметрів зображені на UML діаграмі станів на рисунку 2.7. Важливо відмітити, що перехід стану сигналу зі зростання до спадання і навпаки відбувається з урахуванням певного порогу

(THR), який в програмній реалізації становив близько 5-20 LSB. Це необхідно для того, щоб мінімальні коливання рівня сигналу (1-3 LSB) одного імпульсу при зростанні чи спаданні не трактувалися як суперпозиція імпульсів, що буде некоректним. Адже такі коливання можуть бути присутніми на реальних експериментальних даних, навіть після фільтрації сигналу.

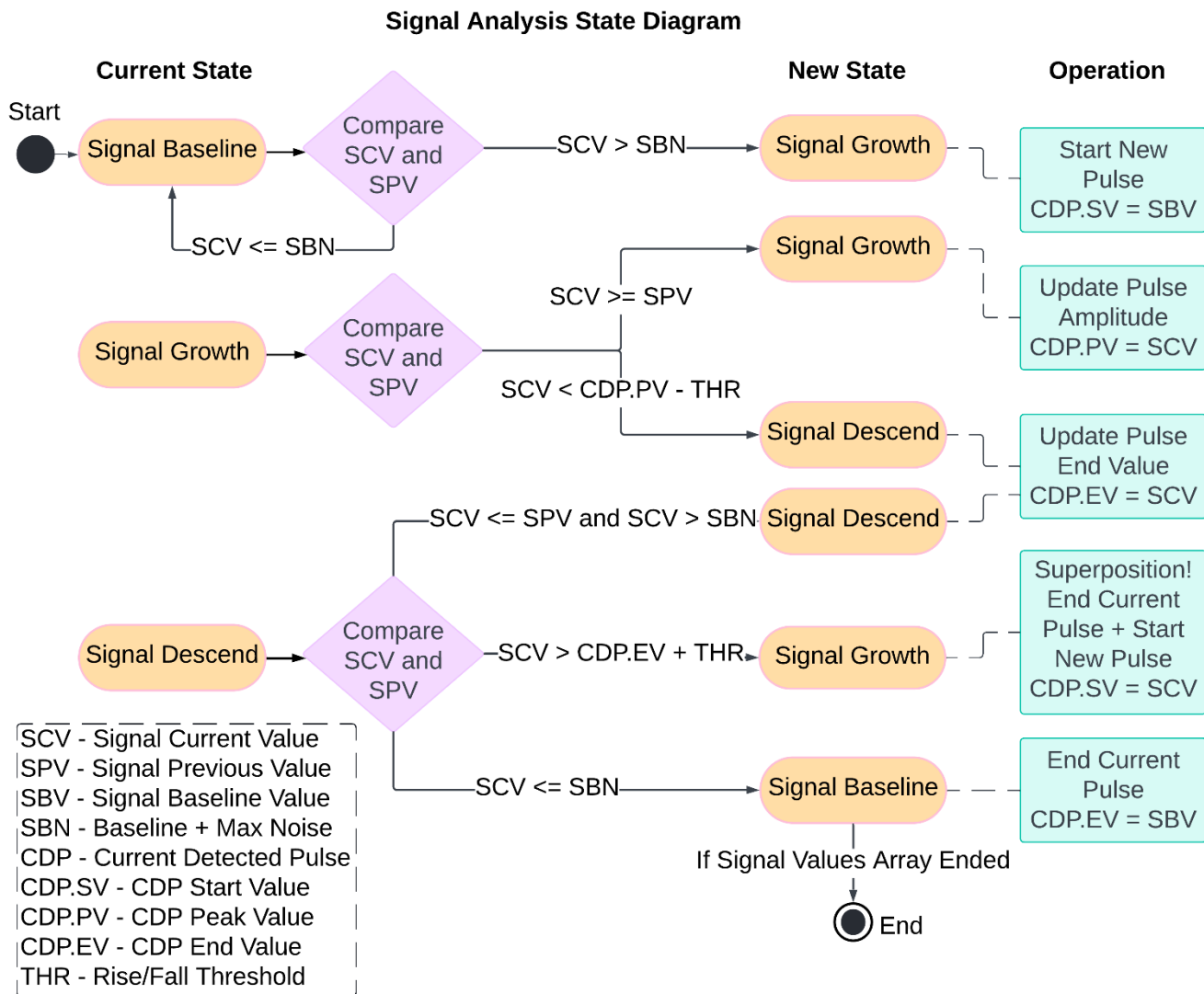


Рис. 2.7. UML діаграма станів, переходів між ними та пов'язаних з цим операцій в процесі аналізу відфільтрованого сигналу розробленим методом на основі дискретних вейвлет-перетворень.

4. Як і у випадку методу Відстеження, при суперпозиції імпульсів потрібно виконати додаткову корекцію значення амплітуди розпізнаного імпульсу. Це робиться шляхом реконструкції форми імпульсу, тобто відніманням значення

змодельованої спадаючої компоненти сигналу попередніх імпульсів, обчисленого за формулою (2.3).

5. Виявлений імпульс додається до масиву нових розпізнаних імпульсів, тільки якщо його амплітуда перевищує мінімальний поріг A_{min} , який є параметром алгоритму. В іншому випадку знайдений імпульс вважається продовженням поточного імпульсу. Це робиться з метою відкидання хибних виявлень, які можуть бути спричинені випадковими відхиленнями спадаючої компоненти імпульсного сигналу при наближенні до базової лінії.

По аналогії з методом Відстеження, швидкість обробки даних запропонованим методом може бути підвищено для низьких рівнів завантаження шляхом застосування алгоритму оптимізації, що був описаний у розділі 2.1.2.

2.3. Вдосконалення моделей і методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів

При дослідженні комп'ютерних методів спектрального аналізу існує проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого методу обробки, оскільки немає можливості отримання повністю достовірних вхідних даних. Ця проблема може бути вирішена за рахунок комп'ютерного моделювання спектрометричного сигналу із повністю відомими параметрами.

2.3.1. Можливий існуючий підхід до комп'ютерного моделювання сигналу

Для моделювання цифрового образу сигналу повинні бути задані наступні параметри чисельного експерименту (які можуть задаватися в інтерфейсі комп'ютерної програми, що виконує симуляцію):

- інтенсивність генерації імпульсів — середня кількість імпульсів за секунду (рівень завантаження детектора);
- тривалість експерименту, що моделюється (в секундах);
- рівень базової лінії сигналу;

- частота дискретизації сигналу;
- рівень електричного шуму, що накладається на сигнал.

Загальна кількість імпульсів L , які мають бути змодельовані, обчислюється за наступною формулою:

$$L = P_{avg} \times T, \quad (2.6)$$

де P_{avg} – середня кількість імпульсів за секунду, T – тривалість експерименту в секундах.

У випадку симуляції образу сигналу, що відповідає реєстрації гамма-квантів в детекторі випромінювання, повністю змодельована форма сигналу у дискретному вигляді може бути представлена наступною формулою [22]:

$$s_i = z_i + n_i + \sum_{j=0}^L A_j p(i - t_j), \quad (2.7)$$

де i – порядковий номер дискретного кадру з діджитайзера, s_i – значення сигналу, z – константа або дуже повільні зміни в часі порівняно до компоненти ширини імпульсу сигналу (базова лінія сигналу); n – компонента шуму, що накладається на сигнал, L – число зареєстрованих імпульсів, A_j та t_j є амплітудою та часом реєстрації імпульсу j , $p(t)$ – форма імпульсу, що згенерований одним зареєстрованим квантом.

Форма імпульсу $p(t)$ одного гамма-кванту залежить від характеристик детектора, але для сцинтиляційного детектора форма сигналу одного кванту наближено може бути представлена у вигляді аналітичної формули [24, 66]:

$$p(t) = \begin{cases} t > 0 & P_n(1 - e^{-\frac{t}{t_1}})^k(e^{-\frac{t}{t_2}} + B e^{-\frac{t}{t_3}}), \\ t \leq 0 & 0 \end{cases}, \quad (2.8)$$

де P_n – фактор нормалізації, t_1 , t_2 , t_3 , B та k є числовими параметрами імпульсу, що залежать від характеристик кристалів та світлових характеристик детектора. Для симуляції в ході роботи були використані значення цих параметрів, що приведені в таблиці 2.1 [22]. В рамках дослідження було вдосконалено існуючі підходи до комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів та

розроблено математичні моделі та методи моделювання, які представлені у наступних розділах.

Таблиця 2.1.

Параметри моделювання форми імпульсу, що відповідає реєстрації гамма-кванту в сцинтиляційному детекторі.

Параметр	Значення
К	4
t1	2.64893
t2	2.90428
t3	7.79602
B	0.323497

2.3.2. Математичні моделі та методи комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону

Окрім моделювання імпульсного сигналу з випадковим розподілом амплітуд імпульсів, актуальною є задача моделювання випадкової за часом послідовності сигналів згідно із наперед визначеним законом розподілу амплітуд, що є характерним для певного реального джерела випромінювання. Така модель буде краще відповідати цифровим даним, які отримуються на реальних експериментальних установках. Окрім того, це дасть можливість проведення чисельних експериментів з деякими ідеалізованими функціями розподілу амплітуд для більш детального та глибинного дослідження методів комп'ютерної обробки даних. Тому в рамках дослідження було вдосконалено математичні моделі і алгоритми моделювання [67] та реалізовано можливість генерації цифрового образу сигналу згідно файлів-шаблонів, записаних раніше за допомогою спектрометричної апаратури, або штучно створених. Такі файли являють собою табличні функції розподілу енергій (амплітуд імпульсів) і є чисельним представленням тих чи інших енергетичних спектрів. За необхідності можна також застосовувати і спеціально створені (ідеалізовані) функції розподілу. В ході дослідження в якості шаблонів використовувалися файли спектрів, отримані за допомогою 12-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що входить

до складу гамма-спектрометра з аналоговим каналом обробки спектрометричного сигналу.

Для того, щоб змоделювати імпульсні сигнали згідно з потрібним законом розподілу амплітуд, значення амплітуд імпульсів A_j з формули (2.7) мають корелюватися із завантаженим спектром-шаблоном. У наступних підрозділах більш детально розглядаються два підходи до моделювання, які були реалізовані в ході дослідження і дозволяють досягти цієї мети.

2.3.2.1. Метод моделювання з використанням відрізків ймовірностей розподілу амплітуд

Даний підхід до імітаційного моделювання згідно заданого шаблону базується на статистичних методах та використанні відрізків ймовірностей розподілу амплітуд імпульсів при моделюванні образу сигналу. Спочатку потрібно сформувати масив відрізків ймовірностей потрапляння амплітуди імпульсу в певний діапазон згідно завантаженого файлу-шаблону. Оскільки такий файл містить фіксовану кількість N каналів та кількість зареєстрованих електронікою імпульсів в кожному каналі, то взявши за основу весь відрізок ймовірності шириною від 0 до 1, ми розбиваємо його на N відрізків, що відповідають ймовірності потрапляння значення амплітуди імпульсу в кожен канал відповідно. Ширина відрізка ймовірності для конкретного каналу обчислюється за формулою:

$$wp_i = C_i / TC, \quad (2.9)$$

де wp_i – ширина відрізка ймовірності для значення амплітуди імпульсу A_j , що відповідає i -му каналу; C_i – кількість імпульсів зареєстрованих на i -му каналі в шаблоні; TC – загальна кількість зареєстрованих імпульсів у завантаженому файлі-шаблоні на всіх каналах згідно формули:

$$TC = \sum_{i=0}^N C_i. \quad (2.10)$$

В програмній реалізації алгоритму відрізки ймовірностей можуть зберігатися у відсортованому масиві як пари чисел (початкове, кінцеве значення ймовірності). Також потрібно реалізувати функцію, яка буде ефективно виконувати бінарний

пошук [68] в даному масиві відрізка ймовірності, в який потрапляє згенероване випадкове число.

Далі алгоритм моделювання полягає в наступних кроках:

1. Створюємо масив із L імпульсів (кількість обчислена згідно формули (2.6)) з поки невизначеними амплітудами, проте час появи кожного імпульсу t_j встановлюється випадковим чином в діапазоні часу експерименту за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом [69].

2. Відсортовуємо даний масив за часом появи імпульсів та починаємо моделювання дискретних значень цифрового сигналу s_i використовуючи формулу (2.7). При цьому амплітуда A_j кожного імпульсу встановлюється таким чином, що генерується випадкове число R в діапазоні від 0 до 1 за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом та залежно від того, у відрізок ймовірності якого каналу wp_i потрапляє це випадкове число R , береться значення амплітуди імпульсу A_j , яке відповідає цьому каналу (рис. 2.8). Оскільки час появи імпульсу генерується випадковим чином, то імпульси можуть накладатися один на одного, формуючи так званий pile-up ефект.

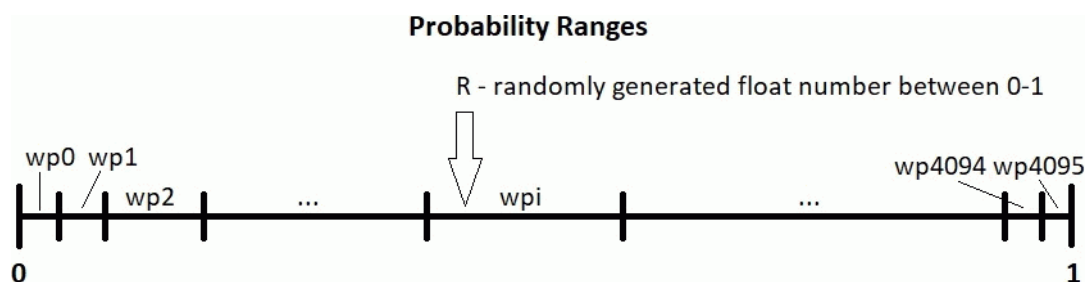


Рис. 2.8. Схематичне зображення відрізків ймовірностей вибору значень амплітуд модельованих імпульсів згідно завантаженого шаблону.

Таким чином, чим більше було зареєстровано імпульсів на певному каналі у завантаженому шаблоні, тим ширше буде діапазон ймовірності потрапляння в цей канал, і тим більше змодельованих імпульсів матимуть амплітуду, яка відповідає саме цьому каналу. Даний підхід дозволяє симулювати хід експерименту, адже в

процесі моделювання і генерації випадкових чисел розподіл амплітуд змодельованих імпульсів буде поступово наближатися до завантаженого шаблонного розподілу.

2.3.2.2. Метод моделювання на основі детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд

Даний підхід до комп'ютерного моделювання базується на тому, що у завантаженому шаблоні нам відома кількість зареєстрованих імпульсів в кожному з N каналів та загальна кількість імпульсів у всіх каналах. Виставляючи час експерименту та моделюючи певну кількість імпульсів L , що вказана у відсотках від загальної кількості (100%, 50%, 10%, тощо), ми можемо у відповідності із завантаженим шаблоном відразу вирахувати кінцеву кількість змодельованих імпульсів, що мають мати амплітуди A_j за наступною формулою:

$$CA_j = \frac{L}{TC} \times C_j, \quad (2.11)$$

де CA_j – кількість імпульсів з амплітудою A_j що відповідає каналу j ; L - загальна кількість імпульсів, що має бути змодельована (обчислюється за формулою (2.6)); TC – загальна кількість зареєстрованих імпульсів у завантаженому файлі-шаблоні на всіх каналах згідно формули (2.10); C_j – кількість зареєстрованих імпульсів на каналі j у завантаженому шаблоні.

Враховуючи вищезазначене, даний метод моделювання складається з наступних кроків:

1. Потрібно попередньо сформувати масив розподілу амплітуд імпульсів із N елементів, кожен із яких міститиме кількість імпульсів CA_j , що у підсумку мають бути змодельовані, та їх амплітуди A_j . Приклад такого масиву для 4096 каналів схематично зображений на рисунку 2.9.

2. В циклі беремо кожен елемент масиву розподілу амплітуд і формуємо новий масив, в який додаємо задану кількість імпульсів сигналу CA_j з відповідною амплітудою, проте час появи кожного імпульсу t_j визначається за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом в діапазоні всього часу

експерименту. В результаті ми отримаємо масив, що містить необхідну кількість імпульсів, які потрібно змодельовати і їх параметри (час появи та амплітуди).

3. Відсортовуємо масив імпульсів за часом появи у порядку зростання і моделюємо дискретні значення сигналу s_i згідно формули (2.7).

Channel number:	0	1	2	...	...	4094	4095
Modeled quantum pulses count:	CA_0	CA_1	CA_2	...	...	CA_{4094}	CA_{4095}
Amplitude that corresponds to channel:	A_0	A_1	A_2	...	...	A_{4094}	A_{4095}

Рис. 2.9. Сформований масив кінцевого розподілу амплітуд імпульсів модельованого сигналу.

У такий спосіб наприкінці процесу моделювання ми отримаємо образ сигналу, в якому розподіл амплітуд імпульсів повністю відповідає файлу-шаблону. Слід зауважити, що цей підхід дає необхідний результат лише коли експеримент моделюється від початку і до кінця. Саме в процесі моделювання розподіл амплітуд імпульсів буде сильно відрізнятися від завантаженого спектру-шаблону на відміну від підходу, описаного у розділі 2.3.2.1, коли в будь-який момент часу форма спектру змодельованого сигналу в цілому відповідає шаблону. Проте, даний підхід моделювання не має містити статистичних відхилень розподілу.

2.3.3. Метод комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією

2.3.3.1. Постановка проблеми і обґрунтування необхідності підвищення деталізації при моделюванні

Як було розглянуто в роботах [22, 70, 71], використовуючи формулу (2.7) можна програмно згенерувати цифровий образ сигналу для певної частоти дискретизації діджитайзера, наприклад 250 МГц, 500 МГц, тощо. Приклад

схематичної візуалізації цифрового сигналу, який не містить електричний шум, наводиться на рисунку 2.10.

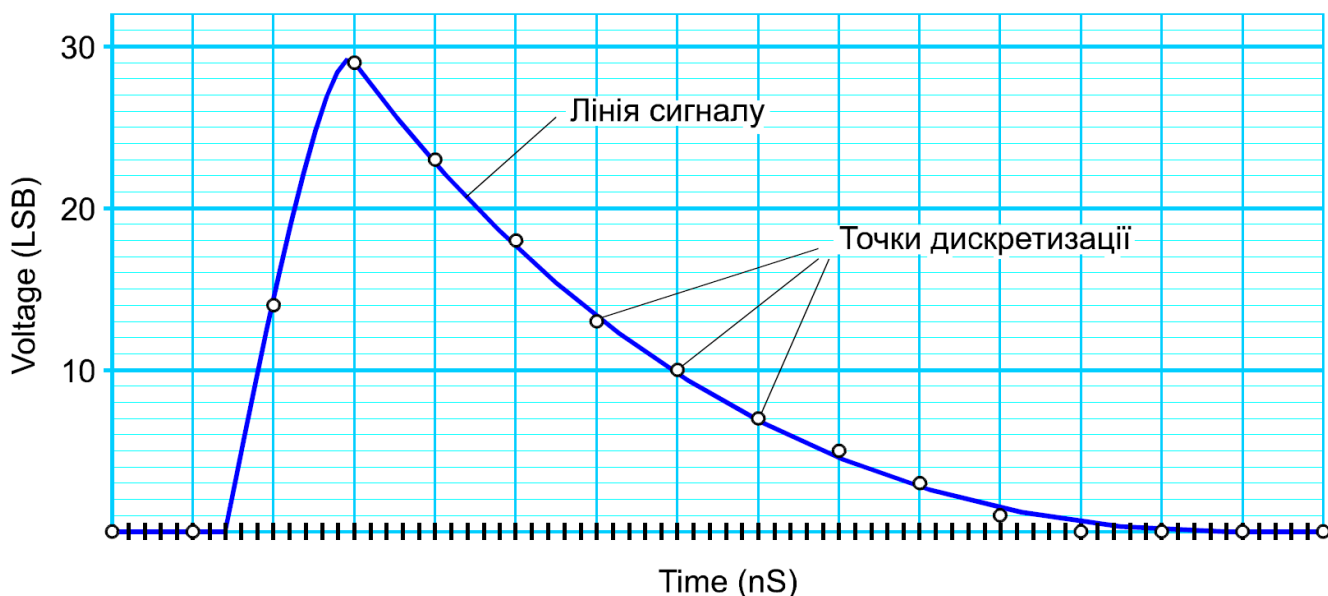


Рис. 2.10. Візуалізація імпульсного сигналу з відміченими точками дискретизації (оцифрування).

На цьому рисунку зображено також точки дискретизації (оцифрування) імпульсного аналогового сигналу. Горизонтальне положення кожної точки відповідає часу реєстрації миттєвого значення напруги, а вертикальне — відображає результат умовного аналого-цифрового перетворення цієї напруги. Послідовність отриманих значень у вигляді масиву чисел зберігається у пам'яті комп'ютера і являє собою цифровий образ сигналу. В подальшому, згенеровані дані можуть бути використані як вхідні дані для перевірки і оцінки точності роботи методів розпізнавання та аналізу основних параметрів спектрометричних сигналів, таких як час реєстрації та амплітуди імпульсів.

Проте при оцифруванні аналогового сигналу з детектора випромінювання під час реальних експериментів, фактичні значення часу появи імпульсу або його пікового значення (амплітуди) можуть не співпадати з точками дискретизації, як показано на рисунку 2.11. На даному рисунку можна побачити, що час початку та пікове значення імпульсу знаходиться між точками дискретизації. Це, зокрема,

може вносити похибку при визначенні амплітуди та часу реєстрації імпульсів простими методами комп'ютерного аналізу (наприклад методом Максимуму), яка спричинена саме процесом оцифрування сигналу. Чим вищою буде частота оцифрування, тим щільніше знаходитимуться точки дискретизації, і тим меншою має бути така похибка.

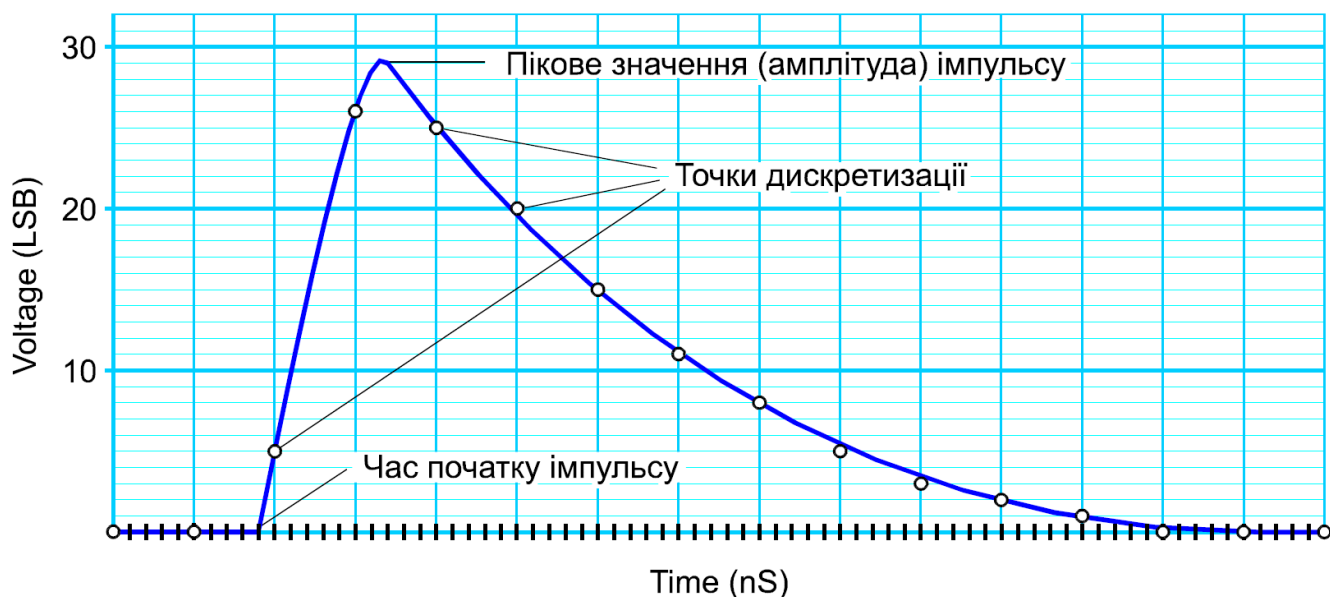


Рис. 2.11. Візуалізація імпульсного сигналу зі зміщенням часу появи та амплітуди імпульсу відносно точок дискретизації.

Для симуляції цифрового сигналу, який є максимально наближеним до даних отриманих під час реальних експериментів, при розробці алгоритмів моделювання важливо врахувати ці фактори. Тому в рамках дослідження було розроблено вдосконалений метод моделювання [72, 73], який дозволяє генерувати цифровий образ сигналу з підвищеною деталізацією та можливим зміщенням фаз імпульсів відносно точок дискретизації.

2.3.3.2. Моделювання спектрометричного сигналу з використанням регульованого коефіцієнту деталізації процесу генерації образу сигналу

Для моделювання вхідних даних оцифровувача, які забезпечують достатню міру подібності змодельованого сигналу до реального сигналу, що формується фізичним пристроєм, необхідно дотриматися кількох умов:

1. Окремі імпульси у складі спектрометричного сигналу можуть з'являтися у будь-який момент часу і не мають жодної прив'язки до частоти дискретизації. Час появи імпульсу має визначатися за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом в межах тривалості експерименту.

2. Програмний алгоритм моделювання значень сигналу має працювати з дискретністю, яка на порядок або більше перевищує дискретність процесу оцифрування сигналу. Тобто, якщо частота оцифрування становить 100 МГц (період 10 нс), то програмний крок генерації миттєвих значень сигналу у часі має бути не більшим ніж 1 нс.

3. Згенеровані значення сигналу мають задаватися на порядок точніше ширини одного каналу АЦП (LSB) і повинні бути представлені числами с плаваючою точкою (float). Для проведення числових експериментів на ідеалізованих спектрах тестові монохромні сигнали (сигнали сталої амплітуди, що відповідають значенню енергії деякого монохромного випромінювання) в каналі N мають генеруватися із точним значенням амплітуди без вірогідної складової сигналу, а сигнали фонового заповнення (рівномірно розподілений фон або Комптонівське розсіювання) — як $N + \delta$, де δ - випадкова складова рівномірно розподілена в межах від -0.5 до +0.4999.....

Враховуючи вищезазначені умови, при моделюванні цифрового образу сигналу з певною частотою оцифрування F_d діджитайзера (яка може задаватися в інтерфейсі програми, що виконує моделювання) було введено поняття коефіцієнту деталізації молодшого розряду діджитайзера – D_{coeff} . Таким чином, програмна генерація сигналу виконується з частотою дискретизації F_m , яка виражається наступною формулою:

$$F_m = F_d \times D_{coeff}. \quad (2.12)$$

Значення коефіцієнту D_{coeff} може змінюватися в налаштуваннях програми, що виконує симуляцію. Проте краще встановлювати цей коефіцієнт рівним або більшим десяти, щоб забезпечувати дискретність, яка на порядок перевищує

задану частоту оцифрування при моделюванні експерименту. Використовуючи формулу (2.7) ми можемо згенерувати масив значень сигналу $S[i]$, розмір якого обчислюється за формулою:

$$S_{size} = F_d \times D_{coeff} \times T, \quad (2.13)$$

де S_{size} - розмір масиву змодельованих значень сигналу, F_d - частота оцифрування діджитайзера (в герцах), D_{coeff} - коефіцієнт деталізації молодшого розряду діджитайзера, T - тривалість моделювання експерименту (в секундах).

На рисунку 2.12 наведено приклад візуалізації згенерованого імпульсного сигналу з амплітудою 2048 LSB при заданій частоті діджитайзера 250 МГц і коефіцієнті деталізації рівним 12ти (тобто алгоритм генерації цифрових даних виконується з частотою дискретизації 3.0 ГГц). Точки дискретизації візуалізовано для частоти дискретизації 250 МГц.

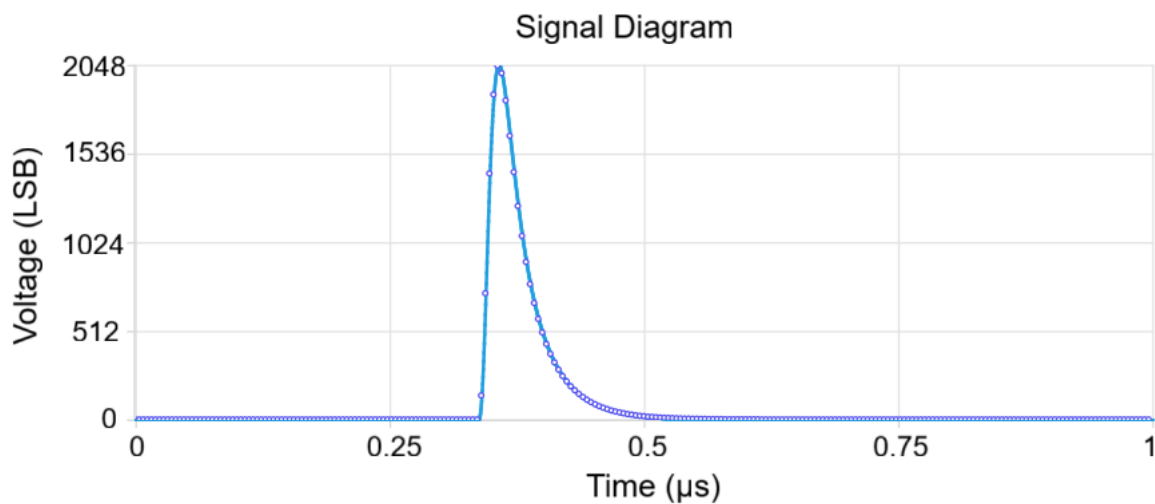


Рис. 2.12. Візуалізація згенерованого імпульсного сигналу з точками дискретизації (оцифрування)

Важливо зауважити, що комп'ютерні методи аналізу, які виконуватимуть розпізнавання основних параметрів імпульсів (час реєстрації, амплітуди) на змодельованих вищезазначеним чином масивах даних, мають працювати із вхідними даними тільки в точках дискретизації з частотою оцифрування діджитайзера F_d і з округленими цілими значеннями рівня сигналу, а не з більш

деталізованими значеннями. Адже під час реальних фізичних експериментів можуть бути отримані цифрові дані (цілі числа в LSB) тільки з частотою оцифрування діджитайзера (F_d), який використовується в обладнанні експерименту. Тому в алгоритмах аналізу програмна ітерація по масиву даних $S[i]$, що містить значення змодельованого сигналу в числах з плаваючою точкою та з певним коефіцієнтом деталізації D_{coeff} , має відбуватися наступним чином (приклад на мові програмування C++):

```
for(uint64_t i = 0; i < S.size(); i+=Dcoeff)
{
    int signal_value = std::round(S[i]);

    // digitized signal value processing...
}
```

Тобто для отримання номеру каналу діджитайзера, якому відповідає змодельоване деталізоване значення сигналу (число з плаваючою точкою), це значення повинне округлятися до найближчого цілого числа. Наприклад, значення сигналу від 6.5 до 7.4999... будуть потрапляти в канал діджитайзера під номером 7.

2.4. Алгоритм верифікації результатів роботи методів комп'ютерного аналізу

Як було зазначено у розділі 1, для більш об'єктивного дослідження ефективності існуючих та розроблених методів аналізу важливо мати можливість створення вхідних даних з повністю відомими параметрами. Це було реалізовано за допомогою вдосконалених алгоритмів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів, які дозволяють генерувати цифровий образ сигналу з послідовністю імпульсів, кількість, час появи та амплітуди яких є заздалегідь визначеними. Окрім цього, з метою оцінки точності розпізнавання параметрів імпульсів тим чи іншим методом комп'ютерної обробки було розроблено спеціальний алгоритм верифікації [14]. Даний алгоритм порівнює змодельовані та програмно виявлені імпульси (їх час появи, амплітуди) на співпадіння з певними

допустимими діапазонами відхилення. Верифікація є важливою складовою, адже імпульси можуть накладатися один на одного, особливо при високих рівнях завантаження. І розпізнаний загалом імпульс може не відповідати саме тому, що був згенерований під час моделювання, як показано на рисунках 2.13, а та 2.13, б. На рисунку 2.13, а зображено 4 змодельовані імпульси з однаковими амплітудами без урахування фактичного накладання один на одного. Перші два імпульси розташовані дуже близько один до одного, адже їх час появи майже співпадає.

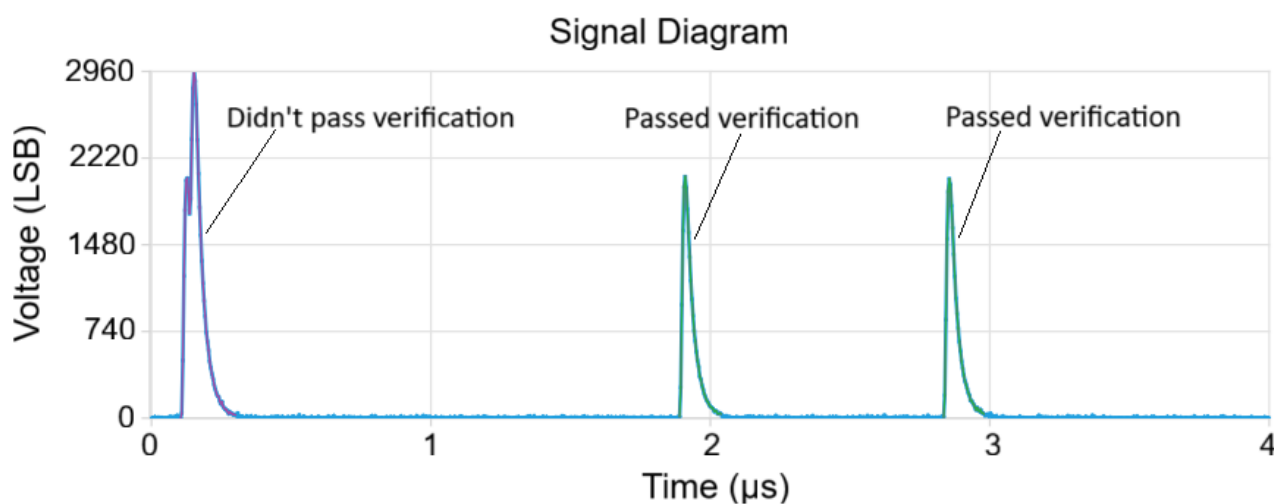
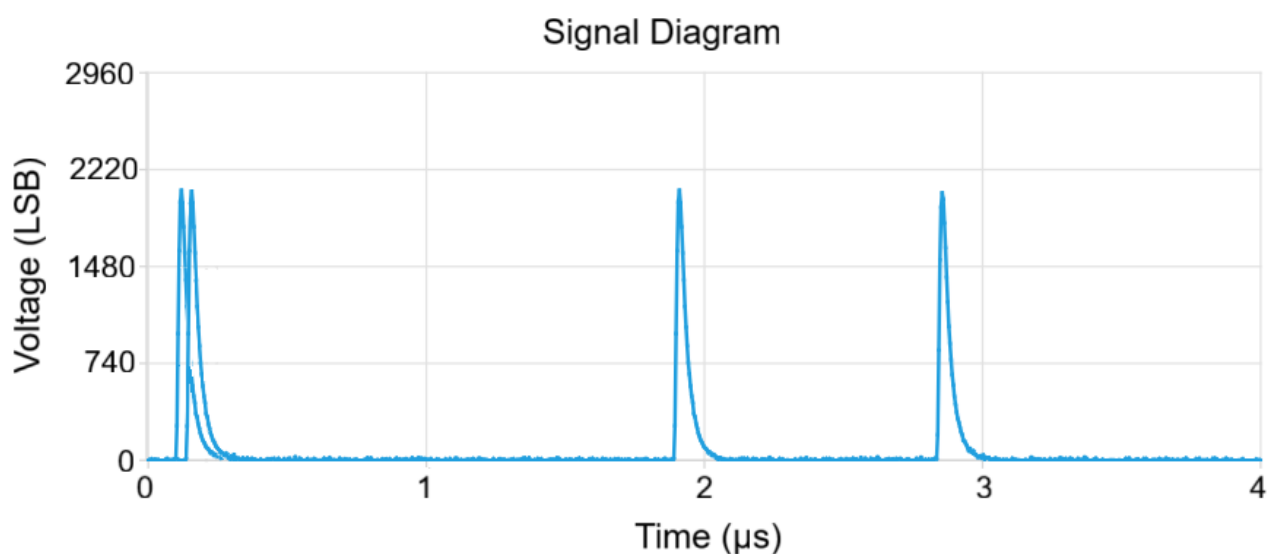


Рис. 2.13. Візуалізація змодельованого імпульсного сигналу: а – згенеровані імпульси без урахування їх фактичного накладання один на одного; б – результуюча форма сигналу з урахуванням суперпозиції імпульсів.

В свою чергу рисунок 2.13, б візуалізує результуючу форму імпульсного сигналу, що утворилася внаслідок суперпозиції імпульсів. Як можна бачити з цього рисунку, накладання перших двох імпульсів один на одного значно видозмінює форму сигналу, і деякі методи аналізу можуть розпізнати це як один імпульс великої амплітуди, що не відповідає дійсності. Це може вносити неточності в отриманий результуючий спектр. Алгоритм верифікації дозволяє виявити хибно розпізнані імпульси та більш об'єктивно оцінити точність розпізнавання конкретним методом комп'ютерного аналізу.

Оскільки програмний алгоритм верифікації може бути реалізований в одній функції, то найбільш оптимальним способом ілюстрації принципу його роботи буде приведення коду алгоритму на мові програмування C++ з детальними коментарями і поясненнями:

```
void VerifyDetectedPulses(
const std::vector<SimulatedPulse>& simulated_pulses,
const std::vector<DetectedPulse>& detected_pulses,
std::vector<DetectedPulse>& verified_pulses)
{
    // Очищуємо результуючий масив верифікованих імпульсів
    verified_pulses.clear();

    // Встановлюємо ітератор (вказівник) поточного розпізнаного
    // імпульсу dp_iter на початок масиву розпізнаних імпульсів
    auto dp_iter = detected_pulses.cbegin();

    // Запускаємо цикл, в якому проходимо по масиву
    // змодельованих імпульсів
    for(const auto& sim_pulse : simulated_pulses)
    {
        // Якщо ітератор (вказівник) на поточний розпізнаний
        // імпульс дійшов до кінця масиву розпізнаних імпульсів,
        // то виходимо з циклу (закінчуємо верифікацію)
```

```

if(dp_iter == detected_pulses.cend())
    break;

// Якщо час початку поточного розпізнаного імпульсу
// є більшим за час початку поточного симульованого
// імпульсу на допустимий поріг по часі, то переходимо до
// наступного симульованого імпульсу у відповідному циклі
if(dp_iter->StartIdx > sim_pulse.Time + DigTimeRange)
    continue;

// В іншому циклі інкрементуємо ітератор (вказівник) на
// поточний розпізнаний імпульс поки час появи поточного
// розпізнаного імпульсу є меншим за час появи поточного
// симульованого імпульсу на допустимий поріг по часі,
// тобто поки імпульси точно не співпадають по часі появи
while(dp_iter != detected_pulses.cend() &&
    sim_pulse.Time > DigTimeRange &&
    dp_iter->StartIdx < sim_pulse.Time - DigTimeRange)
{
    ++dp_iter;
}

// Якщо ітератор (вказівник) на поточний розпізнаний
// імпульс дійшов до кінця масиву розпізнаних імпульсів,
// то виходимо з циклу (закінчуємо верифікацію)
if(dp_iter == detected_pulses.cend())
    break;

// Створюємо копію ітератора (вказівника) на поточний
// розпізнаний імпульс, адже потенційно декілька
// розпізнаних імпульсів можуть співпадати по часі з
// симульованим, але не всі співпадатимуть по амплітуді,
// тож необхідно опрацювати такі сценарії
auto dp_iter_copy = dp_iter;

```

```

// В циклі за допомогою копії ітератора (вказівника)
// перевіряємо кожен наявний розпізнаний імпульс, який
// співпадає по часі з поточним симульованим
while(dp_iter_copy != detected_pulses.cend() &&
      IsValueInRange(dp_iter_copy->StartIdx, sim_pulse.Time,
                    DigTimeRange))
{
    // Перевіряємо чи поточний розпізнаний імпульс
    // співпадає за амплітудою з поточним симульованим з
    // допустимим діапазоном відхилення по амплітуді
    if(IsValueInRange(dp_iter_copy->AmplitudeCorrected(),
                    sim_pulse.Amplitude, AmplitudeRange))
    {
        // Є співпадіння. Додаємо поточний розпізнаний
        // імпульс до масиву верифікованих імпульсів
        verified_pulses.push_back(*dp_iter_copy);

        // Інкрементуємо ітератор (вказівник) на
        // поточний розпізнаний імпульс якщо він
        // співпадає з ітератором-копією
        if(dp_iter == dp_iter_copy)
            ++dp_iter;

        // Виходимо з внутрішнього циклу
        break;
    }

    // Інкрементуємо копію ітератора (вказівника)
    // на поточний розпізнаний імпульс
    ++dp_iter_copy;
}
}
}

```

Верифікація виконується в методі `VerifyDetectedPulses`, де `simulated_pulses` – масив симульованих імпульсів, `detected_pulses` – масив розпізнаних імпульсів, `verified_pulses` – результуючий масив верифікованих імпульсів, `DigTimeRange` та `AmplitudeRange` – допустимі діапазони відхилення по часу реєстрації та амплітуді для змодельованих і розпізнаних імпульсів, `IsValueInRange` – допоміжний метод, який перевіряє чи передане значення потрапляє у переданий діапазон. Вищезазначені масиви імпульсів мають бути відсортованими у порядку зростання за часом появи імпульсів.

Висновок до розділу 2

У другому розділі дисертації було представлено метод комп'ютерного аналізу спектрометричних даних під назвою Відстеження. В рамках даного методу було реалізовано підхід до фільтрації спектрометричного сигналу від електричного шуму з мінімальними змінами корисної складової, заснований на використанні швидких дискретних перетворень Фур'є, та розроблено алгоритм розпізнавання імпульсів з корекцією амплітуд при їх накладанні. Також було розроблено алгоритм оптимізації для підвищення швидкості роботи нового методу при низьких рівнях завантаження ($< 10^5$ імпульсів за секунду) і відносно низькій щільності імпульсів.

Крім цього, було розроблено новий метод аналізу спектрометричних сигналів, особливостями якого є використання дискретних вейвлет-перетворень та адаптивного алгоритму `BayesShrink` для фільтрації сигналу від шуму та обробка суперпозиції імпульсів. Даний підхід дозволяє автоматично визначати рівень шуму, не потребує ручного встановлення порогу шумоподавлення, тому є більш універсальним і може застосовуватися до різних наборів спектрометричних даних.

Далі було описано один з існуючих підходів до комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів та запропоновано вдосконалені моделі та методи моделювання цифрового образу сигналу. Для цього було розроблено математичні

моделі та два різні алгоритми для комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону, які були реалізовані в ході дослідження. Перший підхід базується на використанні статистичних методів, в основі яких формування необхідного розподілу амплітуд здійснюється шляхом управління ймовірністю виникнення імпульсів потрібної амплітуди. Другий метод моделювання згідно заданого шаблону базується на використанні детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд імпульсів. Окрім того, було представлено метод моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією, з використанням регульованого коефіцієнту деталізації молодшого розряду оцифровувача. Розроблений алгоритм моделювання дозволяє програмно генерувати цифровий образ сигналу з дискретністю, яка наближує його до реального аналогового сигналу. При цьому точність його відтворення як мінімум на порядок перевищує роздільну здатність сучасних діджитайзерів.

Також був розроблений алгоритм верифікації, що дав можливість порівняти масиви згенерованих і розпізнаних імпульсів після аналізу та визначити, який відсоток виявлених певним методом імпульсів співпадає з тими, що були змодельовані. Це надало змогу більш об'єктивно оцінити точність розпізнавання кожним з методів аналізу, на відміну від попередніх досліджень, де лише визначалась загальна кількість розпізнаних імпульсів.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [1, 3-4, 6, 8].

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ

3.1. Вибір програмних засобів для реалізації запропонованих моделей та методів комп'ютерного моделювання і спектрального аналізу

Загалом вибір програмних засобів для реалізації запропонованих методів і моделей комп'ютерного моделювання та аналізу спектрOMETричних сигналів базується на двох основних складових. По-перше, це вибір мови програмування та відповідних бібліотек в межах обраної мови, які дозволять в повній мірі реалізувати необхідні функціональні можливості. По-друге, це вибір середовища розробки, що є не менш важливим фактором і може суттєво впливати на якість та швидкість реалізації.

Окрім цього, враховуючи специфіку роботи комп'ютеризованих систем спектрального аналізу, розроблених математичних моделей та методів, важливо відмітити наступні критерії, які є ключовими при виборі вищезазначених програмних засобів:

1. **Функціональні можливості.** Обрана мова програмування та середовище розробки мають надавати усі програмні інструменти для реалізації запропонованих методів аналізу спектрOMETричних сигналів, а також моделей та методів комп'ютерного моделювання імпульсних сигналів. Це має включати в себе засоби для обробки та аналізу великих об'ємів даних, візуалізації цифрового образу змодельованого сигналу, візуалізації результатів роботи методів аналізу (побудови графіків, діаграм, тощо) та підтримки гнучких додаткових налаштувань. Також програмне забезпечення має надавати можливості передачі даних по мережі та розробки розподіленої комп'ютерної системи для обробки оцифрованих сигналів.

2. **Кросплатформність.** Повинна бути можливість скомпілювати та встановити програмне забезпечення на декілька різних операційних систем, таких

як Windows (як одна з найбільш поширених) та Linux (яка часто використовується в академічних та наукових колах, на виробництві, тощо).

3. **Швидкість роботи з даними.** Записані або змодельовані цифрові спектрометричні сигнали являють собою великі масиви даних. Тому для роботи з ними необхідні програмні засоби, що є максимально ефективними в керуванні пам'яттю та обробці великих об'ємів даних.

4. **Можливість інтеграції з апаратними пристроями.** Зазвичай оцифровані сигнали записуються за допомогою спеціальних пристроїв – діджитайзерів, які можуть бути інтегровані з програмним забезпеченням через низькорівневі порти (PCI Express, USB та інші). При виборі програмних засобів для розробки важливо закласти можливість роботи з низькорівневими портами вводу-виводу ПК або можливість підключення додаткових бібліотек для цих цілей.

3.1.1. Вибір мови програмування і відповідних бібліотек

Враховуючи специфіку дослідження, де потрібно вирішувати широкий спектр задач, таких як моделювання, обробка великих масивів даних, візуалізація результатів (побудова графіків, діаграм, гістограм), важливо вибрати універсальну та багатофункціональну мову програмування з великим набором доступних бібліотек та готових компонентів, що підходять для цих цілей. У якості можливих опцій були обрані наступні поширені мови програмування: C# (.NET), Python, C++.

Для початку розглянемо можливість застосування мови програмування C# та бібліотеки .NET Framework [74] для реалізації запропонованих методів та моделей. Серед переваг цього підходу можна виділити наступні пункти:

- **Універсальність.** C# може використовуватися для розробки різного роду програмних засобів, зокрема настільних додатків під операційні системи, сайтів, веб-сервісів, ігор, тощо. Розробка на даній мові базується на потужній платформі .NET, яка забезпечує надійність, масштабованість та гнучкість.

- **Досить висока продуктивність.** Завдяки автоматичному керуванню пам'яттю та іншим можливостям .NET, таким як підтримка багатопотоковості та

асинхронного програмування, розробка на C# може бути досить продуктивною. Багатопотоковість допомагає виконувати завдання паралельно і ефективно використовувати багатоядерні процесори.

- **Простота вивчення і використання.** C# має простий синтаксис, що полегшує розробку та робить код легким для читання. Дана мова програмування є об'єктно орієнтованою, що дає змогу розробникам використовувати об'єкти та частини коду в різних контекстах, полегшує повторне використання коду та дозволяє створювати складні додатки, які легко масштабуються та підтримуються.

- **Велика та активна спільнота розробників.** Наявність великої спільноти розробників забезпечує швидкий доступ до допомоги, відповідей на запитання та актуальних знань у галузі.

Проте серед мінусів використання C# (.NET) можна виділити наступні:

- **Нижча обчислювальна ефективність за деякі низькорівневі мови програмування.** C# є високорівневою мовою програмування, код якої компілюється в проміжний байт-код IL (Intermediate Language) та безпосередньо виконується при запуску додатку в операційній системі за допомогою середовища виконання CLR (Common Language Runtime). Це забезпечує універсальність, автоматичне управління пам'яттю та іншими ресурсами і додаткову безпеку. Проте, це може призводити до зниження обчислювальної ефективності в порівнянні з деякими іншими мовами програмування, наприклад, такими як C++.

- **Орієнтованість на Windows OS та технології Microsoft.** З початку створення мова C# та платформа .NET були орієнтованими на розробку настільних додатків тільки для операційної системи Windows та на роботу в основному з технологіями компанії Microsoft. Останнім часом, після виходу платформи .NET Core, з'явилася можливість розробки кросплатформних додатків, які можуть бути встановлені на Linux та macOS. Проте розробка програмних засобів під дані операційні системи вимагає певних маніпуляцій, проміжних налаштувань та встановлення додаткових бібліотек.

C# загалом є багатофункціональною, потужною та універсальною мовою програмування. Проте, максимально висока продуктивність, повна кросплатформність, можливість працювати з портами вводу-виводу на низькому рівні для потенційної інтеграції з апаратними пристроями є критичними, тому C# не є самим оптимальним вибором.

Далі розглянемо можливість використання мови програмування Python та її бібліотек. Цей підхід має наступні плюси:

- **Гнучкість та універсальність.** Python можна використовувати для широкого спектру завдань, від аналізу даних, математичних обчислень, веб-розробки до штучного інтелекту та автоматизації. Дана мова має велику та різноманітну стандартну бібліотеку, що містить готові модулі та функції для вирішення різних завдань, включаючи можливості обробки великих масивів даних та візуалізації результатів.

- **Кросплатформність.** Код Python може запускатися на різних операційних системах: Windows, macOS, Linux і UNIX. Інтерпретатор Python існує для всіх популярних платформ і за замовчуванням входить в більшість дистрибутивів Linux.

- **Простота синтаксису та розробки.** Однією з головних переваг Python є його читабельний синтаксис. Мова була створена з урахуванням того, щоб код був зрозумілим для людей, і вона наближена до природної мови, що полегшує її вивчення для новачків та скорочує час розробки.

- **Велика спільнота розробників.** Python — це мова програмування з відкритим вихідним кодом, яка має велику та активну спільноту розробників, що робить свій внесок у її обширну документацію та ресурси підтримки.

Тим не менш, використання даної мови програмування для цілей дослідження має певні мінуси:

- **Нижча продуктивність за низькорівневі мови програмування.** Python є інтерпретованою мовою, тобто код виконується поступово

інтерпретатором, а не заздалегідь компілюється в машинні команди. Такий підхід додає гнучкості та універсальності, проте може призводити до нижчої швидкості виконання програми, ніж, наприклад, програми розробленої і скомпільованої на C++. Деякі бібліотеки можуть бути оптимізованими для виконання конкретних задач (зокрема для тренування моделей машинного навчання), проте в загальних випадках розроблені програмні засоби можуть демонструвати нижчу обчислювальну ефективність, ніж аналоги, створені з використанням низькорівневих мов програмування.

- **Складність інтеграції з апаратними засобами.** Потрібно відзначити, що при використанні мови програмування Python пряма взаємодія з апаратними пристроями є досить складним завданням. Існують певні бібліотеки, які можуть допомогти реалізувати сценарії інтеграції з обладнанням, проте даний процес є більш складним, ніж при використанні низькорівневих мов програмування.

Враховуючи вищезазначене, можна відмітити, що Python є універсальною, функціональною та легкою для вивчення мовою програмування з широким набором бібліотек, проте можливе зниження продуктивності внаслідок інтерпретації коду програми роблять цю мову менш бажаною для реалізації методів моделювання та аналізу параметрів спектрометричних сигналів і дослідження їх ефективності. Також складність прямої взаємодії з апаратними пристроями може бути критичним недоліком, враховуючи можливість потенційної інтеграції розроблених методів і алгоритмів в комп'ютеризовані системи спектрального аналізу.

Також розглянемо можливість застосування C++ та супутніх бібліотек для реалізації запропонованих методів та моделей. Використання даної мови програмування надає наступні переваги:

- **Універсальність.** C++ можна використовувати для розробки широкого спектру програм, зокрема високонавантаженого програмного забезпечення, операційних систем, драйверів, настільних додатків, комп'ютерних ігор, систем реального часу, тощо. Дана мова програмування дозволяє створювати

як низькорівневий (рівня апаратного забезпечення та роботи з обладнанням), так і високорівневий код (створення програмної частини). Використання стандартної бібліотеки шаблонів STL (Standard Template Library) та додаткових бібліотек, таких як QT [75], Boost [76], OpenCV [77] надають багато готових класів і компонентів для роботи з масивами даних, зображеннями, файловою системою, графічним інтерфейсом користувача, мультимедіа, мережевими з'єднаннями та іншим корисним функціоналом.

- **Висока продуктивність.** C++ відомий своєю високою швидкістю виконання коду, особливо порівняно з більш високорівневими мовами, такими як Python, Java або C#. Це робить його ідеальним вибором для задач, де потрібна висока продуктивність, наприклад, у системному програмуванні, розробці додатків до персональних комп'ютерів з максимальною швидкістю роботи, відеоігор або хмарних систем. Також це може бути дуже важливим фактором при дослідженні методів комп'ютерної обробки оцифрованих спектрометричних сигналів, де зазвичай потрібно мати справу з великими об'ємами даних та об'єктивно оцінювати ефективність роботи того чи іншого методу.

- **Контроль над ресурсами.** C++ дозволяє ручне керування пам'яттю та іншими ресурсами, що дає розробникам більший контроль над продуктивністю та безпекою програми. Повністю детермінований і контрольований механізм управління об'єктами в пам'яті надає додаткові можливості для досвідчених розробників в плані оптимізації програмно реалізованих математичних моделей та алгоритмів.

- **Можливість низькорівневого програмування.** Дана мова програмування надає можливість безпосередньої роботи на низькому рівні з пам'яттю, адресами, портами. Це може бути важливим критерієм при потребі потенційної інтеграції розроблених програмних засобів з апаратними пристроями, наприклад діджитайзерами, АЦП або різноманітними датчиками при побудові комплексної комп'ютеризованої системи спектрального аналізу.

Серед недоліків використання C++ можемо зазначити наступні:

- **Більша складність розробки.** C++ має більш складний синтаксис і складніші концепції, ніж деякі високорівневі мови програмування. Це може ускладнити процес навчання для новачків, збільшити ризик помилок під час написання коду. Ручне управління пам'яттю, узагальнене програмування з використанням шаблонів та інші додаткові механізми мови вимагають від розробників уважного та продуманого підходу при створенні програмного забезпечення.

- **Зниження безпеки при роботі з ресурсами порівняно з високорівневими мовами програмування.** Можливість роботи на низькому рівні з пам'яттю, адресами, портами при необережному використанні може перетворитися на недолік. Наявність безлічі можливостей, що порушують принципи безпеки типів приводить до того, що в C++ програми можуть легко закрастися помилки, які важко знаходити та відлагоджувати. Замість контролю з боку компілятора розробники повинні дотримуватися певних правил кодування.

Беручи до уваги універсальність, функціональність, повну кросплатформність, максимальну швидкодію, можливість низькорівневої взаємодії з портами вводу-виводу, C++ є найбільш оптимальним вибором для реалізації моделей і алгоритмів комп'ютерного моделювання та методів аналізу параметрів спектрометричних сигналів, а також дослідження ефективності їх роботи. Можливість інтеграції з апаратними пристроями є важливим фактором для потенційного впровадження розроблених методів обробки сигналів в комп'ютеризованих системах спектрального аналізу. Вищезазначені недоліки використання C++ не є критичними для розробників, які мають достатній досвід програмування на даній мові та поглиблене розуміння специфіки її роботи. Також в сучасних стандартах мови (C++ 11, 14, 17, 20, 22) з'явилися нові корисні механізми [78, 79], такі як розумні вказівники (smart pointers), авто змінні (auto), лямбда вирази (lambda expressions) та багато інших, що дозволяють автоматизувати роботу з об'єктами в пам'яті та прискорити розробку.

3.1.2. Вибір інтегрованого середовища розробки (IDE)

Для мови програмування C++ доступні декілька варіантів інтегрованих середовищ розробки (IDE), кожне з яких має свої плюси і мінуси в контексті дослідження. Тому наступним етапом є вибір середовища розробки, яке надасть оптимальні можливості для реалізації комп'ютерного моделювання, методів аналізу спектрометричних сигналів та візуалізації отриманих результатів. Серед найбільш розповсюджених серед розробників на мові C++ слід зазначити наступні IDE: Visual Studio, QT Creator, Visual Studio Code, CLion. Нижче наводиться більш детальний огляд вищезазначених середовищ розробки:

- **Visual Studio** — комплексне інтегроване середовище розробки, що підтримує декілька поширених мов програмування і має дуже розвинуту підтримку для програмування на мові C++. Містить інтелектуальну допомогу в розробці (система IntelliSense), а також широкий набір графічних компонентів для розробки інтерфейсу користувача (UI) програми. Проте слід зазначити, що Visual Studio пропонує готові набори стандартних компонентів (меню, кнопки, списки, таблиці, тощо), які підходять для додатків з типовим інтерфейсом користувача. Якщо потрібні більш розвинуті графічні компоненти, які здатні візуалізувати складні графіки, діаграми, гістограми, то необхідно використовувати сторонні рішення та бібліотеки (зазвичай комерційні), або розробляти власні компоненти. Одним з важливих недоліків, які впливають на вибір Visual Studio є те, що дане середовище розробки не працює на Linux подібних операційних системах.

- **QT Creator** — зручне і швидке інтегроване середовище розробки C++, що базується на бібліотеці QT Framework та пропонує цікаві можливості для розробників. Ця кросплатформна IDE має сучасний редактор коду C++, вбудований зручний графічний інтерфейс, дизайнер форм, інструменти навігації та багато іншого. Бібліотека QT Framework містить широкий набір компонентів для розробки інтерфейсу користувача програми та окрім стандартних елементів, має розвинуті компоненти для візуалізації даних, такі як: графіки, діаграми, гістограми, осцилограми, налаштування яких можна змінювати або розширювати.

Також даний фреймворк містить широкий набір компонентів для роботи з мережею, мультимедіа (аудіо, відео, камерою), сенсорами та багато інших готових складових для розробки.

- **Visual Studio Code** — інтегроване середовище розробки, створене Microsoft для Windows, Linux і macOS. Після встановлення Visual Studio Code містить базову підтримку для більшості поширених мов програмування, включаючи C, C#, C++, Fortran, Go, Java, JavaScript, Node.js, Python, Rust. Функції IDE включають підтримку налагодження, підсвічування синтаксису, інтелектуальне завершення коду, фрагменти, рефакторинг коду та вбудований Git. Проте варто зазначити, що дане середовище розробки надає значно менші можливості для розробки на мові програмування C++, ніж Visual Studio.

Беручи до уваги наведені вище фактори, для розробки було обрано QT Creator, тому що дане середовище розробки є кросплатформним, багатофункціональним і створене спеціально для роботи з бібліотекою QT Framework. Ця бібліотека має вбудовану підтримку графічних компонентів для візуалізації даних отриманих при проведенні наукових досліджень, такі як графіки, гістограми, діаграми, тощо. Також вищезазначені елементи інтерфейсу користувача можуть бути видозмінені та розширені при потребі з мінімальною затратою часу. Дані графічні компоненти мають найкраще підійти для візуалізації оцифрованих спектрометричних сигналів та для відображення отриманих спектрів після застосування комп'ютерних методів аналізу. QT Creator та QT Framework можуть бути встановлені як на операційні системи Windows, так і на Linux подібні, тому дозволяють розробляти та компілювати програмне забезпечення під різні платформи.

3.2. Опис розробленого програмного засобу для комп'ютерного моделювання, аналізу та верифікації спектрометричних даних

В рамках дослідження була розроблена кросплатформна програма (Spectrometric Signals Analyzer) на мові C++ з використанням бібліотеки QT версії 6.8.3. Програмний засіб може бути встановлений на декілька різних операційних систем та реалізує наступні можливості [80]:

- **комп'ютерне моделювання (симуляцію)** цифрових образів спектрометричних сигналів, які за форматом відповідають вихідним даним діджитайзера та наближені до реальних сигналів;
- **завантаження** файлів зі спектрометричними даними, отриманими під час реальних експериментів;
- **розпізнавання та вимірювання параметрів спектрометричних даних** за допомогою програмно реалізованих існуючих та нових розроблених методів аналізу;
- **верифікація точності аналізу та отримання метрик ефективності роботи** методів комп'ютерної обробки.

Додаток надає можливість симулювати наближений до реального сигнал з попередньо вказаним законом розподілу амплітуд імпульсів, або завантажити дані, отримані безпосередньо за допомогою діджитайзера. Також було реалізовано можливість симуляції на основі спеціальних файлів-шаблонів, записаних раніше за допомогою спектрометричної апаратури. Вони являють собою табличні функції розподілу енергій (амплітуд імпульсів) і є чисельним представленням різних енергетичних спектрів. За необхідності можна також застосовувати і спеціально створені (ідеалізовані) функції розподілу. Під час створення додатку у якості шаблонів використовувалися файли спектрів, отримані за допомогою 12-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що має 4096 каналів. Для моделювання цифрового сигналу з потрібним законом розподілу амплітуд та потрібними характеристиками було використано математичні моделі і алгоритми

моделювання згідно файлів шаблонів та метод моделювання з підвищеною деталізацією, які були детально описані у розділі 2.3.

В програмі було реалізовано два існуючі методи по визначенню параметрів спектрометричних сигналів — Максимуму (Maximum) та Підбору (Fitting). Основні принципи роботи даних методів було детально описано у розділі 1.1. Також було програмно реалізовано розроблений метод аналізу під назвою Відстеження та розроблений метод обробки даних з використанням дискретних вейвлет-перетворень, використовуючи власні алгоритмічні підходи. Результати роботи вищезазначених методів візуалізуються у вигляді числових параметрів, часових діаграм сигналів та гістограм спектрів, побудованих на основі проведеного аналізу.

Окрім цього, після запуску обраного методу комп'ютерної обробки додаток дозволяє програмно виміряти та вивести інформацію про тривалість його роботи, загальну і верифіковану кількість розпізнаних імпульсів та точність методу. Для перевірки правильності розпізнавання при аналізі на симульованих даних з відомими параметрами було використано розроблений алгоритм верифікації (описаний у розділі 2.5), який порівнює згенеровані та розпізнані імпульси на співпадіння з допустимими діапазонами відхилення, що можуть бути задані в інтерфейсі програми. Верифікована точність методу аналізу визначається співвідношенням кількості верифікованих імпульсів до загального числа змодельованих.

3.2.1. Інтерфейс користувача та функціональні можливості додатку

На рисунку 3.1 наводиться вигляд основного інтерфейсу користувача розробленої програми [80].

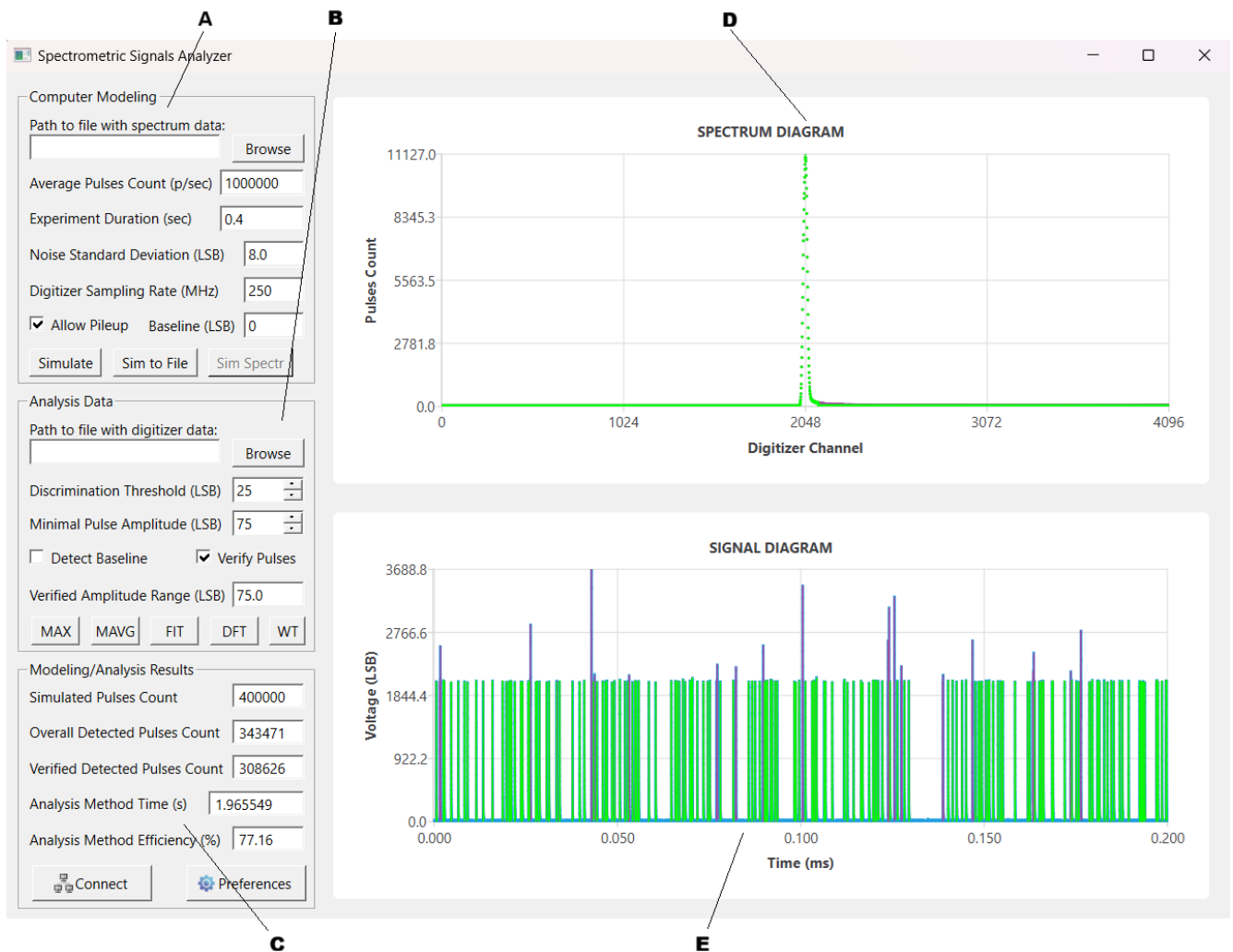


Рис. 3.1. Візуалізація інтерфейсу користувача розробленої програми для моделювання та аналізу параметрів спектрометричних сигналів.

Головне вікно програми містить наступні групи елементів інтерфейсу користувача відповідно до функцій, які вони виконують.

A. Елементи налаштування та управління моделюванням (симуляцією) цифрового образу сигналу.

B. Елементи налаштування та управління аналізом спектрометричного сигналу.

C. Елементи виводу інформації про результати моделювання та аналізу, а також додаткові можливості (мережеві) і налаштування.

D. Діаграма відображення розподілу амплітуд (спектру) змодельованих\розпізнаних\верифікованих імпульсів.

Е. Діаграма відображення спектрометричного сигналу (симульованого або завантаженого з діджитайзера).

Моделювання спектрометричного сигналу

При моделюванні цифрового образу сигналу можна задати наступні параметри:

- Тривалість експерименту (в секундах)
- Рівень завантаження детектора (середня кількість імпульсів за секунду)
- Середньоквадратичне відхилення рівня електричного шуму, що накладається на сигнал згідно нормального розподілу (в LSB)
- Частота дискретизації сигналу (в МГц)
- Значення базової лінії сигналу (в LSB)
- Можливість суперпозиції імпульсів (pile-up ефекту) (так\ні)

Загалом реалізована можливість моделювання образу сигналу зі сталим (константним) розподілом амплітуд імпульсів (з опцією збереження симульованих даних у файл) або моделювання згідно попередньо завантаженого спеціального файлу-шаблону (який задає розподіл амплітуд імпульсів). Діаграма Е візуалізує змодельований імпульсний сигнал або сигнал, що був завантажений з файлу з даними, записаними за допомогою діджитайзера під час проведення реальних експериментів.

Аналіз та верифікація параметрів сигналу

В додатку було програмно реалізовано наступні методи аналізу спектрометричних сигналів: **метод Максимумів** (існуючий), **метод Підбору** (існуючий), **метод Відстеження** (розроблений), **метод з використанням вейвлет-перетворень** (розроблений). Для конфігурації роботи методів аналізу можливо вказати наступні параметри:

- Поріг дискримінації (в LSB).

- Мінімальне (порогове) значення амплітуди розпізнаного імпульсу (в LSB).
- Необхідність визначення базової лінії сигналу (так\ні)

Також надається можливість обрати чи потрібно запускати верифікацію розпізнаних імпульсів після роботи методу аналізу і якщо так, то вказати допустимий діапазон максимального відхилення розпізнаних імпульсів від змодельованих по амплітуді (в LSB).

Вивід результатів моделювання та аналізу\верифікації

В групі елементів інтерфейсу відображення результатів моделювання\аналізу\верифікації виводяться наступні дані:

- Кількість змодельованих імпульсів.
- Кількість загалом розпізнаних імпульсів.
- Кількість верифікованих імпульсів.
- Тривалість роботи методу аналізу (в секундах).
- Верифікована точність методу аналізу (у відсотках)

Діаграма D відображає розподіл амплітуд (результуючий спектр) змодельованих, розпізнаних та верифікованих імпульсів та дозволяє наглядно побачити наскільки ці графіки співпадають між собою.

Додаткові можливості програми

Окрім описаних вище елементів, в програмі додана можливість підключення до віддаленого програмного модулю для отримання спектрометричних даних по мережі, що описано більш детально у розділі 3.5. Також реалізовані додаткові налаштування, які зображені на рисунку 3.2. Дані графічні елементи дозволяють більш детально налаштовувати параметри діаграм, що відображають спектрометричний сигнал та отриманий результуючий спектр після роботи методів комп'ютерної обробки даних. Крім того, реалізована можливість змінювати параметри розроблених методів моделювання та методів аналізу спектрометричних даних за необхідності.

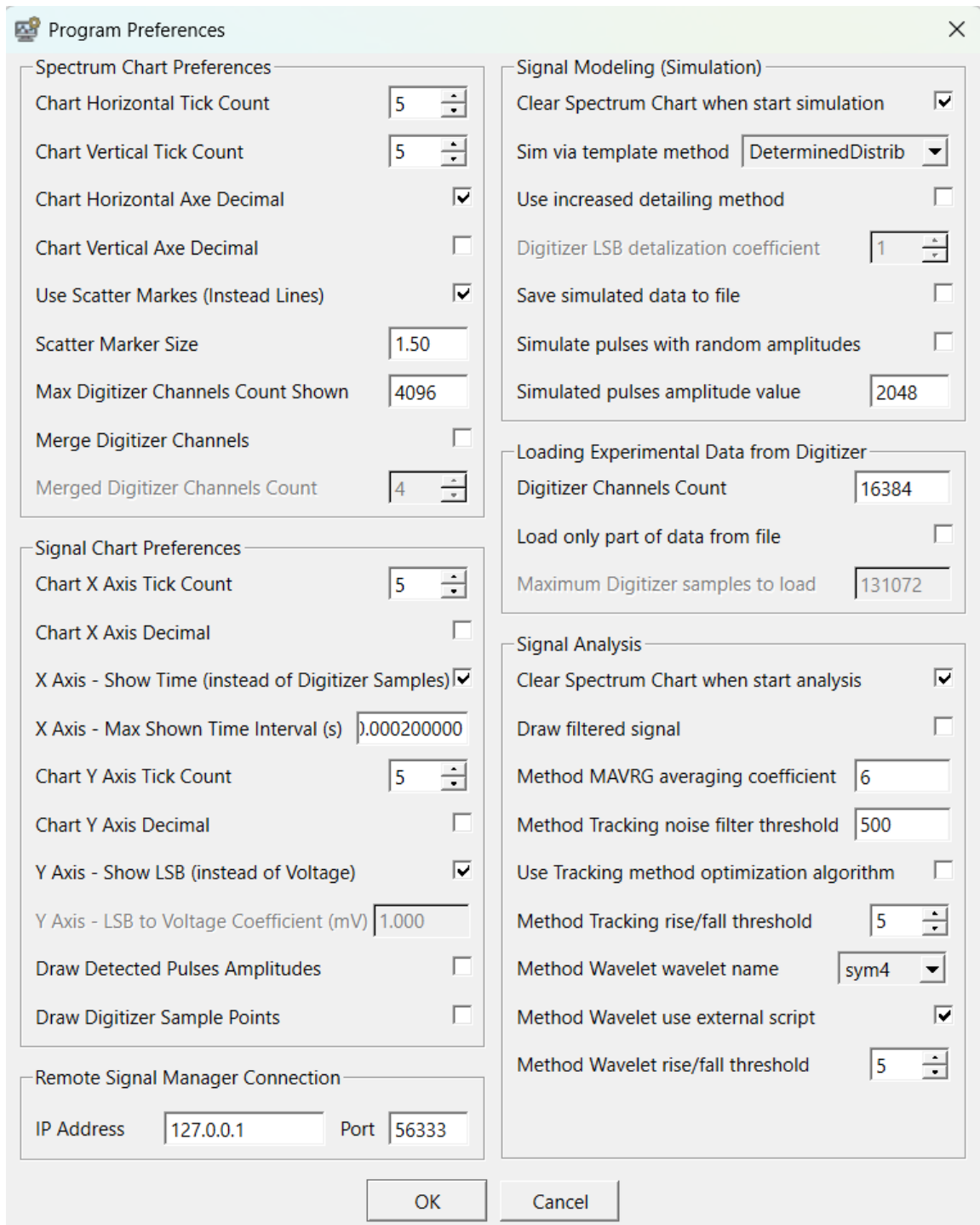


Рис. 3.2. Додаткові налаштування програми.

3.2.2. Архітектура програми

Створена в рамках дослідження програма являє собою додаток для персональних комп'ютерів, розробка якого базується на використанні бібліотеки QT Framework. Оскільки програмний засіб створений на об'єктно-орієнтованій мові програмування C++, то загалом функціонал реалізований за допомогою

об'єктів-класів, кожен з яких виконує свої певні задачі. На рисунку 3.3 зображена UML діаграма класів, що візуалізує внутрішню архітектуру програми.

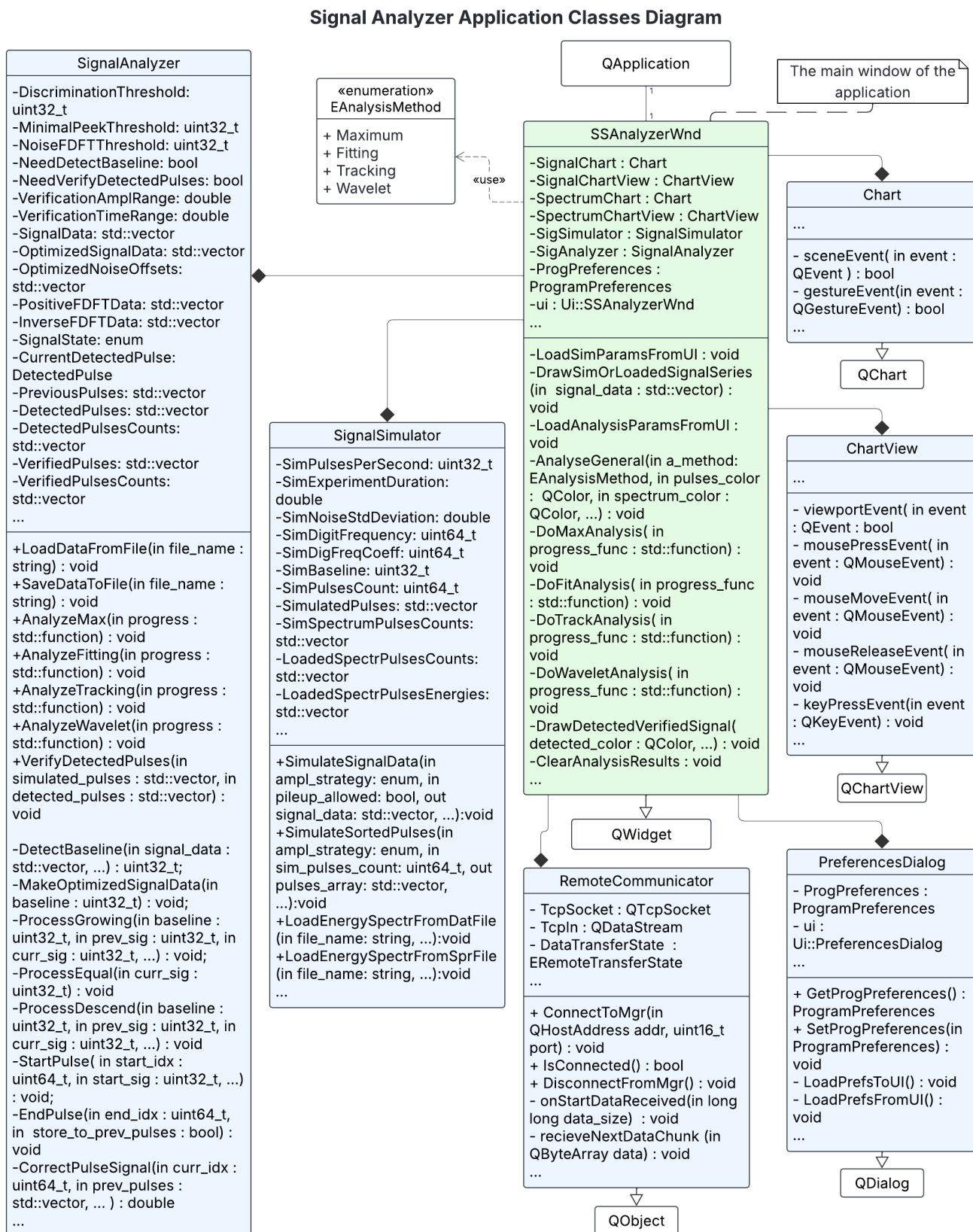


Рис. 3.3. UML діаграма класів, що реалізують функціональні можливості додатку.

Ця UML діаграма відображає основні розроблені компоненти (C++ класи, їх основні методи) та зв'язки між ними [80]. Нижче наводяться стислий опис класів представлених на діаграмі з рисунку 3.3 та задач, які вони виконують:

- **SSAnalyzerWnd** – клас, що наслідується від QWidget бібліотеки QT та реалізує функціонал інтерфейсу користувача головного вікна додатку, загальний вигляд якого був представлений на рисунку 3.1. Для реалізації комп'ютерного моделювання (симуляції) сигналу, програмного аналізу, відображення результатів та додаткових налаштувань даний клас включає в себе інші класи, що описані нижче.

- **SignalSimulator** – клас, що містить необхідні дані та методи для реалізації моделювання спектрометричного сигналу із заданими користувачем параметрами. Також даний клас реалізує методи для загрузки спеціальних файлів-шаблонів (*.dat, *.spr) для генерації цифрового образу сигналу згідно шаблонного розподілу амплітуд імпульсів використовуючи розроблені моделі і алгоритми моделювання, описані у розділі 2.3.

- **SignalAnalyzer** – один з найбільших класів, який містить програмну реалізацію існуючих та розроблених методів аналізу спектрометричних сигналів. Методи AnalyzeMax, AnalyzeFitting, AnalyzeTracking, AnalyzerWavelet відповідають за комп'ютерний аналіз цифрових даних методами Максимуму (Maximum), Підбору (Fitting), Відстеження (Tracking) та методом на основі вейвлет-перетворень відповідно, принцип роботи яких було описано у розділах 1.1, 2.1, 2.2. Окрім цього цей клас містить програмну реалізацію алгоритму верифікації (представлений у розділі 2.4) для співставлення згенерованих та розпізнаних імпульсів після аналізу з метою визначення верифікованої точності кожного з методів комп'ютерної обробки.

- **RemoteCommunicator** – клас, що наслідується від QObject і реалізує можливість підключення до віддаленого програмного модуля Spectrometric Signal Manager (описаного більш детально у розділі 3.5), обміну повідомленнями та отриманням спектрометричних даних по мережі. Робота даного класу базується на

використанні класу `QTcpSocket` для встановлення з'єднання з віддаленим хостом за певною IP-адресою і портом та передачі або отримання потоків даних.

- **PreferencesDialog** – даний клас наслідується від `QDialog` і реалізує відображення та функціональність вікна додаткових налаштувань програми, вигляд якого було показано на рисунку 3.2. Містить методи для встановлення, відображення, зміни та збереження додаткових налаштувань.

- **Chart, ChartView** – класи, які наслідуються від `QChart` та `QChartView` бібліотеки QT і відповідають за відображення діаграми цифрового сигналу та діаграми розподілу амплітуд (спектру) розпізнаних імпульсів. Додатково до стандартного набору функцій класів з бібліотеки QT в цих компонентах була реалізована можливість масштабування (збільшення\зменшення) окремих частин діаграми для більш детального аналізу отриманих графіків.

3.3. Програмна реалізація та результати роботи розроблених методів комп'ютерного аналізу

В створеному додатку було програмно реалізовано розроблений метод аналізу спектрометричних сигналів під назвою Відстеження, який був детально описаний у розділі 2.1. Також було реалізовано новий метод комп'ютерної обробки спектрометричних даних з використанням дискретних вейвлет-перетворень, представлений у розділі 2.2. Після реалізації, роботу даних методів було перевірено на різних наборах вхідних даних, змодельованих з різними параметрами рівня завантаження і тривалості експерименту.

Базова перевірка результатів роботи методів по розпізнаванню окремих імпульсів, визначення їх часу появи і амплітуд була виконана на штучному згенерованому цифровому образі сигналу зі сталим розподілом амплітуд (тобто всі імпульси мали однакову амплітуду) змодельованому з наступними параметрами:

- рівень завантаження детектора (інтенсивність генерації імпульсів) – 1000 імпульсів за секунду;

- тривалість експерименту – 1 секунда;
- рівень базової лінії сигналу – 0 LSB;
- середньо-квадратичне відхилення рівня електричного шуму, що накладається на сигнал – 8 LSB;
- частота оцифрування діджитайзером – 250 МГц.

В даному сценарії було згенеровано загалом 1000 імпульсів. При такому рівні завантаження ймовірність накладання імпульсів один на одного є дуже низькою і фактично накладань не було. На рисунку 3.4 наводяться результати аналізу змодельованого сигналу методом Відстеження, а на рисунку 3.5 — методом з використанням вейвлет-перетворень. Допустимий рівень відхилення по амплітуді для програмної верифікації розпізнаних імпульсів був встановлений рівним двократному максимальному значенню електричного шуму (50 LSB). Як можна побачити з рисунків 3.4 і 3.5, комп'ютерний аналіз розробленими методами в базовому сценарії (при відсутності суперпозиції) дозволив розпізнати всі 1000 згенерованих імпульсів. Також визначені параметри розпізнаних імпульсів (час появи, амплітуди) були верифіковані за допомогою програмно реалізованого алгоритму верифікації. Тому верифікована точність розроблених методів аналізу в даному сценарії склала 100 %. Діаграма відображення змодельованого сигналу (Signal Diagram) візуалізує частину сигналу (в часовому діапазоні від 0 до 4 ms) та кілька імпульсів, які потрапили в цей діапазон. Діаграма відображення розподілу амплітуд розпізнаних імпульсів (Spectrum Diagram) візуалізує розподіл у вигляді кривої Гаусса, з вершиною зі значенням 2048 LSB по осі X. В ідеальному випадку, якби був повністю відсутній електричний шум, то всі розпізнані імпульси мали б значення амплітуди 2048 LSB (як і змодельовані), а результуючий спектр в даному сценарії являв би собою одну точку зі значеннями: 2048 LSB – по осі X, 1000 імпульсів – по осі Y. Проте наявність електричного шуму, що накладається на сигнал, розподіленого згідно нормального розподілу і середньо-квадратичним відхиленням рівним 8 LSB призводить до розмиття спектральної лінії. Тому

візуалізований результуючий спектр у вигляді кривої Гауса є очікуваним результатом роботи методів аналізу в даному випадку.

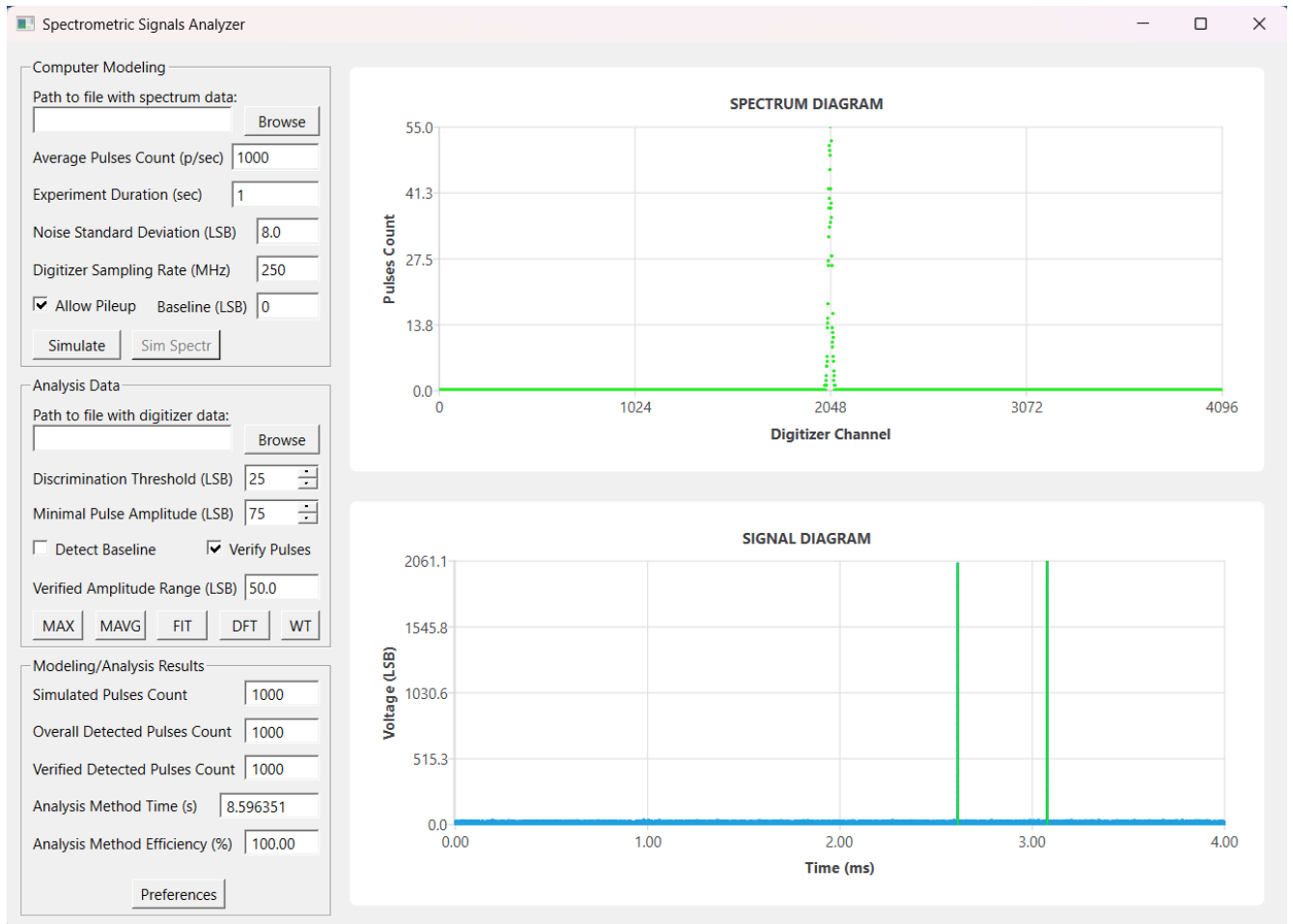


Рис. 3.4 Результати аналізу методом Відстеження змодельованого сигналу з рівнем завантаження 10^3 імпульсів за секунду.

Далі було досліджено ефективність роботи розроблених методів на вхідних даних, змодельованих з більш високим рівнем завантаження і, відповідно, більш високою ймовірністю взаємного накладання (суперпозиції) імпульсів.

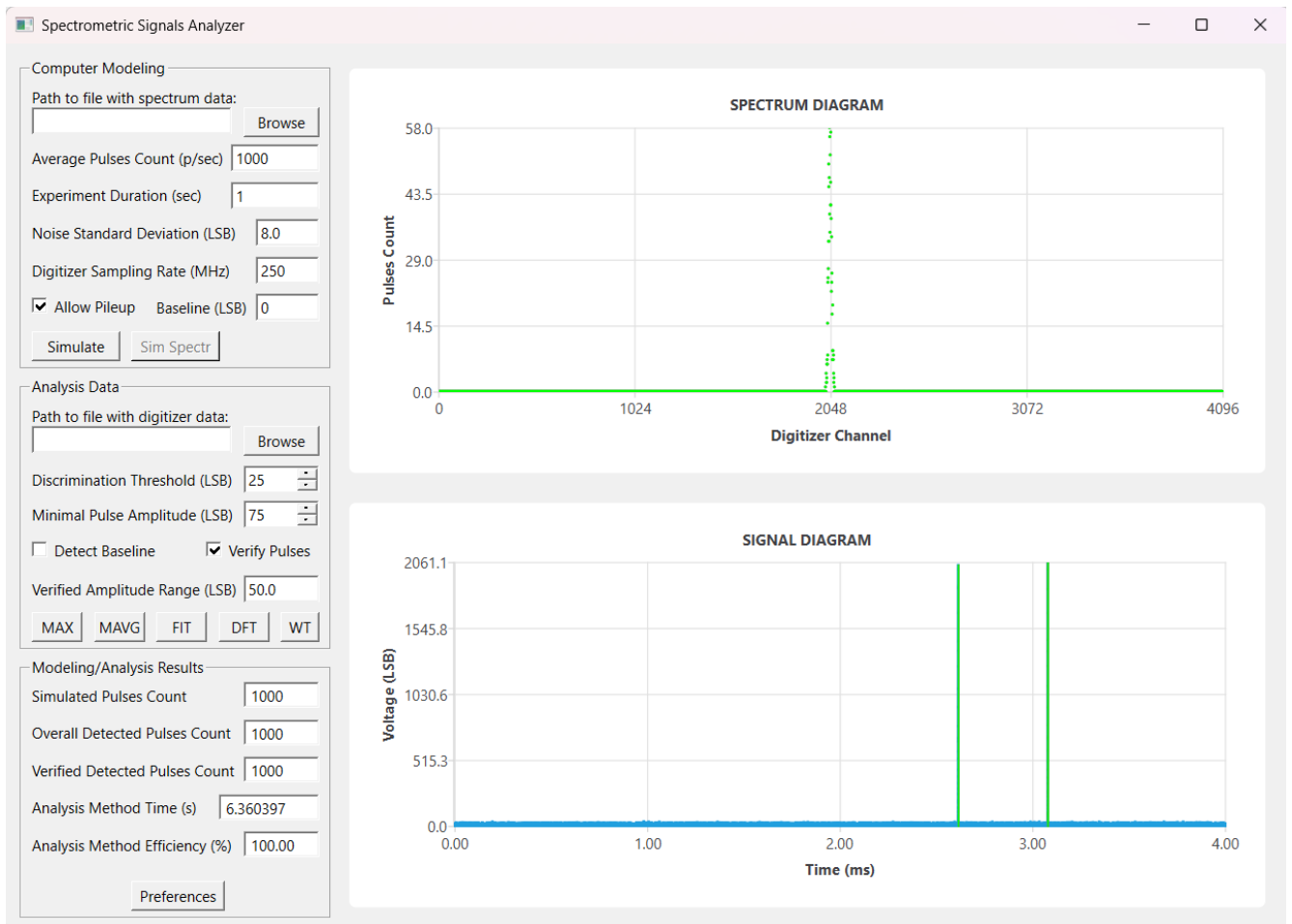


Рис. 3.5. Результати аналізу методом на основі вейвлет-перетворень змодельованого сигналу з рівнем завантаження 10^3 імпульсів за секунду.

Вхідні дані для подальшого комп'ютерного аналізу були симульовані за ще одним сценарієм з наступними параметрами:

- рівень завантаження детектора (інтенсивність генерації імпульсів) – 10^6 імпульсів за секунду;
- тривалість експерименту – 0.1 секунда;
- рівень базової лінії сигналу – 0 LSB;
- середньо-квадратичне відхилення рівня електричного шуму, що накладається на сигнал – 8 LSB;
- частота оцифрування діджитайзером – 250 МГц.

Таким чином, в даному сценарії було згенеровано 100 000 імпульсів.

Результати комп'ютерного аналізу цифрового сигналу, змодельованого з рівнем завантаження 10^6 імпульсів за секунду, розробленими методами приведені на рисунках 3.6 та 3.7 відповідно.

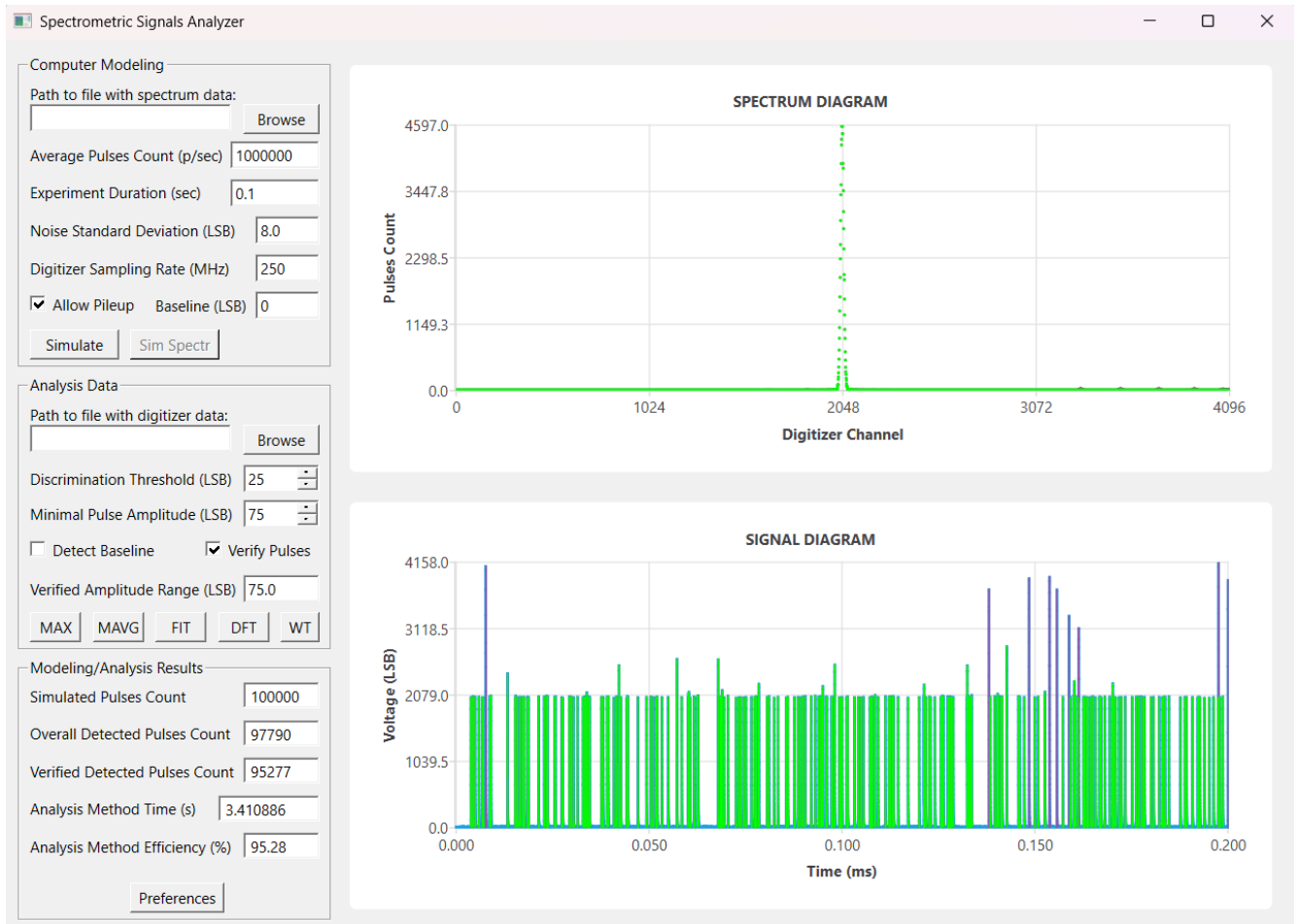


Рис. 3.6. Результати аналізу методом Відстеження змодельованого сигналу при рівні завантаження 10^6 імпульсів за секунду.

На діаграмах візуалізації цифрового сигналу (Signal Diagram) можна побачити, що при такому рівні завантаження присутня суперпозиція імпульсів. Варто відмітити, що переважна більшість імпульсів є розпізнаними і верифікованими (відмічені зеленим кольором), навіть у випадках їх накладання один на одного. Разом з тим, присутні деякі імпульси великої амплітуди, які були розпізнані, але не були верифіковані (відмічені фіолетовим кольором). Такі форми сигналу можуть з'являтися при накладанні двох або більше окремих імпульсів, час появи яких є дуже близьким, і тоді вони формують один імпульс великої

амплітуди. Методи аналізу загалом розпізнають такі імпульси, проте вони не проходять верифікацію, адже насправді не співпадають із згенерованими. В цілому верифікована точність розроблених методів обробки даних при такому сценарії склала близько 95 %.

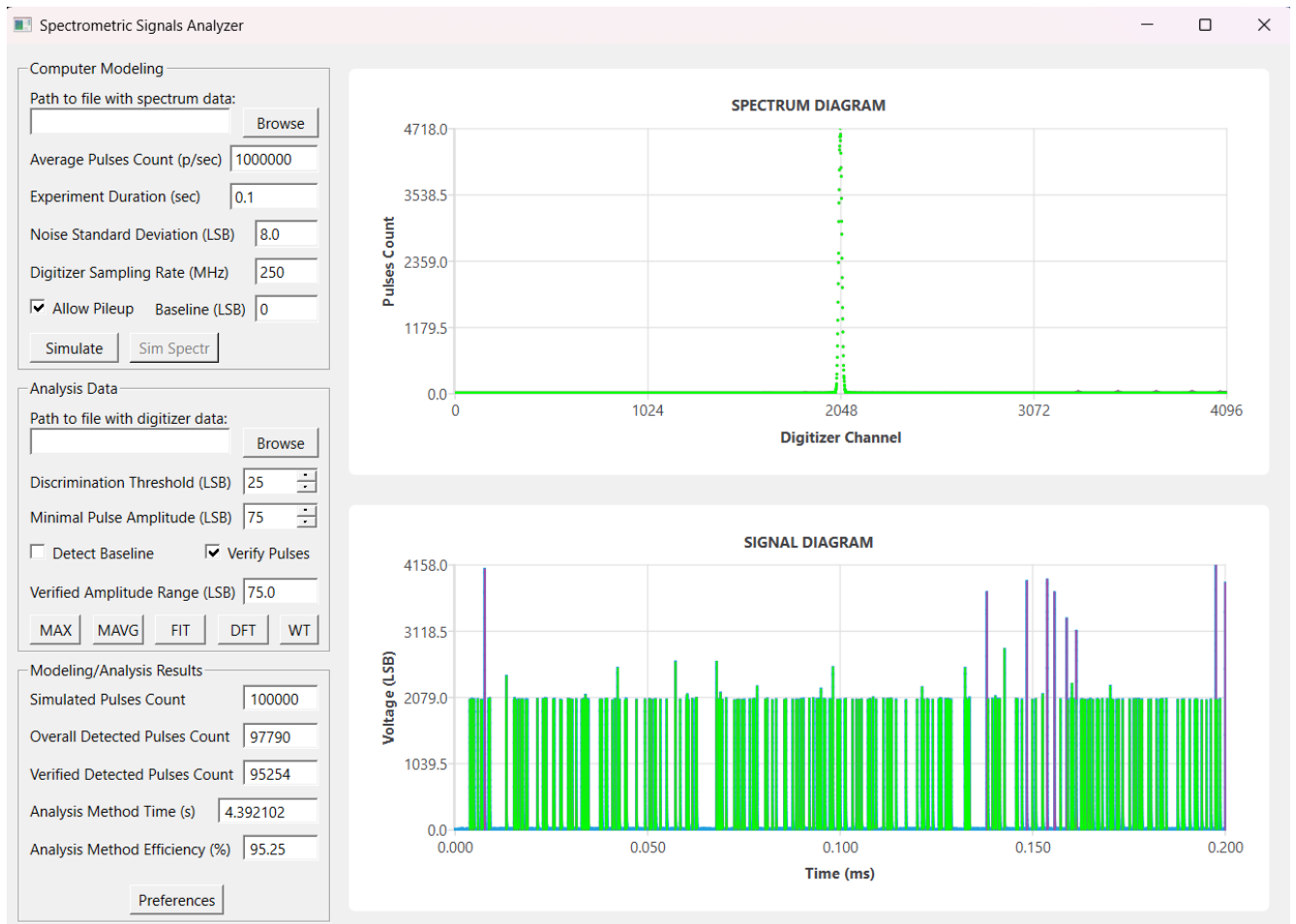


Рис. 3.7. Результати аналізу методом на основі вейвлет-перетворень змодельованого сигналу при рівні завантаження 10^6 імпульсів за секунду.

3.4. Програмна реалізація моделей та методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону

В розробленій програмі було реалізовано моделі та методи комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону, теоретичні основи яких були представлені у розділі 2.3.2. Як зазначалося в попередніх розділах, для симуляції даних, що наближені до реальних експериментів, додаток передбачає можливість завантаження спеціальних файлів-шаблонів, записаних

раніше за допомогою спектрометричної апаратури. Такі шаблони являють собою табличні функції розподілу енергій (амплітуд імпульсів) і представляють різні енергетичні спектри. Також є можливість створювати штучні, ідеалізовані шаблони для більш детального дослідження методів комп'ютерної обробки.

Наприклад, на рисунку 3.8 можна побачити візуалізований спектр випромінювання Cs^{137} з домішками Рb, який побудований на основі завантажених в програму експериментальних даних з файлу-шаблону [67].

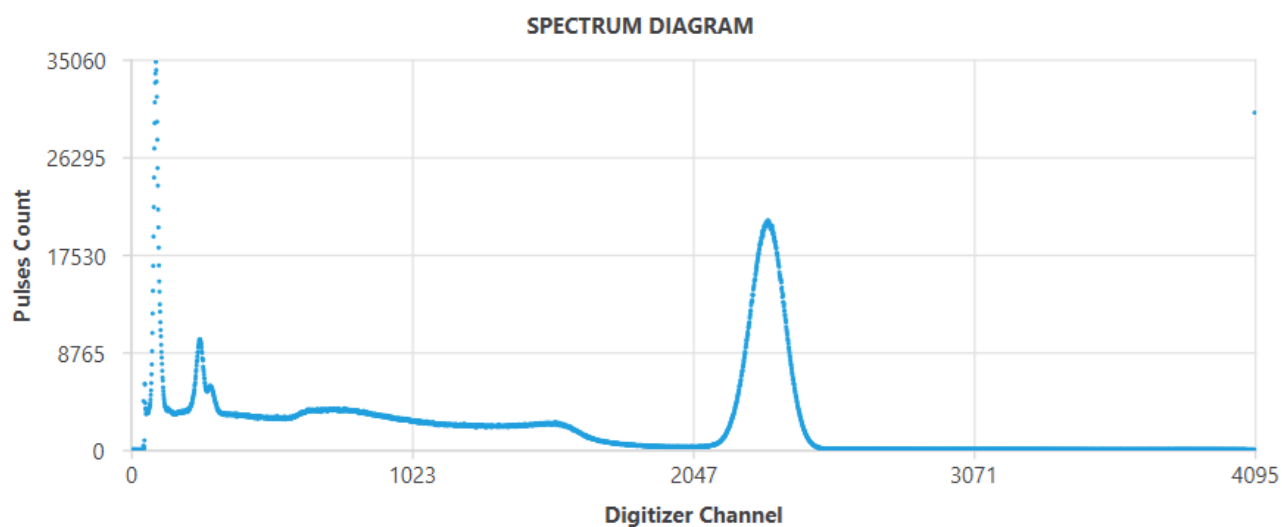


Рис. 3.8 Візуалізація даних завантаженого файлу спектру-шаблону [67].

На осі X виведені номери каналів АЦП (від 0 до 4095), а вісь Y відображає кількість зареєстрованих в цих каналах імпульсів з відповідною амплітудою. Програма також підраховує і виводить загальну кількість зареєстрованих під час експерименту імпульсних сигналів. Наприклад, для завантаженого файлу це значення дорівнює 2 236 424 250. Додаток дозволяє виконувати комп'ютерне моделювання сигналу детектора, який міститиме в собі вказану кількість імпульсів або певну їх частину (50%, 10%, тощо) з випадковим розподілом у часі та розподілом амплітуд, що відповідає саме цьому завантаженому спектру. Для генерації цифрового сигналу можуть використовуватися на вибір, як метод моделювання з використанням відрізків ймовірностей розподілу амплітуд

імпульсів (представлений у розділі 2.3.2.1), так і метод на основі детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд (представлений у розділі 2.3.2.2).

3.4.1. Результати комп'ютерного моделювання методом з використанням відрізків ймовірностей розподілу амплітуд

Спочатку для симуляції спектрометричного сигналу згідно файлу-шаблону з розподілом амплітуд імпульсів як у реального джерела випромінювання Cs^{137} з домішками (показаний на рисунку 3.8) було використано метод моделювання з використанням відрізків ймовірностей розподілу амплітуд. На рисунку 3.9 зображено результат комп'ютерного моделювання цим методом [67] зі встановленим часом експерименту, що відповідає генерації близько 50% загальної кількості імпульсів, передбачених файлом-шаблоном.

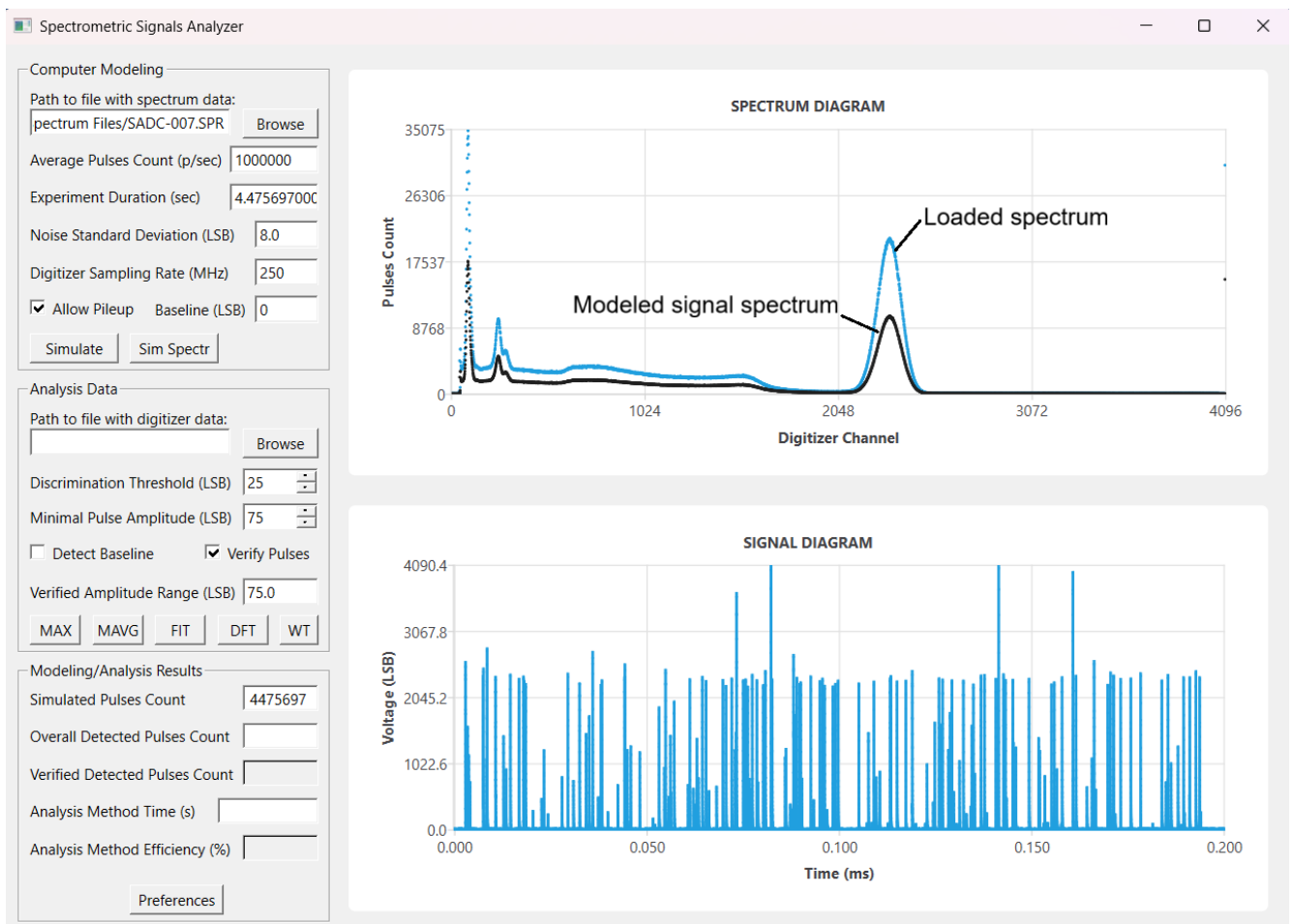


Рис. 3.9. Результат комп'ютерного моделювання 50% імпульсів алгоритмом з використанням відрізків ймовірностей згідно файлу-шаблону з розподілом як у реального джерела випромінювання.

Діаграма спектру (Spectrum Diagram) візуалізує завантажений шаблонний розподіл, а також розподіл амплітуд змодельованих імпульсів. Як бачимо, крива розподілу амплітуд синтезованого сигналу відтворює форму шаблону. Проте ця лінія проходить наполовину нижче, оскільки загальна кількість імпульсів практично зменшена вдвічі. Діаграма сигналу (Signal Diagram) візуалізує лише частину часової діаграми синтезованого сигналу, так як загальна кількість згенерованих імпульсів є дуже великою і становить більше одного мільярда.

Також для додаткового дослідження цього методу було проаналізовано комп'ютерне моделювання згідно штучно створеного лінійного розподілу. Тобто такого випадку розподілу, коли на кожному каналі є однакова кількість зареєстрованих імпульсів і такий завантажений файл-шаблон на діаграмі являє собою рівну горизонтальну лінію. Був підготовлений спеціальний файл з однаковою кількістю зареєстрованих імпульсів на кожному з N каналів рівною 1000. Далі цей файл був завантажений в програмі, і також був запущений процес моделювання з встановленим часом експерименту, щоб змодельовати 50% від загальної кількості імпульсів у завантаженому шаблоні. Результати моделювання згідно лінійного розподілу відображені на рисунку 3.10 [67]. На діаграмі спектру цього рисунку можна побачити, що розподіл амплітуд змодельованих імпульсів не являє собою рівну горизонтальну лінію, а є наближеним до неї в середньому, проте є певні відхилення. Це пояснюється тим, що моделювання амплітуд здійснюється випадковим чином за допомогою генератора випадкових чисел і може мати статистичні відхилення. При збільшенні часу експерименту і, відповідно, кількості імпульсів, що моделюються, розподіл їх амплітуд буде наближатися до лінійного. Тобто, в цілому описаний алгоритм дозволяє моделювати хід реального експерименту. В кожний момент часу розподіл амплітуд імпульсів змодельованого сигналу буде в певній мірі відтворювати завантажений шаблон, а зі збільшенням кількості змодельованих імпульсів (та часу експерименту) — все більше наближатися до завантаженого спектру. Проте для досягнення, наприклад,

повністю лінійного розподілу амплітуд краще використовувати другий метод, результати роботи якого описані у наступному розділі.

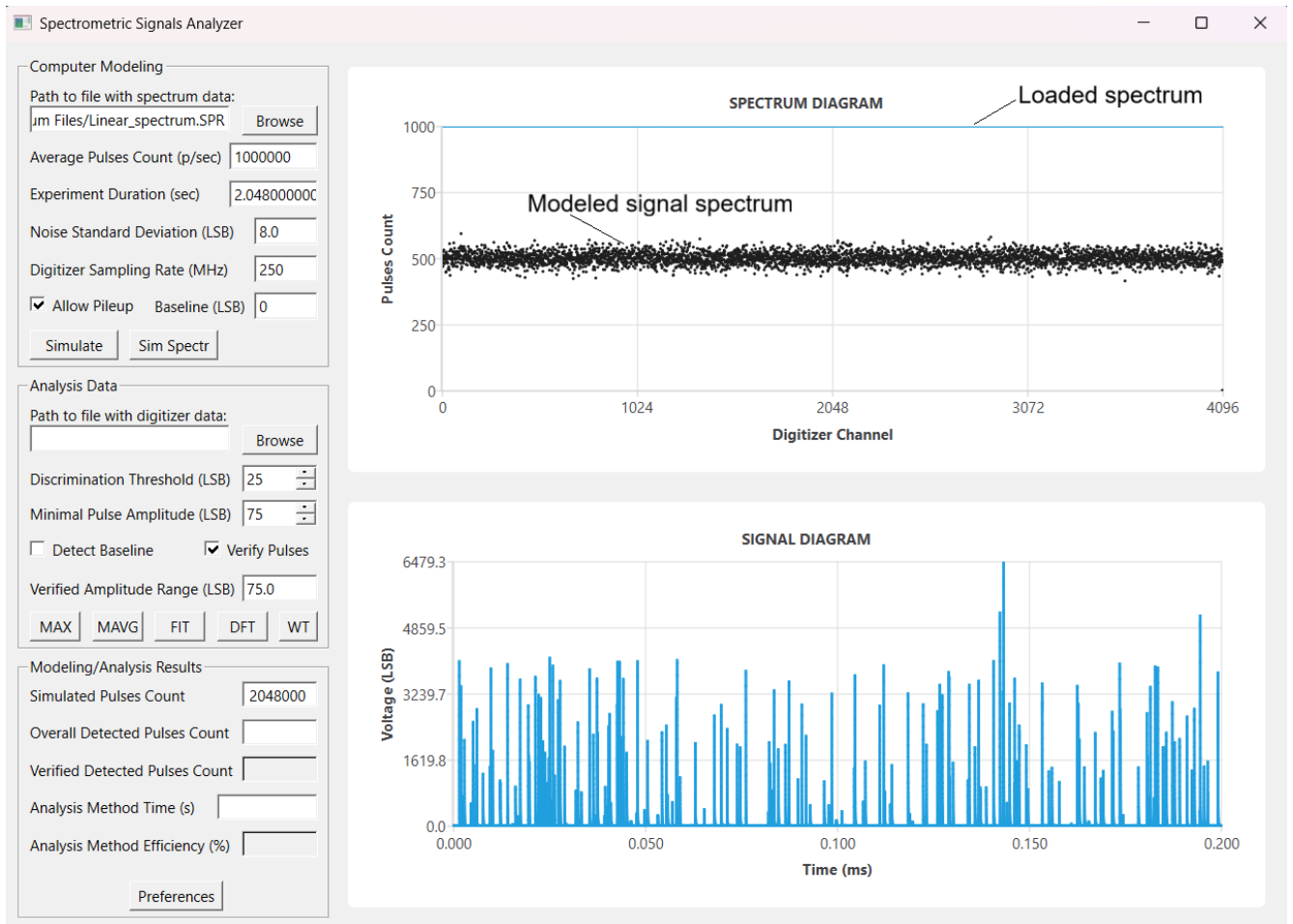


Рис. 3.10. Результат комп'ютерного моделювання 50% імпульсів алгоритмом з використанням відрізків ймовірностей згідно шаблону з лінійним розподілом.

3.4.2. Результати комп'ютерного моделювання методом на основі детермінованих кінцевих значень амплітуд

Також в додатку було виконано комп'ютерне моделювання спектрометричного сигналу згідно описаних вище файлів-шаблонів, застосовуючи запропонований метод моделювання на основі детермінованих кінцевих значень амплітуд (розділ 2.3.2.2). Після симуляції цифрового сигналу згідно файлу-шаблону з розподілом амплітуд імпульсів як у реального джерела випромінювання (Cs^{137} з домішками показаний на рисунку 3.8) було отримані результати і спектр,

які загалом подібні до результатів отриманих при моделюванні попереднім методом з використанням відрізків ймовірностей і були наведені на рисунку 3.9.

Проте при моделюванні образу сигналу згідно файлу-шаблону з лінійним розподілом амплітуд імпульсів було отримано результати, які значно відрізняються від попереднього підходу. На діаграмі спектру рисунку 3.11 показано результуючий розподіл амплітуд імпульсів сигналу, отриманого з використанням даного методу при генерації 50% імпульсів, передбачених шаблоном з лінійним розподілом амплітуд [67]. Як можна побачити на даному рисунку, спектр змодельованих імпульсів є повністю лінійним (на відміну від попереднього методу), без статистичних відхилень і точніше відтворює шаблонний лінійний розподіл.

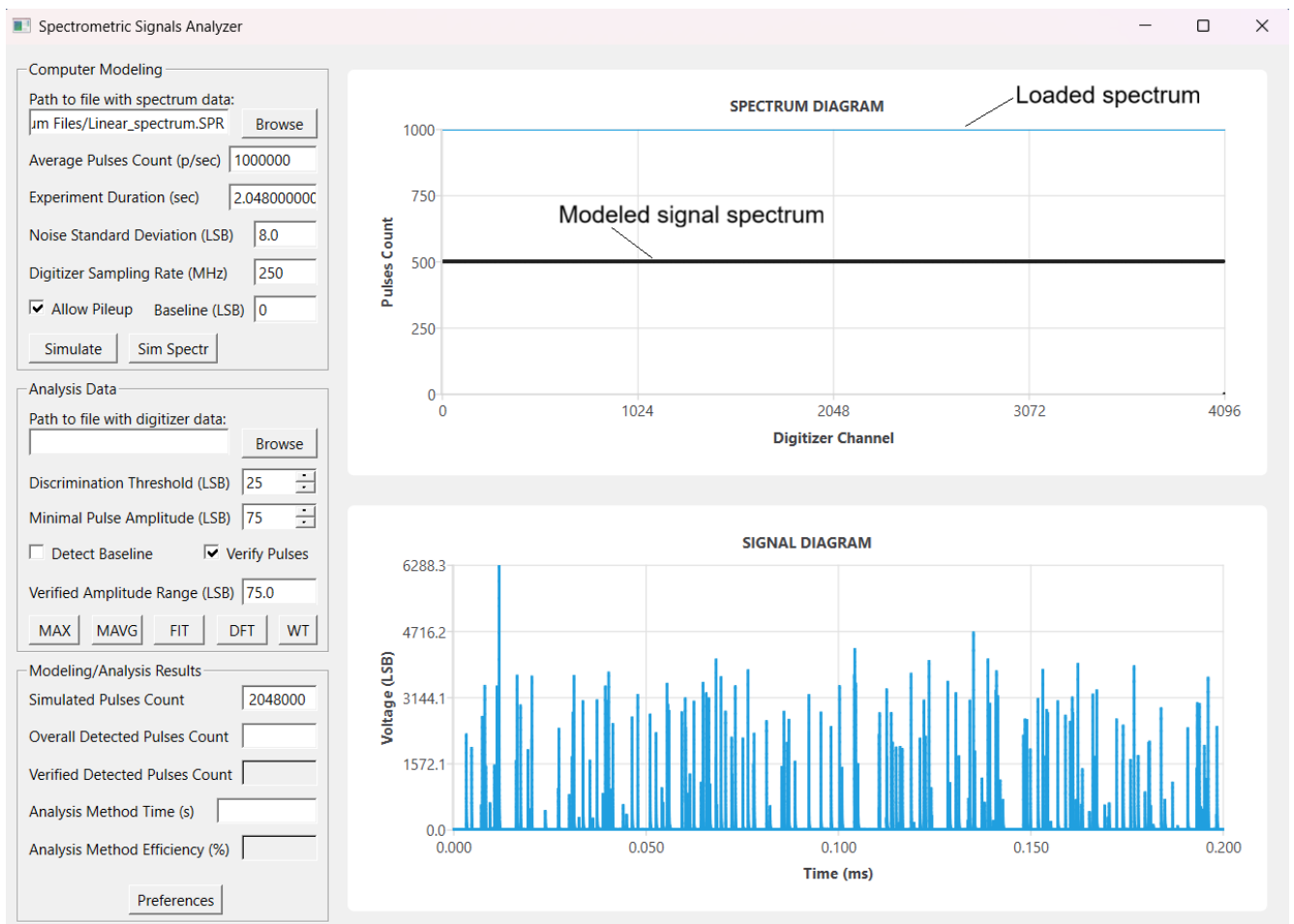


Рис. 3.11. Результат моделювання 50% імпульсів другим методом згідно шаблону з лінійним розподілом амплітуд.

Таким чином, даний підхід моделювання у підсумку не містить статистичних відхилень розподілу і має краще підійти для перевірки роботи комп'ютерних методів аналізу, розпізнавання та вимірювання параметрів спектрометричних сигналів.

3.5. Розробка моделі розподіленої комп'ютерної системи для оцифрування, передачі та аналізу спектрометричних даних

З метою покращення зручності використання та додаткової безпеки користувачів в рамках дослідження була розроблена модель розподіленої комп'ютерної системи для отримання оцифрованих спектрометричних даних, передачі їх по мережі та подальшої комп'ютерної обробки. Така комп'ютерна система дозволяє розділити процес отримання цифрових даних з експериментальних установок і процес аналізу записаних даних для можливості віддаленої обробки та мінімізації контакту з матеріалами джерелами випромінювання. Запропонована модель представлена у вигляді UML діаграмі розміщення компонентів на рисунку 3.12. Наведена UML діаграма містить дві основні розподілені компоненти, які є окремими програмними модулями (процесами), запущеними в операційних системах двох або більше ПК, що можуть знаходитися у різних локаціях:

1. **Програмний модуль (процес) управління експериментом (Experiment Control Process)** – здійснює управління експериментом по отриманню оцифрованих спектрометричних даних з детектора за допомогою діджитайзера (оцифровувача) через порт USB або по шині PCI Express, та за потреби здійснює комунікацію з іншими пристроями через порти вводу виводу (COM, USB). Також цей процес здійснює передачу даних отриманих від апаратних пристроїв по мережі до іншого процесу, що безпосередньо виконує аналіз даних.

2. **Програмний модуль (процес) комп'ютерного аналізу та візуалізації результатів (Data Analysis and Visualization Process)** – отримує дані від першого програмного модулю по мережі, здійснює їх комп'ютерний аналіз за

допомогою розроблених або існуючих методів, побудову спектрів та візуалізацію результатів.

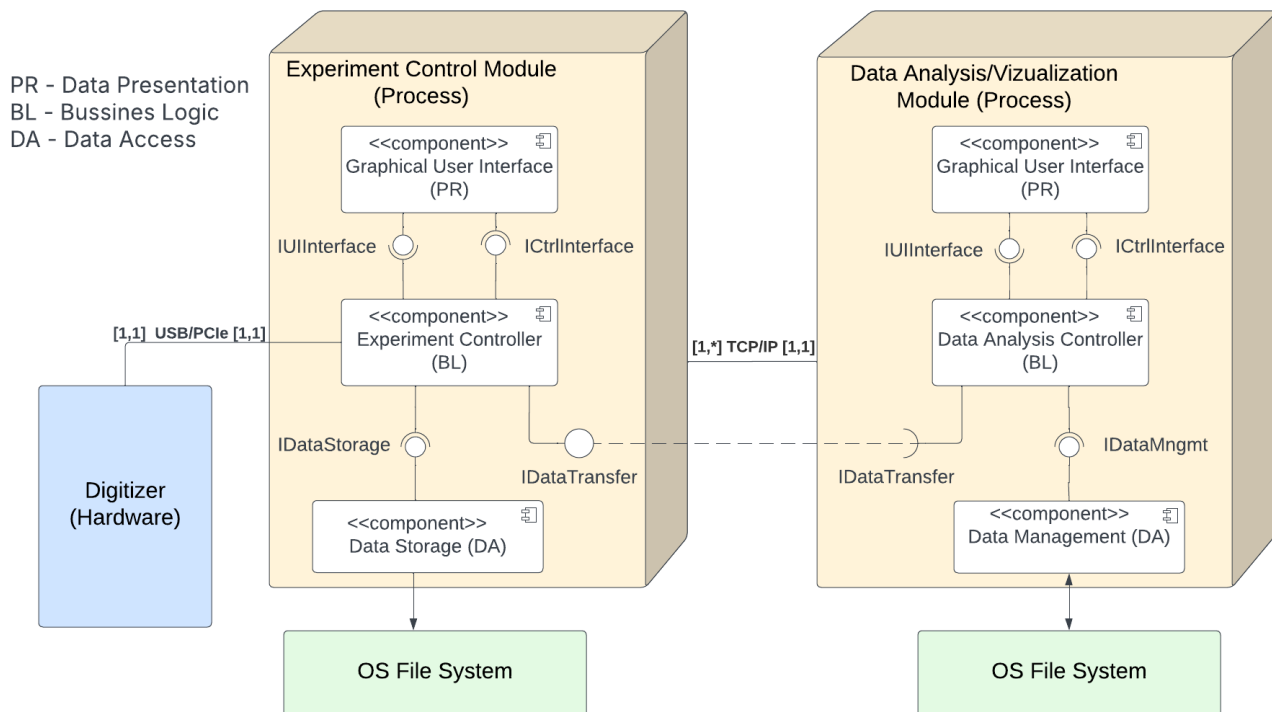


Рис. 3.12. UML діаграма розміщення компонентів розподіленої комп'ютерної системи для обробки спектрометричних даних.

В ході дослідження було реалізовано прототип програмного модулю 1. Для цього було розроблено кросплатформний програмний засіб (Spectrometric Signals Manager) для персональних ПК, який реалізує наступні можливості (без підтримки підключення до пристрою діджитайзера):

- Запуск на операційній системі Windows або Unix-подібній, очікування підключення віддаленого програмного модулю 2 на заданому порті.
- При наявності запиту на підключення - встановлення мережевого з'єднання по протоколу TCP/IP з віддаленим модулем 2.
- Завантаження реальних або змодельованих спектрометричних даних з обраного файлу та передача по мережі підключеному віддаленому модулю для подальшого комп'ютерного аналізу цих даних.

На рисунку 3.13 зображено інтерфейс користувача розробленого програмного засобу. Додаток був розроблений в IDE QT Creator використовуючи бібліотеку QT 6.8.3. Для очікування та встановлення мережових з'єднань з віддаленими модулями, а також передачі даних по мережі в програмному засобі використовувалися класи QTcpServer та QTcpSocket даної бібліотеки.

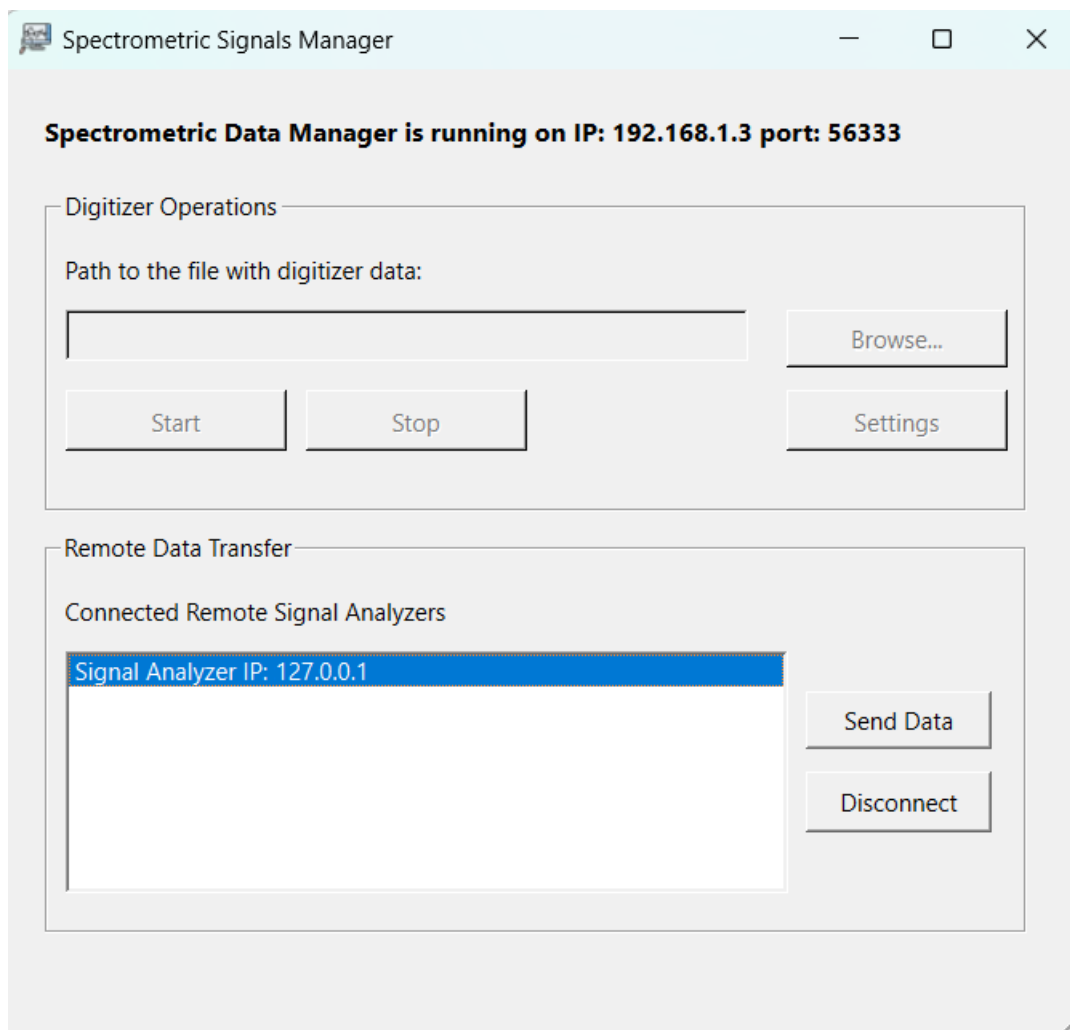


Рис. 3.13. Графічний інтерфейс користувача розробленого програмного засобу (прототипу) для завантаження та передачі спектрометричних даних по мережі.

В свою чергу розроблений додаток для комп'ютерного аналізу спектрометричних даних Spectrometric Signals Analyzer (модуль 2), що був описаний раніше у розділі 3.2, містить елементи для підключення до віддаленого програмного модулю 1 та отримання даних по мережі. Підключення, обмін базовими командами та отримання спектрометричних даних виконується за

допомогою використання функціональних можливостей класу QTcpSocket фреймворку QT.

Висновок до розділу 3

В третьому розділі дисертації насамперед було розглянуто вибір мови програмування та інтегрованого середовища розробки (IDE) для реалізації розроблених методів аналізу та методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів. Беручи до уваги такі основні фактори, як функціональність, кросплатформність, швидкість роботи з пам'яттю та структурами даних, підтримка низькорівневого програмування, було обрано мову програмування C++ з поміж декількох розглянутих варіантів. В якості інтегрованого середовища розробки обрано QT Creator, який пропонує достатній рівень функціональних можливостей та має тісну інтеграцію з фреймворком QT. В ході дослідження було розроблено програмний засіб, що дозволяє комплексно оцінювати та візуалізувати результати роботи методів комп'ютерної обробки спектрометричних сигналів. Додаток реалізує можливість комп'ютерного моделювання цифрових образів сигналів з необхідними параметрами або завантаження даних, що були записані під час реальних експериментів.

Далі було розглянуто програмну реалізацію розроблених методів аналізу спектрометричних сигналів (методу Відстеження та методу з використанням вейвлет-перетворень), роботу яких було перевірено на симульованих даних із заздалегідь відомими параметрами. При перевірці на базових сценаріях і низькій вірогідності накладання імпульсів один на одного, верифікована точність розпізнавання параметрів імпульсів запропонованими методами склала 100%. В сценарії з більш високим рівнем завантаження (10^6 імпульсів за секунду) було отримано значення верифікованої точності розпізнавання імпульсів близько 95%.

Також було наведено результати симуляції, використовуючи моделі та методи моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону, які отримані при проведенні чисельних експериментів за допомогою розробленої

комп'ютерної програми. Показано, що при моделюванні методом з використанням відрізків ймовірностей результуючий спектр містив статистичні відхилення, однак функція розподілу амплітуд в цілому відповідала табличній функції, вказаній у шаблоні. Другий підхід, що базується на використанні детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд імпульсів, дозволив отримати точний цифровий образ сигналу, що не містив статистичних відхилень від шаблону.

Наприкінці було представлено модель розподіленої комп'ютерної системи для отримання, передачі по мережі та комп'ютерного аналізу спектрометричних даних.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [3, 5, 8].

РОЗДІЛ 4 ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

4.1. Оцінка точності та швидкодії розробленого методу аналізу під назвою Відстеження на змодельованих даних та порівняння з існуючими методами

З метою порівняння точності та швидкодії роботи розробленого методу Відстеження і вже відомих методів спектрального аналізу, в ході дослідження було програмно реалізовано два існуючі методи (Максимуму та Підбору), а також отримано метрики роботи нового та існуючих методів на змодельованих даних. Метод Максимуму є одним з найпростіших та швидких, а метод Підбору продемонстрував одні з найкращих результатів аналізу на симульованих даних в попередніх дослідженнях. Для реалізації такої комплексної перевірки були змодельовані цифрові вхідні дані згідно підготовленого файлу-шаблону, здійснено запуски кожного з описаних методів, програмно обчислено тривалість їх роботи і отримано висновки про точність розпізнавання за допомогою механізму верифікації згенерованих та розпізнаних імпульсів. Для кожного з методів аналізу було виведено інформацію про тривалість його роботи, загальну і верифіковану точність методу. Під час даної перевірки можливий діапазон відхилення по амплітуді в алгоритмі верифікації був встановлений рівним трикратному максимальному значенню рівня електричного шуму. Заміри проводилися на комп'ютері з процесором Intel Core i7 1185G7 @ 3.00 GHz, 16 Gb RAM, Windows 11 Pro (США).

4.1.1. Створення еталонних вхідних даних для комп'ютерного аналізу

Для перевірки ефективності роботи методів спектрометричного аналізу насамперед необхідно було створити еталонні вхідні дані з повністю відомими параметрами. Такі дані були створені шляхом комп'ютерного моделювання цифрового імпульсного сигналу на основі спеціально підготовленого файлу-

шаблону зі штучним ідеалізованим лінійним спектром. Форма змодельованих імпульсів відповідала імпульсам, отриманим при реєстрації гамма-квантів у сцинтиляційному детекторі. Для цього були використані вдосконалені математичні моделі та алгоритми моделювання описані у розділі 2.3.2.2. Симуляція на основі файлу-шаблону з лінійним спектром дозволила змодельовати сигнал, який містить однакову кількість імпульсів (по 100 на канал) зі значеннями амплітуд від 1024 LSB до 4095 LSB. Таким чином на спектральній діаграмі даний розподіл виглядає як ступінчата функція, що показана на рис. 4.1, а. На осі X виведені номери каналів АЦП (від 0 до 5120), а вісь Y відображає кількість зареєстрованих в цих каналах імпульсів з відповідною амплітудою. Електричний шум, накладений на сигнал, був змодельований згідно нормального розподілу з параметром математичного очікування рівним нулю та середнім квадратичним відхиленням рівним восьми значенням наймолодшого розряду діджитайзера (LSB). Рівень базової лінії сигналу був встановлений рівним нулю. На рис. 4.1, б зображено діаграму, що візуалізує незначну частину змодельованого цифрового сигналу, адже загальна кількість імпульсів є досить великою. Але, як видно з рисунку, в цьому інтервалі з'явилися окремі сигнали, амплітуда яких перевищує значення 4095 LSB. Вони утворилися за рахунок взаємного накладання двох або більшої кількості імпульсів, періоди існування яких частково або повністю співпадають.

Заміри точності та швидкодії методів аналізу проводилися за трьома сценаріями на різних масивах даних, симульованих з наступними параметрами:

1. Рівень завантаження детектора (інтенсивність генерації імпульсів) — 10^5 імпульсів за секунду, тривалість експерименту — 3.072 секунди, загальна кількість змодельованих імпульсів — 307200.

2. Рівень завантаження детектора — 10^6 імпульсів за секунду, тривалість експерименту — 0.3072 секунди, загальна кількість змодельованих імпульсів — 307200.

3. Рівень завантаження детектора — 10^7 імпульсів за секунду, тривалість експерименту — 0.03072 секунди, кількість змодельованих імпульсів — 307200.

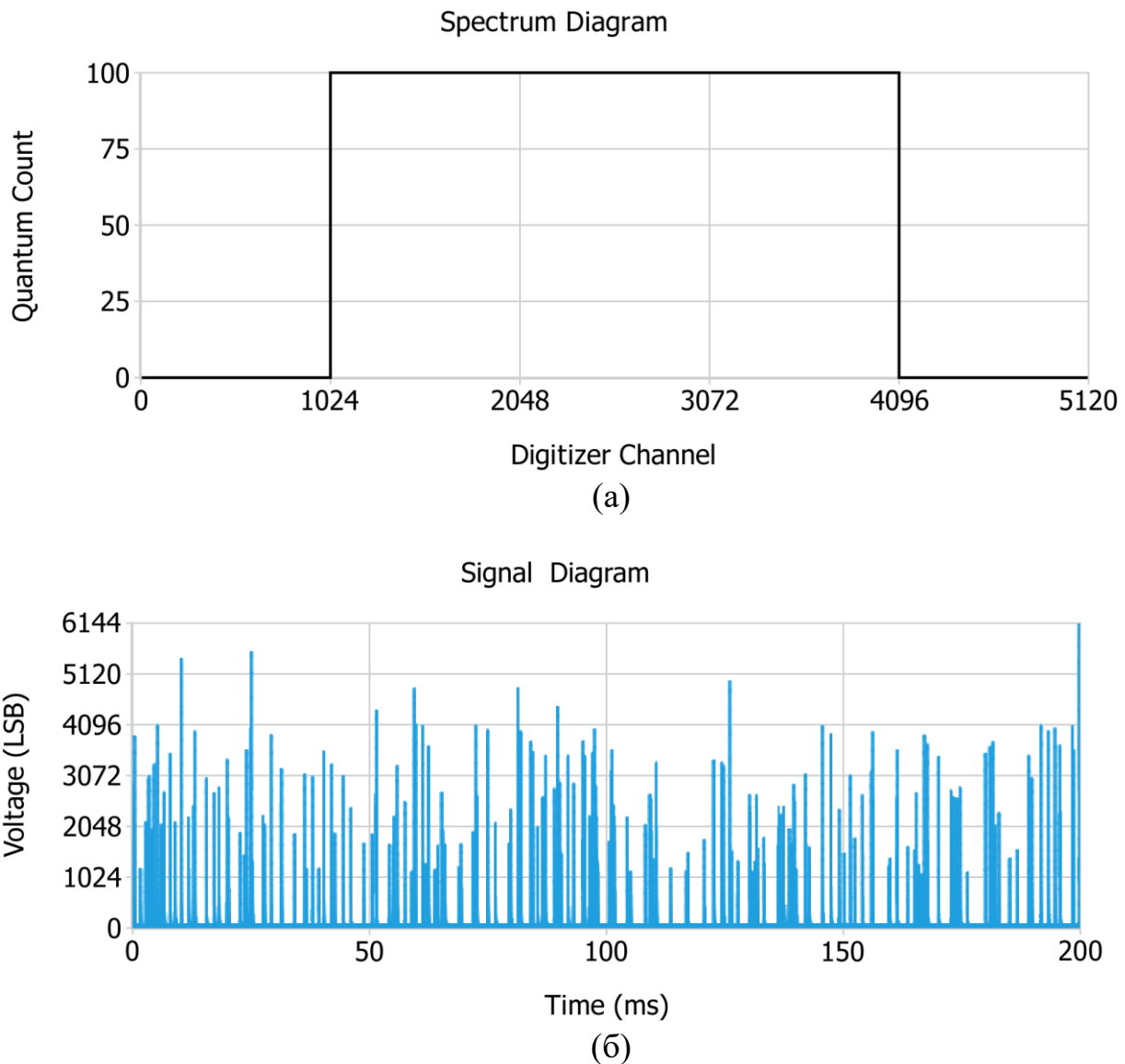
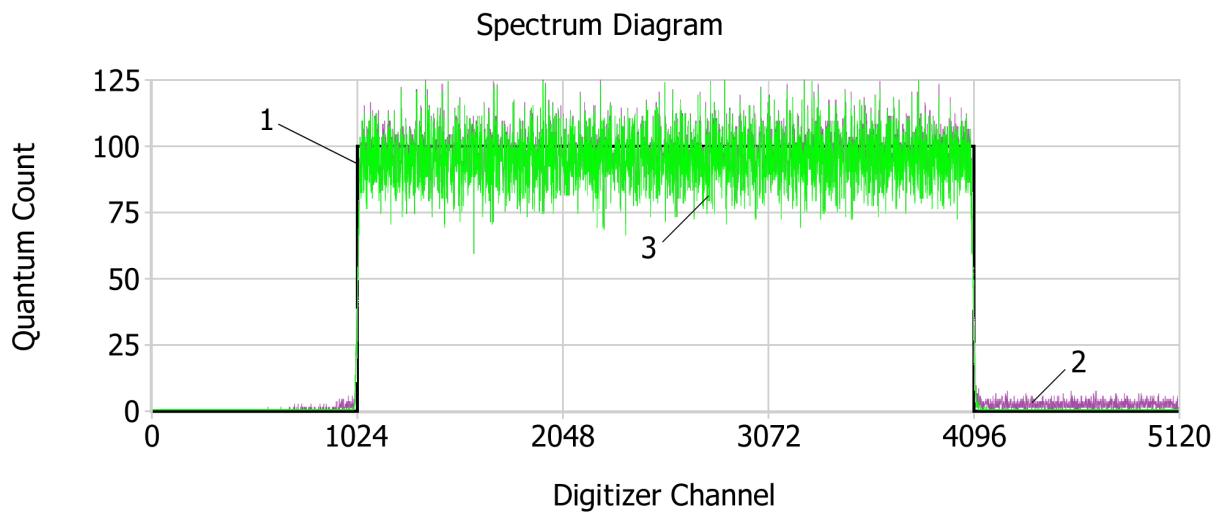
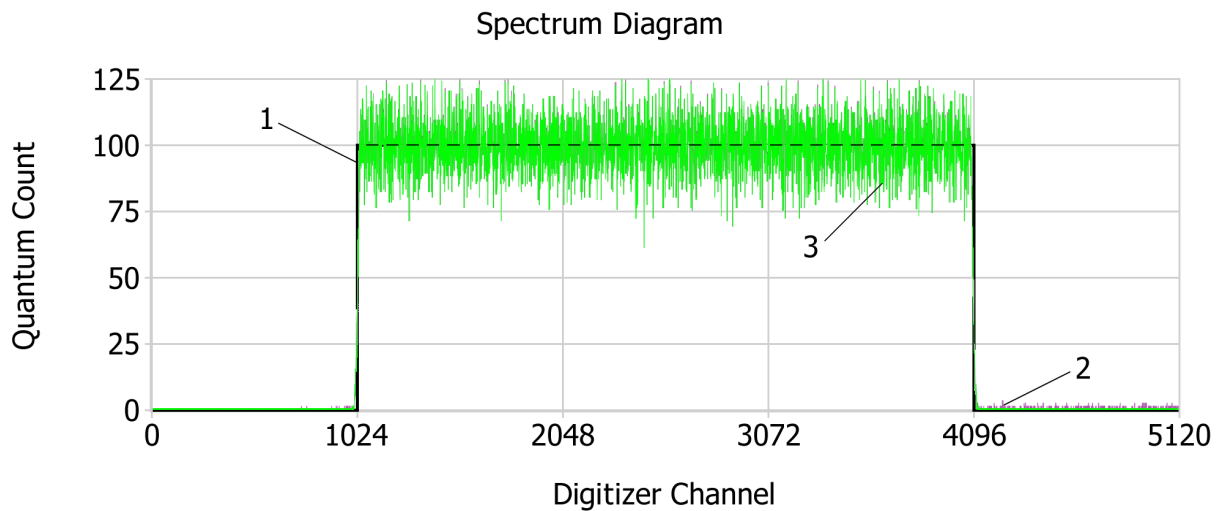


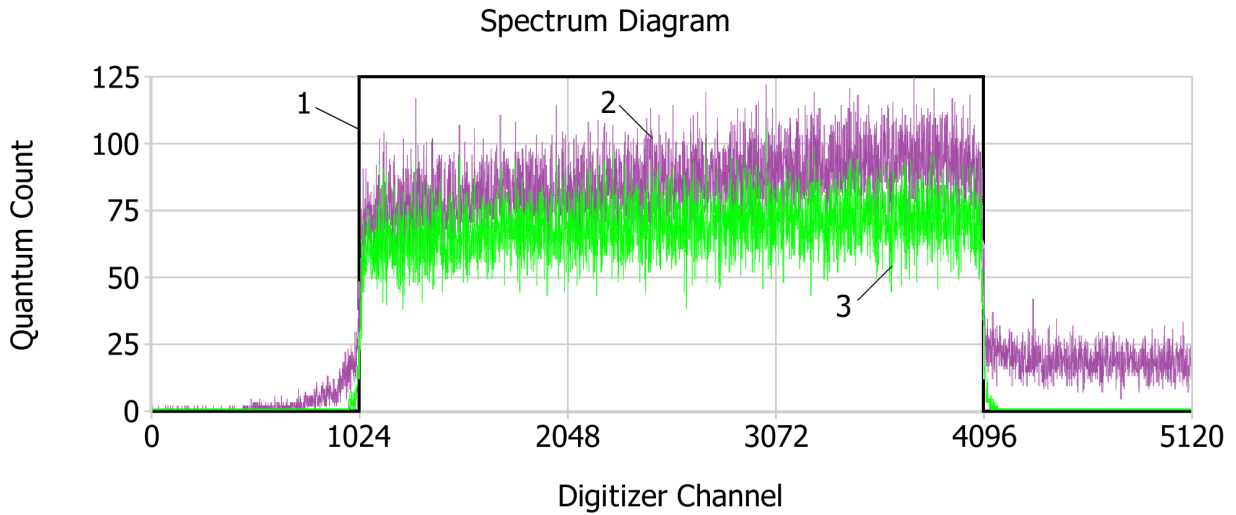
Рис. 4.1. Моделювання згідно файлу-шаблону з лінійним спектром: а – розподіл амплітуд імпульсів; б – частина змодельованого цифрового сигналу [14].

4.1.2. Отримання підсумкових метрик ефективності розглянутих методів

Після запуску нового та існуючих методів для аналізу сигналів, симульованих згідно лінійного шаблону (рис. 4.1, а), були отримані та програмно візуалізовані діаграми функцій розподілу амплітуд імпульсів. Дані діаграми показують розподіл амплітуд змодельованих, розпізнаних та верифікованих імпульсів при різних

рівнях завантаження. На рисунку 4.2 наведені результати аналізу **розробленим методом Відстеження** при рівнях завантаження 10^5 (рис. 4.2, а), 10^6 (рис. 4.2, б), 10^7 (рис. 4.2, в) імпульсів за секунду [14]. Діаграми розподілу амплітуд імпульсів, розпізнаних за допомогою розробленого методу, відображають незначне відхилення від лінії розподілу змодельованих імпульсів при рівні завантаження 10^5 (рис. 4.2, а), а також при рівні 10^6 (рис. 4.2, б) імпульсів за секунду. Обчислена верифікована точність розпізнавання для цих сценаріїв склала 99.52 % та 94.95 % відповідно. При рівні завантаження 10^7 (рис. 4.2, в) імпульсів за секунду відхилення є суттєвим, а точність аналізу склала 54.26 %.

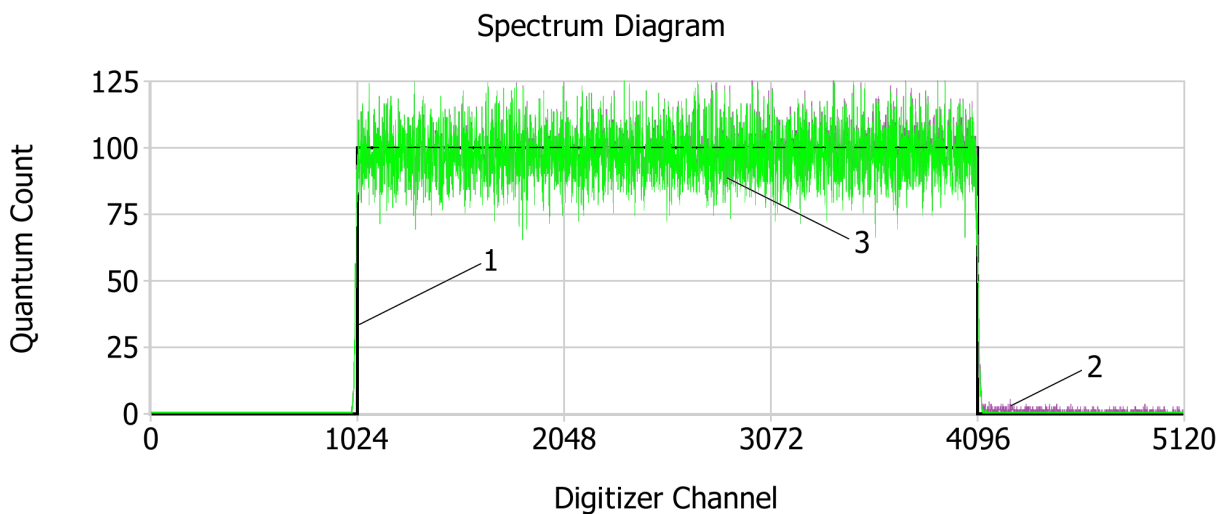




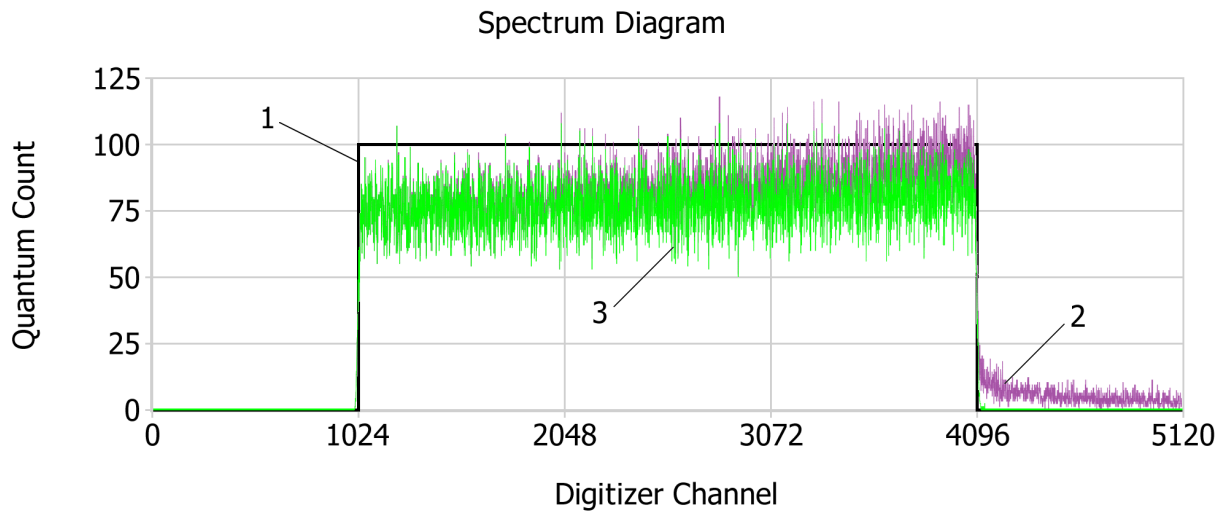
(B)

Рис. 4.2. Діаграми розподілу амплітуд: 1 – змодельованих; 2 – розпізнаних; 3 – верифікованих імпульсів, що отримані розробленим методом Відстеження при рівнях завантаження (імпульсів за секунду): а – 10^5 ; б – 10^6 ; в – 10^7 .

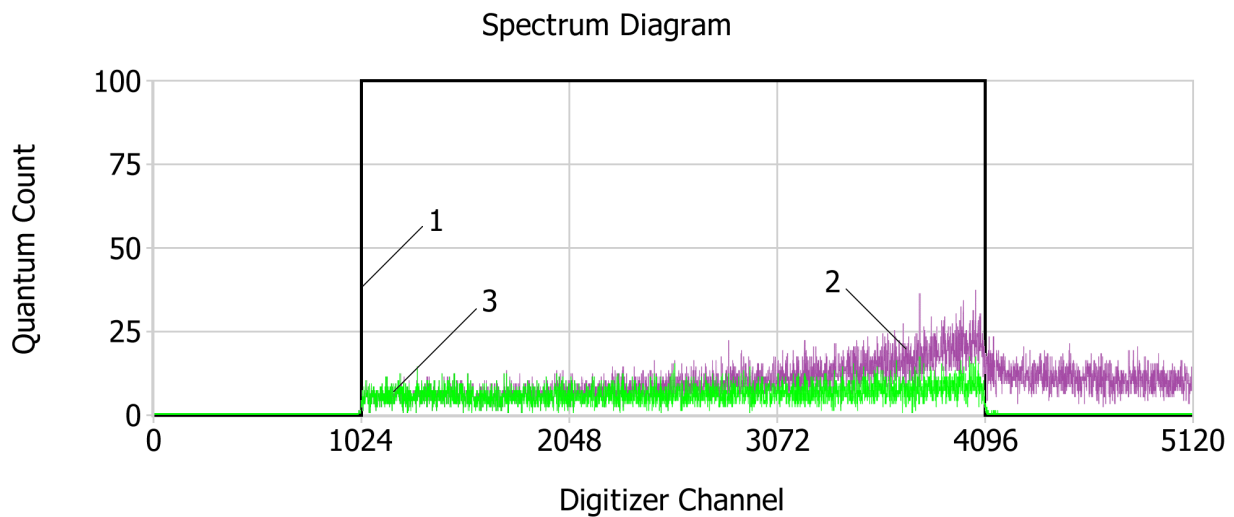
Візуалізація результатів роботи існуючого методу Максимумів (діаграми розподілу амплітуд змодельованих та розпізнаних імпульсів при різних рівнях завантаження) наведена на рис. 4.3 [14]. Як можна побачити з діаграми на рис. 4.3, а, розподіл амплітуд імпульсів, розпізнаних методом Максимумів, показав відносно невелике відхилення від горизонтальної лінії розподілу при рівні завантаження 10^5 імпульсів за секунду. Програмно обчислена верифікована точність розпізнавання в даному випадку склала 97.57 %.



(a)



(б)

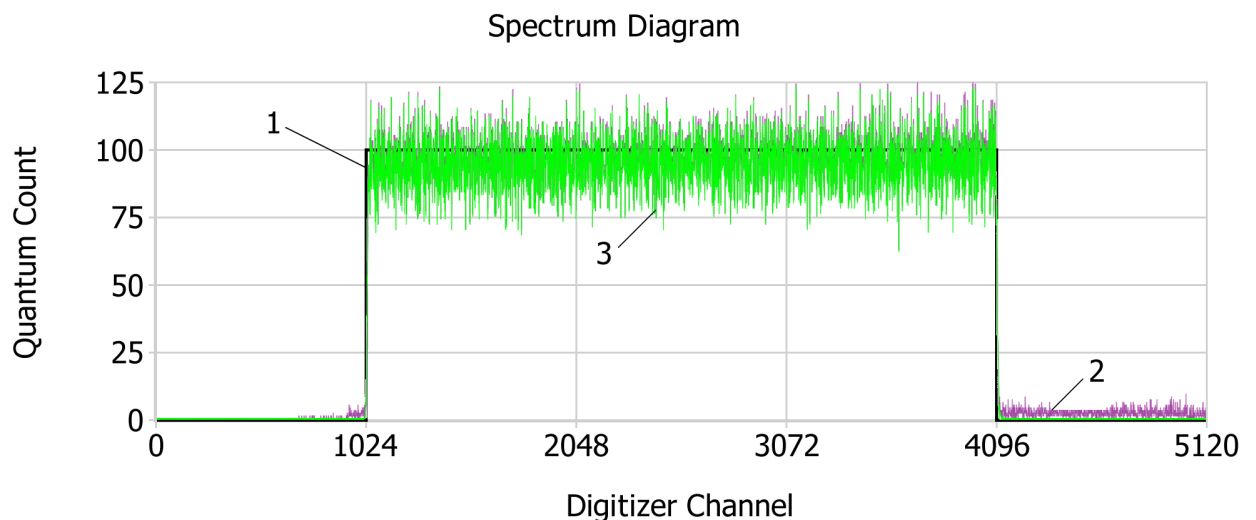
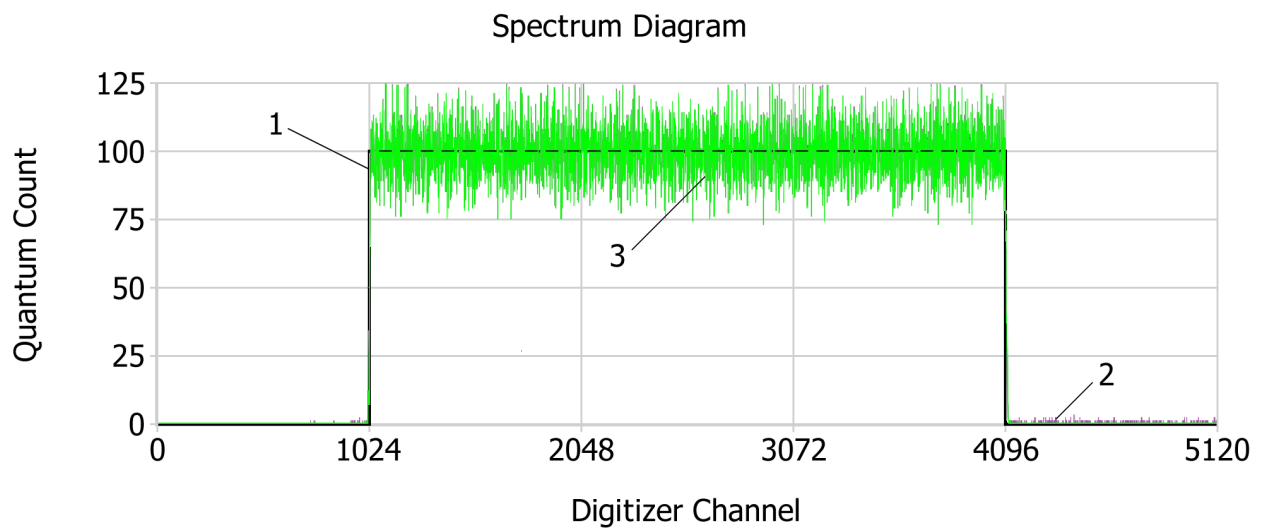


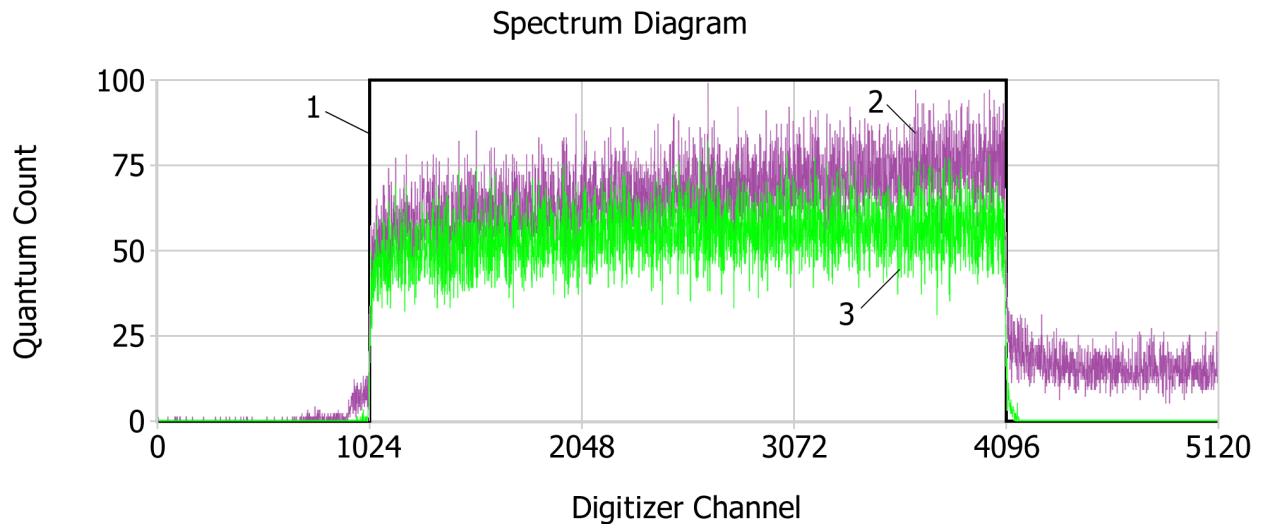
(в)

Рис. 4.3. Діаграми розподілу амплітуд: 1 – змодельованих; 2 – розпізнаних; 3 – верифікованих імпульсів, що отримані методом Максимумів при рівнях завантаження (імпульсів за секунду): а – 10^5 ; б – 10^6 ; в – 10^7 .

Проте при більш високих рівнях завантаження (діаграми на рис. 4.3, б, в) відхилення від ідеалізованої лінії розподілу стає значним. У випадку аналізу даних, симульованих з рівнем завантаження 10^6 імпульсів за секунду, верифікована точність розпізнавання знизилася до 77.77 %, а при завантаженні 10^7 — склала всього 5.98 %.

Метод Підбору виконує більш складну обробку та дозволяє розрізнити накладені імпульси. На рисунку 4.4 наводяться діаграми розподілу амплітуд змодельованих, розпізнаних та верифікованих даним методом імпульсів при різних рівнях завантаження [14]. Загалом діаграми розподілу амплітуд імпульсів, розпізнаних методом Підбору (рис. 4.4, а, б, в), візуально подібні до тих, що були отримані в результаті аналізу новим методом Відстеження. Проте верифікована точність розпізнавання є дещо нижчою і становила: 99.47 % у випадку рівня завантаження 10^5 імпульсів за секунду, 94.79 % при рівні завантаження 10^6 , 53.82 % — при рівні 10^7 .





(в)

Рис. 4.4. Діаграми розподілу амплітуд: 1 – змодельованих; 2 – розпізнаних; 3 – верифікованих імпульсів, що отримані методом Підбору при рівнях завантаження (імпульсів за секунду): а – 10^5 ; б – 10^6 ; в – 10^7 .

Підсумкові порівняльні характеристики роботи нового та існуючих розглянутих методів розпізнавання наведені в табл. 4.1–4.3 [14]. Дані таблиці містять програмно обчислені та виведені результати роботи описаних методів аналізу на вхідних даних, симульованих за трьома сценаріями з різними рівнями завантаження та тривалістю експериментів, що були детально описані у попередньому розділі.

Таблиця 4.1.

Результати роботи методів аналізу на вхідних даних змодельованих з рівнем завантаження 10^5 імпульсів за секунду.

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимумів	307200	302519	299739	1.616	97.57
Підбору	307200	306460	305583	8.193	99.47
Відстеження (новий)	307200	306546	305739	41.629	99.52

Таблиця 4.2.

Результати роботи методів аналізу на вхідних даних змодельованих з рівнем завантаження 10^6 імпульсів за секунду.

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимумів	307200	263108	238907	0.245	77.77
Підбору	307200	299983	291192	3.246	94.79
Відстеження (новий)	307200	300408	291693	6.965	94.95

Таблиця 4.3.

Результати роботи методів аналізу на вхідних даних змодельованих з рівнем завантаження 10^7 імпульсів за секунду.

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимумів	307200	61284	18381	0.061	5.98
Підбору	307200	244711	165350	6.791	53.82
Відстеження (новий)	307200	248356	166701	1.124	54.26

Варто відмітити, що розроблений метод Відстеження продемонстрував кращу верифіковану точність розпізнавання у порівнянні з розглянутими існуючими методами в усіх трьох сценаріях, які досліджувалися. Окрім цього, таблиці 4.1–4.3 містять також інформацію про час обробки даних. Тривалість аналізу простим методом Максимумів, очікувано, була найменшою. Метод Підбору показав кращу швидкість роботи, ніж розроблений метод, на даних змодельованих з параметром завантаження 10^5 та 10^6 імпульсів за секунду (табл. 4.1, 4.2), проте новий метод спрацював швидше при завантаженні 10^7 імпульсів за секунду (табл. 4.3).

Як можна побачити з діаграм на рис. 4.2, 4.3, 4.4, а, та порівняльних результатів роботи методів аналізу наведених у табл. 4.1, розроблений та

розглянуті відомі методи показали досить високу точність розпізнавання при рівні завантаження 10^5 імпульсів за секунду. Це пояснюється відносно невеликою ймовірністю накладання імпульсів в такому сценарії.

Особливістю нового розробленого методу, у порівнянні з деякими відомими [16], є спосіб фільтрації сигналу від шуму без суттєвої модифікації корисної складової. Також на відміну від існуючих простих методів аналізу (Максимумів, Сум), розроблений метод Відстеження, як і метод Підбору, здатен краще аналізувати імпульси при відносно частому накладанні. Адже в процесі визначення рівня їх амплітуд цей метод обробки реалізує механізм врахування впливу значення сигналу спадаючої компоненти попередніх імпульсів. Тому на діаграмах розподілу амплітуд при рівні завантаження 10^6 , наведених на рис. 4.3, б, новий метод демонструє менше відхилення від лінійного розподілу і досить високу точність розпізнавання (табл. 4.2). У випадку завантаження 10^7 верифікована точність методу Відстеження знизилася до 54.26 % (табл. 4.3). Такий результат пояснюється тим, що при даному рівні завантаження сильно зростає ймовірність накладання імпульсів, і часто два чи більше з них накладаються таким чином, що формують один імпульс з великою амплітудою. В підсумку, порівняльні результати, наведені в табл. 4.1–4.3, свідчать про те, що розроблений метод дозволив підвищити точність розпізнавання у розглянутих сценаріях.

4.2. Перевірка точності та швидкодії розробленого методу аналізу на основі дискретних вейвлет-перетворень у порівнянні з існуючими підходами

По аналогії з попереднім розділом верифіковану точність та швидкодію роботи розробленого методу з використанням дискретних вейвлет-перетворень було перевірено на змодельованих даних. Проте розподіл амплітуд згенерованих імпульсів відрізнявся від шаблонного розподілу, що використовувався в розділі 4.1. Також на тих самих наборах симульованих даних було отримано метрики

роботи існуючих методів комп'ютерної обробки — Максимуму та Підбору з метою порівняльного аналізу.

4.2.1. Моделювання еталонних вхідних даних для методів аналізу

Еталонні вхідні дані для подальшого комп'ютерного аналізу були створені за допомогою комп'ютерного моделювання на основі підготовленого файлу-шаблону зі штучним спектром, який містив декілька спектральних ліній. Даний шаблон містив загалом 450000 зареєстрованих імпульсів, з яких 150000 імпульсів мають амплітуду 1024 LSB, 150000 — амплітуду 2048 LSB, 150000 — амплітуду 3072 LSB. Тобто, при візуалізації на діаграмі спектру такий розподіл містить 3 спектральні лінії, як показано на рисунку 4.5 [61]. Для моделювання цифрового образу сигналу були також використані математичні моделі та методи моделювання спектрометричних сигналів, представлені в розділі 2.3.2.2.

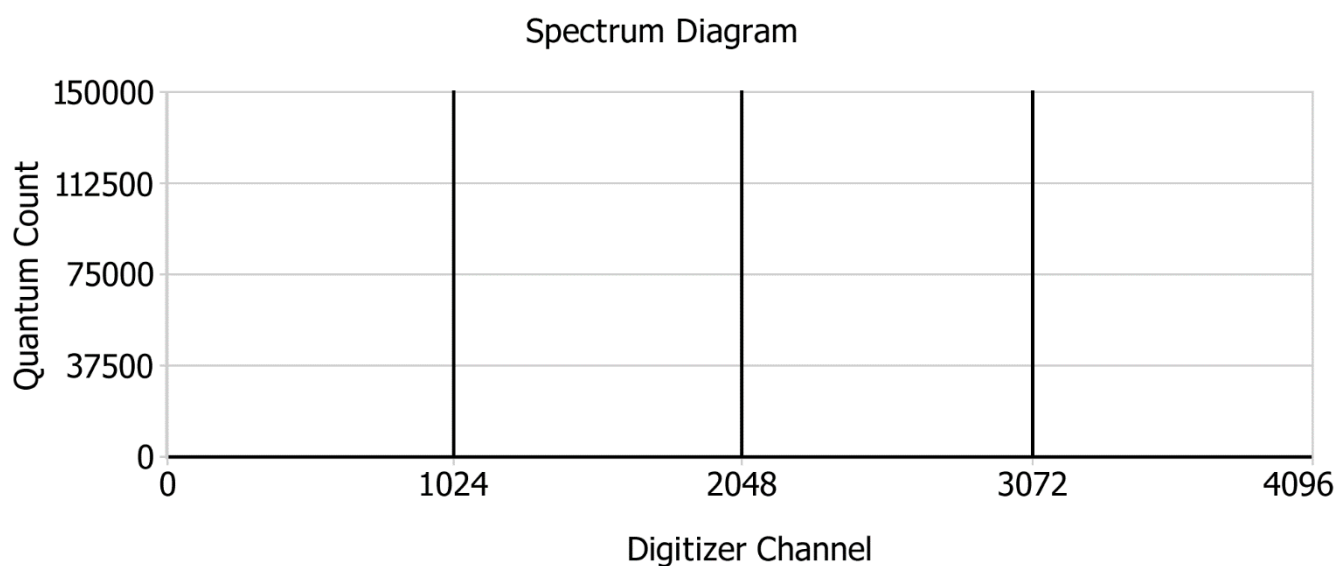


Рис. 4.5. Візуалізований розподіл амплітуд імпульсів, змодельованих згідно файлу-шаблону зі штучним спектром з трьома спектральними лініями.

З метою комплексної перевірки роботи розробленого та існуючих методів аналізу були змодельовані цифрові вхідні дані згідно вищезазначеного файлу-шаблону за трьома сценаріями з наступними параметрами:

1. Рівень завантаження детектора (інтенсивність генерації імпульсів) — 10^5 імпульсів за секунду, тривалість експерименту — 4.5 секунди, загальна кількість змодельованих імпульсів — 450000.

2. Рівень завантаження детектора — 10^6 імпульсів за секунду, тривалість експерименту — 0.45 секунди, загальна кількість змодельованих імпульсів — 450000.

3. Рівень завантаження детектора — 10^7 імпульсів за секунду, тривалість експерименту — 0.045 секунди, загальна кількість змодельованих імпульсів — 450000.

Рівень базової лінії був встановлений рівним нулю. Електричний шум, накладений на сигнал, був змодельований згідно нормального розподілу з параметром математичного очікування рівним нулю та середнім квадратичним відхиленням рівним восьми значенням наймолодшого розряду діджитайзера (LSB).

4.2.2. Оцінка точності та швидкодії досліджених методів

Після цього на змодельованих масивах даних було здійснено запуск розробленого методу аналізу на основі вейвлет-перетворень та існуючих методів Максимуму і Підбору для отримання метрик їх ефективності. Для перевірки точності розпізнавання було використано алгоритм верифікації з встановленим можливим діапазоном відхилення по амплітуді рівним трикратному максимальному значенню рівня електричного шуму. Заміри проводилися на комп'ютері з процесором Intel Core Ultra 7 165U @ 1.7 GHz, 32 Gb RAM, Windows 11 Pro (США).

Порівняльні результати комп'ютерної обробки змодельованих даних вищезазначеними методами аналізу наведені в таблицях 4.4-4.6 [61]. Як можна побачити з таблиць 4.4-4.6 розроблений метод з використанням вейвлет-перетворень продемонстрував кращу верифіковану точність розпізнавання у порівнянні з розглянутими існуючими підходами (Максимуму та Підбору) в усіх трьох сценаріях, які були досліджені.

Таблиця 4.4.

Результати роботи методів аналізу на вхідних даних змодельованих з рівнем завантаження 10^5 імпульсів за секунду.

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимуму	450000	443449	439601	5.099	97.69
Підбору	450000	448911	447621	10.783	99.47
Вейвлет метод (новий)	450000	448988	447745	45.835	99.50

Таблиця 4.5.

Результати роботи методів аналізу на вхідних даних змодельованих з рівнем завантаження 10^6 імпульсів за секунду.

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимуму	450000	387767	354137	0.925	78.70
Підбору	450000	439218	426119	4.067	94.69
Вейвлет метод (новий)	450000	439854	426971	7.597	94.88

Таблиця 4.6.

Результати роботи методів аналізу на вхідних даних змодельованих з рівнем завантаження 10^7 імпульсів за секунду.

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимуму	450000	95948	30494	0.080	6.78
Підбору	450000	353990	241470	5.397	53.66
Вейвлет метод (новий)	450000	360011	246306	3.179	54.73

Простий метод Максимуму продемонстрував найкращу швидкодію, проте його верифікована точність є відносно низькою внаслідок того, що даний метод не здатний правильно розпізнавати амплітуди імпульсів при їх суперпозиції.

4.3. Метрики ефективності розроблених та відомих методів спектрального аналізу на даних, змодельованих з підвищеною деталізацією

Розроблені та вже відомі методи аналізу спектрометричних сигналів були також досліджені на вхідних даних, симульованих за допомогою методу моделювання з підвищеною деталізацією, що був представлений у розділі 2.3.3. Даний метод моделювання враховує можливі зміщення вершин імпульсів відносно точок дискретизації та дозволяє генерувати образ сигналу, що є максимально наближеним до реального аналогового сигналу.

Цифрові вхідні дані для аналізу були змодельовані з розподілом амплітуд імпульсів згідно файлу-шаблону представленому на рисунку 4.5 за трьома сценаріями з наступними параметрами [81]:

1. Рівень завантаження детектора (інтенсивність генерації імпульсів) — 10^5 імпульсів за секунду, тривалість експерименту — 1.5 секунди, загальна кількість змодельованих імпульсів — 150000.

2. Рівень завантаження детектора — 10^6 імпульсів за секунду, тривалість експерименту — 0.45 секунди, загальна кількість змодельованих імпульсів — 450000.

3. Рівень завантаження детектора — 10^7 імпульсів за секунду, тривалість експерименту — 0.045 секунди, загальна кількість змодельованих імпульсів — 450000.

Коефіцієнт деталізації генерації образу сигналу був встановлений рівним десяти, рівень базової лінії – рівним нулю. Середнє квадратичне відхилення

електричного шуму, що накладався на сигнал, було рівним восьми значенням наймолодшого розряду діджитайзера (LSB).

В таблицях 4.7-4.9 наведено підсумкові порівняльні результати комп'ютерної обробки змодельованих даних розробленими (методом Відстеження та методом з використанням вейвлет-перетворень) та існуючими методами аналізу (Максимуму, Підбору) [81].

Таблиця 4.7.

Результати роботи методів аналізу на вхідних даних змодельованих з рівнем завантаження 10^5 імпульсів за секунду.

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимуму	150000	147787	146494	3.055	97.66
Підбору	150000	149616	148880	6.390	99.25
Вейвлет метод (новий)	150000	149632	148924	16.050	99.28
Відстеження (новий)	150000	149643	148936	10.220	99.29

Таблиця 4.8.

Результати роботи методів аналізу на вхідних даних змодельованих з рівнем завантаження 10^6 імпульсів за секунду.

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимуму	450000	387529	353142	0.920	78.48
Підбору	450000	438996	418610	5.197	93.02
Вейвлет метод (новий)	450000	439651	420286	6.059	93.40
Відстеження (новий)	450000	439672	420477	9.256	93.44

Таблиця 4.9.

Результати роботи методів аналізу на вхідних даних змодельованих з рівнем завантаження 10^7 імпульсів за секунду.

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимуму	450000	95451	30280	0.061	6.73
Підбору	450000	355694	225318	6.439	50.07
Вейвлет метод (новий)	450000	360749	227142	2.193	50.48
Відстеження (новий)	450000	360999	227540	1.048	50.56

Як можна побачити з таблиць 4.7-4.9 розроблені методи комп'ютерного аналізу продемонстрували значну кращу верифіковану точність, ніж простий метод Максимуму, та трохи кращу — ніж метод Підбору. Значення верифікованої точності усіх розглянутих методів на даних змодельованих методом з підвищеною деталізацією є нижчими, ніж відповідні значення, що були наведені раніше у таблицях 4.1-4.6. Це пояснюється тим, що при даному підході до генерації образу сигналу вершини імпульсів можуть бути зміщені відносно точок дискретизації. Оскільки методи комп'ютерного аналізу обробляють оцифровані дані тільки в точках дискретизації, то обчислення точних значень амплітуд імпульсів ускладнюється і верифікована точність аналізу дещо знижується. Проте такі змодельовані дані є максимально наближені до реальних спектрометричних даних. Тому можна припустити, що цифри точності розпізнавання в таблицях 4.7-4.9 є актуальними для комп'ютерної обробки даних, отриманих під час реальних експериментів. Загалом результати комп'ютерного аналізу розробленим методом Відстеження і методом з використанням вейвлет-перетворень є досить близькими в розглянутих умовах. Верифікована точність розпізнавання методом Відстеження є дещо вищою на представлених змодельованих даних. Проте метод на основі вейвлет-перетворень є більш універсальним у застосуванні, адже дозволяє

автоматично визначати рівень шуму при фільтрації сигналу і не потребує підбору параметру шумоподавлення для різних наборів спектрометричних даних.

4.4. Застосування розроблених методів комп'ютерного аналізу на спектрометричних даних, отриманих під час реальних експериментів

Для перевірки роботи розроблених методів аналізу спектрометричних сигналів на реальних експериментальних даних в рамках дослідження було підготовлено файли з даними, що були записані за допомогою спеціального обладнання під час реальних експериментів зі зразками матеріалів джерел випромінювання і оцифровані за допомогою діджитайзера.

Обладнання для запису та оцифрування даних

Обладнання для запису та оцифрування спектрометричних сигналів від реальних джерел випромінювання складалось з наступних компонентів:

- Зразки матеріалів джерел випромінювання (Cs^{137} або Co^{60})
- Сцинтиблок на базі кристала NaI(Tl) та фотоелектронний помножувач ФЕП-49Б з високовольтним блоком живлення
- Діджитайзер CAEN 5730B [82] розрядністю 14 біт та частотою оцифрування 500 Ms/s
- Персональний комп'ютер під управлінням операційної системи Ubuntu 22.04 з встановленими необхідними драйверами та програмним забезпеченням для роботи з діджитайзером

Для роботи з діджитайзером і запису даних на ПК було встановлено драйвер для USB порту, набір бібліотек для роботи з пристроєм (CAENVMElib, CAENComm, CAENDigitizer) з сайту виробника CAEN та консольну програму WaveDump. Програма WaveDump дозволяє підключатися до діджитайзера через USB порт ПК, запускати або зупиняти запис даних, а також налаштовувати параметри запису через файл конфігурації. Отримані з діджитайзера дані можуть

бути збережені у файлах на ПК в бінарному (*.dat) або текстовому вигляді (*.txt) та містять масиви миттєвих значень оцифрованого сигналу.

Комп'ютерний аналіз реальних експериментальних даних та побудова спектрів

В якості першого дослідженого сценарію в розробленому програмному засобі було завантажено файл із даними, що були записані під час використання зразка матеріалу джерела випромінювання Cs^{137} . На рисунку 4.6 можна побачити вигляд оцифрованого сигналу та окремих імпульсів, що були візуалізовані на діаграмі відображення сигналу. Форма імпульсів має свою специфіку, адже обладнання, яке використовувалося для отримання спектрометричних даних, здійснювало також попередню обробку сигналу аналоговим фільтром Баттерворта. Далі було виконано програмне розпізнавання та визначення параметрів цифрового сигналу розробленими методами аналізу: Відстеження (представлений у розділі 2.1) та методом з використанням вейвлет-перетворень (представлений у розділі 2.2).

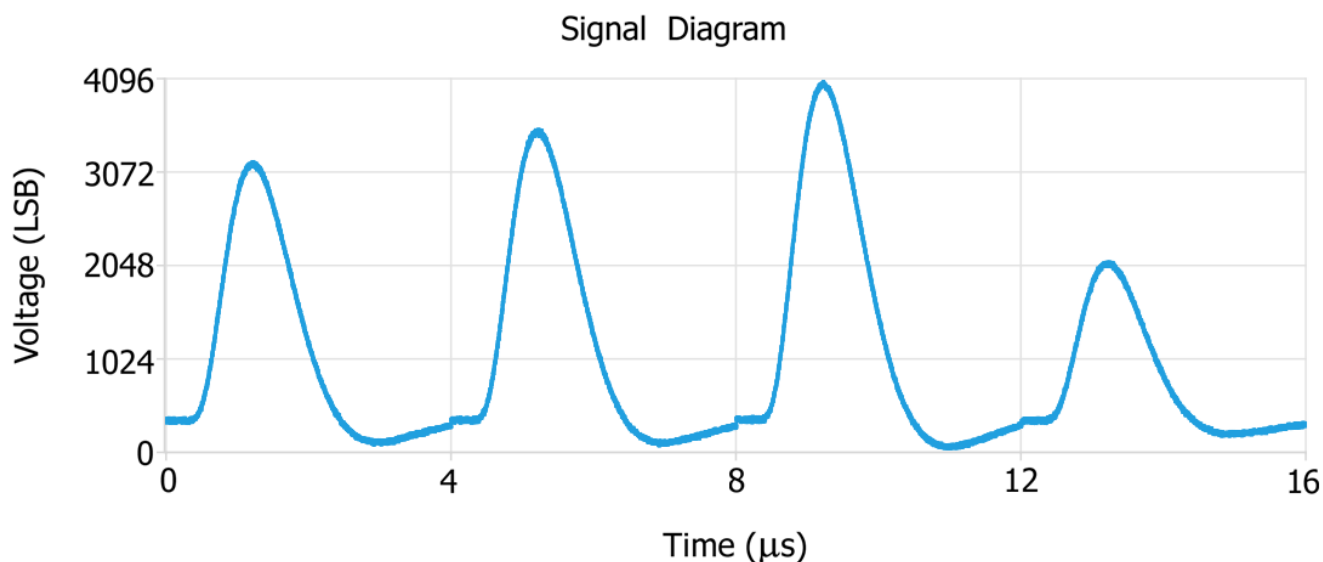
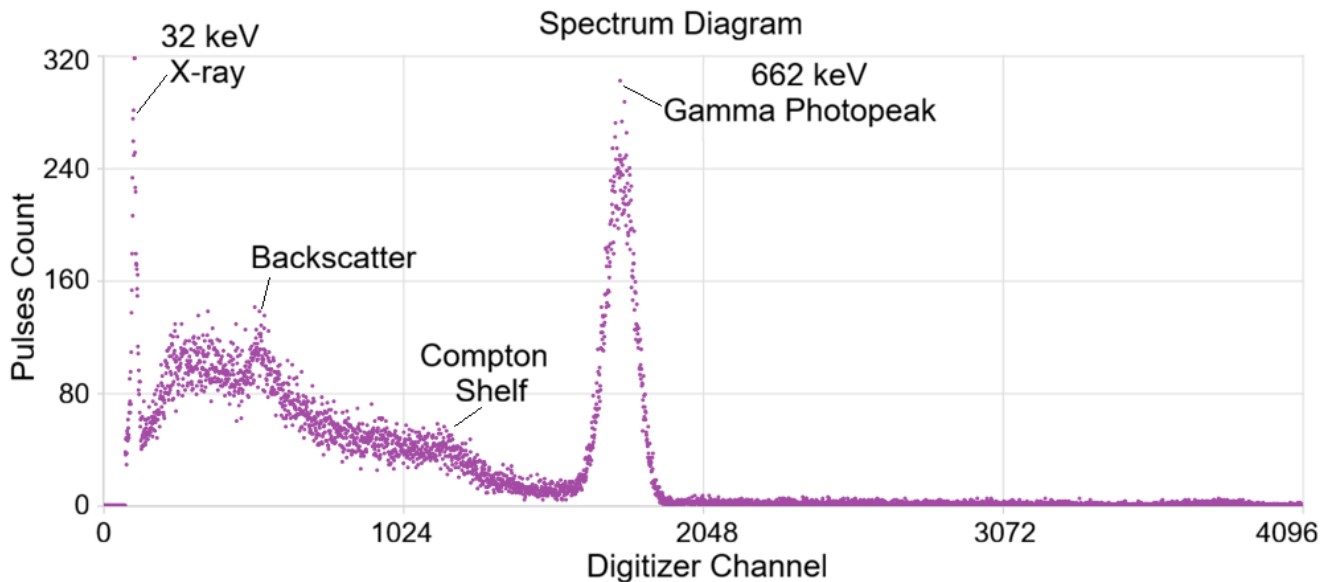
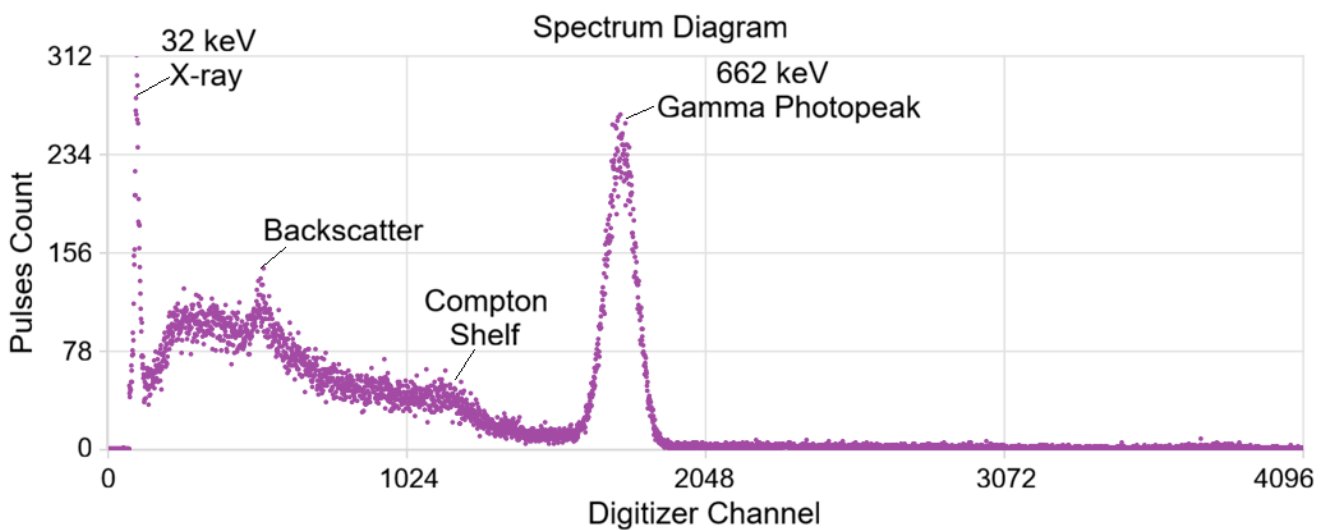


Рис. 4.6. Вигляд частини оцифрованого сигналу та імпульсів, зареєстрованих детектором при використанні зразка матеріалу джерела випромінювання Cs^{137} (отриманих після попередньої обробки аналоговим фільтром Баттерворта).

Наприкінці комп'ютерної обробки даних, за результатами роботи кожного з цих методів було побудовано та візуалізовано на діаграмі результуючий спектр (розподіл амплітуд імпульсів), що характеризує досліджений зразок. На рисунку 4.7 можна побачити результуючі спектри, отримані після комп'ютерного аналізу даних вищезазначеними методами.



(a)



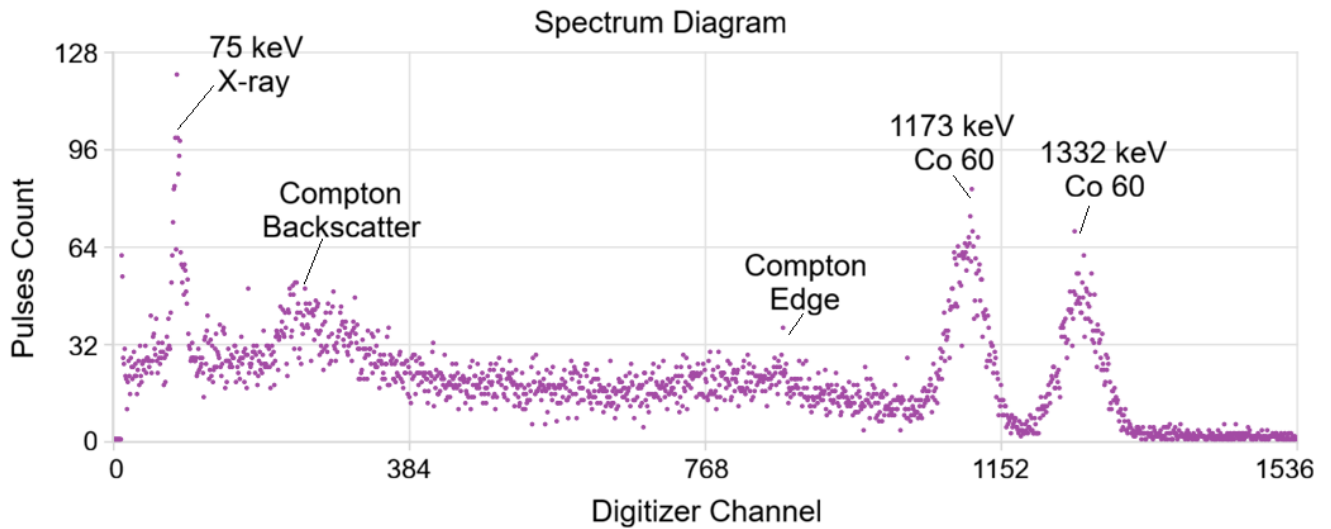
(б)

Рис. 4.7. Результуючі спектри побудовані після комп'ютерної обробки даних від зразка Cs^{137} : а - методом Відстеження, б – методом з використанням дискретних вейвлет-перетворень.

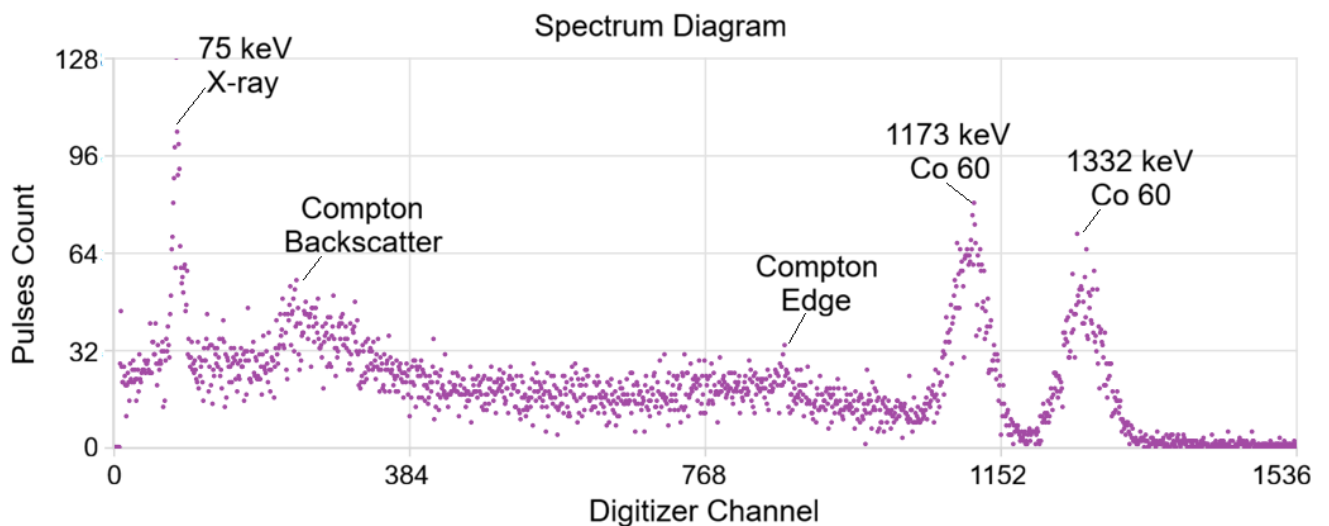
Вісь X діаграми спектру містить канали діджитайзера, яким відповідають значення амплітуд розпізнаних імпульсів. В свою чергу вісь Y відображає загальну кількість розпізнаних імпульсів з відповідною каналу амплітудою. Оскільки в рамках дослідження використовувався діджитайзер з розрядністю 14 біт, то максимальна кількість його каналів дорівнює 16384 (2^{14}). Проте при побудові діаграми спектру канали діджитайзера були об'єднані у групи по 4 для більшої щільності графіку. Як можна побачити з діаграм на рисунку 4.7, побудовані в результаті аналізу розробленими методами спектри загалом відповідають очікуваному спектру випромінювання зразка Cs^{137} [83, 84]. На даних діаграмах виділяється основний пік гамма-випромінювання цезію (посередині), що відповідає енергії близько 662 KeV. Також можна бачити комптонівське розсіювання та фотопік (зліва), зумовлений рентгенівським випромінюванням з енергією близько 32 KeV. Варто відмітити, що основний пік гамма-випромінювання Cs^{137} не є дуже високим, проте такий графік і розмиття піку є типовим у випадку використання сцинтиляційного блоку NaI(Tl) [85].

Для подальшої перевірки розроблених методів аналізу в програмній платформі було завантажено файл із спектрометричними даними, зареєстрованими від зразка матеріалу джерела випромінювання Co^{60} . Як і в попередньому сценарії, було виконано комп'ютерну обробку даних методом Відстеження та методом з використанням дискретних вейвлет-перетворень для визначення параметрів імпульсів і побудови спектрів. Діаграми отриманих результуючих спектрів зображено на рисунку 4.8. З правої сторони діаграм на рисунках 4.8 (а, б) можна побачити два піки гамма-випромінювання Co^{60} , які відповідають енергіям 1173 KeV та 1332 KeV. Посередині можна виділити вершини, які спричинені комптонівським розсіюванням. З лівої сторони знаходиться пік, що зумовлений рентгенівським випромінюванням з енергією близько 75 KeV. В цілому побудовані за допомогою розроблених методів комп'ютерного аналізу спектри відповідають очікуваному спектру

випромінювання зразка матеріалу Co^{60} [86], з урахуванням типу сцинтиляційного детектора, що використовувався.



(a)



(б)

Рис. 4.8. Результуючі спектри побудовані після комп'ютерної обробки даних від зразка Co^{60} : а - методом Відстеження, б – методом з використанням дискретних вейвлет-перетворень.

Отримані та наведені результати свідчать, що розроблені методи аналізу можуть виконувати визначення параметрів оцифрованого спектрометричного сигналу та побудову результуючих спектрів на реальних експериментальних даних. Це підтверджує можливий потенціал практичного застосування

запропонованих методів обробки даних в комп'ютерних системах спектрального аналізу.

4.5. Використання методу моделювання з підвищеною деталізацією для оцінки похибки аналізу простими методами, зумовленої дискретизацією сигналу

Як було детально описано та ілюстровано у розділі 2.3.3, при оцифруванні аналогового сигналу з детектора випромінювання під час реальних експериментів, фактичні значення часу появи імпульсу або його пікового значення (амплітуди) можуть не співпадати з точками дискретизації (оцифрування). Тобто точні час початку та пікове значення імпульсів можуть знаходитися між точками дискретизації, що може вносити похибки при визначенні амплітуди та часу реєстрації імпульсів простими методами комп'ютерного аналізу, такими як метод Максимуму. І такого роду похибки зумовлені не електричним шумом чи іншими факторами, а саме процесом оцифрування аналогового сигналу. Розроблений метод комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією (представлений у розділі 2.3.3) дозволяє програмно генерувати цифровий образ сигналу з дискретністю, яка наближує його до реального аналогового сигналу, та з можливістю зміщення фаз імпульсів відносно точок дискретизації. Тому застосування даного методу моделювання для симуляції цифрового сигналу з відомими параметрами і подальший його програмний аналіз методом Максимумів дозволили оцінити максимальні значення похибок, зумовлених дискретизацією, для різних частот діджітайзера.

4.5.1. Моделювання еталонних вхідних даних для комп'ютерного аналізу

Для того, щоб мати можливість оцінити величину максимальної похибки при визначенні амплітуди, яку може вносити саме процес оцифрування аналогового сигналу з детектора, насамперед потрібно було змоделювати ідеалізовані вхідні дані для аналізу з відомими параметрами і без електричного шуму. В подальшому

можна проаналізувати такі дані простим методом Максимуму для визначення амплітуди імпульсів і визначити різницю між згенерованими та розпізнаними значеннями амплітуд. Тому в додатку було послідовно згенеровано образи цифрового імпульсного сигналу зі сталим розподілом амплітуд імпульсів (всі імпульси мали однакову амплітуду) для різних частот оцифрування діджитайзером. Сеанси моделювання було виконано з наступними параметрами [73]:

- інтенсивність генерації імпульсів (рівень завантаження детектора) — 1000 імпульсів за секунду;
- тривалість модельованого експерименту (T) — 1 секунда;
- рівень базової лінії сигналу (z) – 0 LSB;
- значення амплітуд імпульсів – 2048 LSB (діджитайзера);
- рівень електричного шуму, що накладається на сигнал (n) – 0 LSB;
- частоти оцифрування діджитайзером (F_d) – 100 МГц, 250 МГц, 500 МГц, 750 МГц, 1 ГГц, 1.5 ГГц, 2 ГГц;
- коефіцієнти деталізації молодшого розряду діджитайзера (D_{coeff}) для вищезазначених частот оцифрування відповідно – 60, 24, 12, 8, 6, 4, 3.

Коефіцієнти деталізації молодшого розряду діджитайзера (D_{coeff}) було обрано таким чином, щоб внутрішня програмна генерація значень сигналу для кожної частоти оцифрування діджитайзера F_d відбувалося на однаковій частоті дискретизації F_m рівній 6 ГГц (згідно формули (2.13)). Параметр інтенсивності генерації імпульсів (рівень завантаження детектора) був обраний рівним 1000 імпульсів за секунду для того, щоб ймовірність накладання імпульсів один на одного була дуже низькою і фактично накладань не було. Час появи кожного імпульсу визначався випадковим чином за допомогою генератора випадкових чисел з рівномірним розподілом у діапазоні тривалості експерименту. Результат моделювання цифрового образу сигналу в додатку наводиться на рисунку 4.9, де відображається частина змодельованого сигналу зі сталим розподілом амплітуд імпульсів [73].

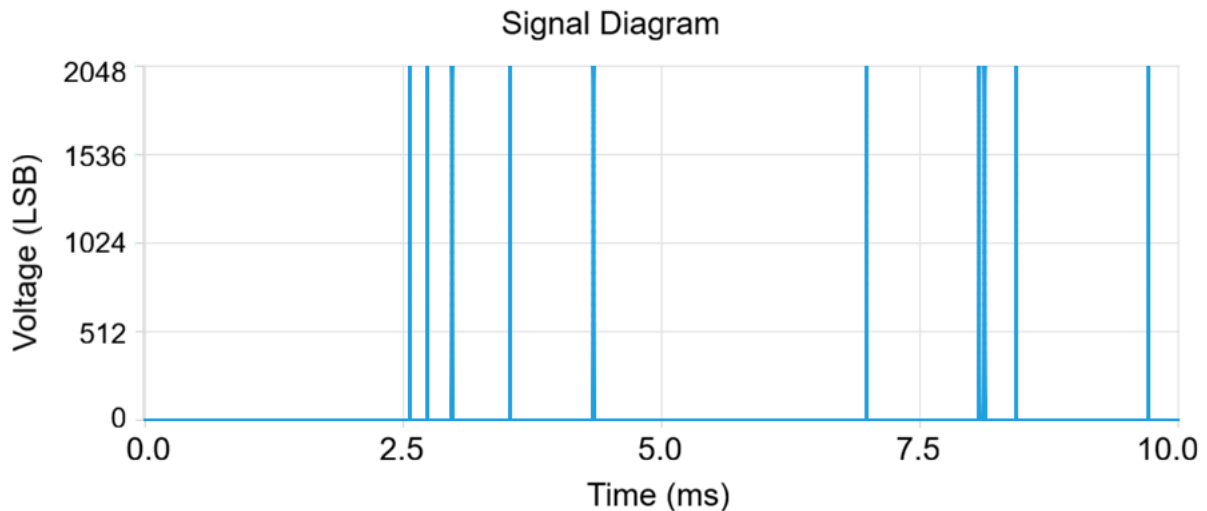


Рис. 4.9. Програмно згенерований сигнал зі сталим розподілом амплітуд імпульсів.

4.5.2. Програмний аналіз даних та визначення максимальної похибки

З метою визначення величини максимальної похибки при розпізнаванні амплітуд імпульсів, яку може вносити оцифрування сигналу, змодельований еталонний монохромний сигнал був проаналізований методом Максимуму. Даний метод є досить простим, детальний принцип його роботи був описаний у розділі 1.1.2, і загалом полягає у визначенні максимального значення оцифрованого сигналу в діапазоні початку та кінця імпульсу в якості амплітуди. Як зазначалося раніше, алгоритми методів аналізу, зокрема методу Максимуму, працюють лише з точками дискретизації сигналу з частотою діджитайзера F_d і визначають амплітуду імпульсу як максимальне значення сигналу саме по точкам дискретизації. Тому різниця між значенням амплітуди імпульсу, розпізнаним методом Максимуму, та заданим при моделюванні значенням (2048 LSB) і буде визначати похибку при визначенні амплітуди, зумовлену процесом оцифрування. Адже інші фактори впливу, такі як електричний шум або накладання імпульсів, є відсутні. В додатку реалізовано алгоритм верифікації, який порівнює масиви згенерованих і розпізнаних імпульсів після аналізу (з певними порогами відхилення за часом появи та амплітуді) та визначає, який відсоток виявлених певним методом

імпульсів співпадає з тими, що були змодельовані. За допомогою алгоритму верифікації для кожного сеансу моделювання сигналу з певною частотою було визначено мінімальні пороги відхилення по амплітуді, при яких всі згенеровані імпульси є розпізнаними і верифікованими. Ці відхилення і визначають максимальні значення похибок, які зумовлені дискретизацією сигналу. На рисунку 4.10 візуалізовано розподіл амплітуд (спектр) імпульсів, розпізнаних методом Максимуму, для вхідних даних змодельованих з частотою оцифрування 250 МГц та коефіцієнтом деталізації молодшого розряду діджитайзера рівним 24 [73]. Вісь X даної діаграми містить значення амплітуд виявлених імпульсів, а вісь Y — їх кількість. Як бачимо, діапазон амплітуд з ненульовою кількістю розпізнаних імпульсів містить значення від 2025 до 2048 LSB (при змодельованому значенні 2048 LSB). Тому максимальна похибка, що зумовлена дискретизацією, в даному випадку є рівною 23 LSB.

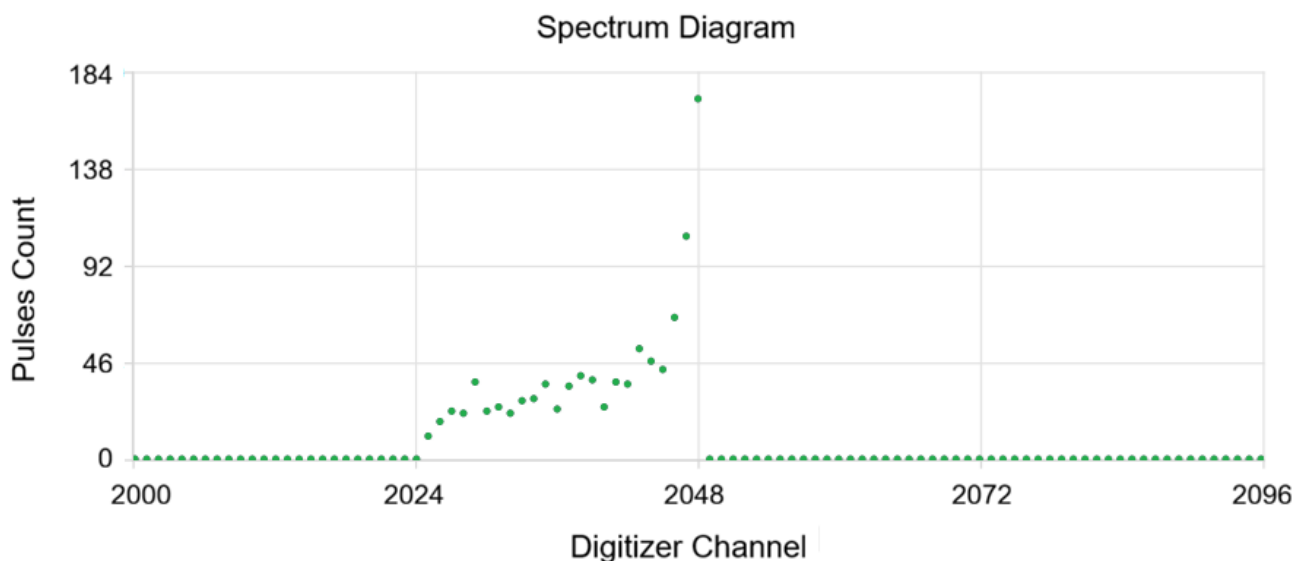


Рис. 4.10. Розподіл амплітуд (спектр) імпульсів, розпізнаних методом Максимумів для сценаріїв моделювання з частотами 250 МГц та коефіцієнтом деталізації рівним двадцяти чотирьом.

На рисунку 4.11 зображено розподіл амплітуд імпульсів розпізнаних для симульованого сигналу з частотою 100 МГц та коефіцієнтом деталізації рівним шістдесяті [73]. В даному випадку розкид амплітуд є дуже значним, похибка

дискретизації є максимальною серед досліджених сценаріїв і становить близько 137 LSB.

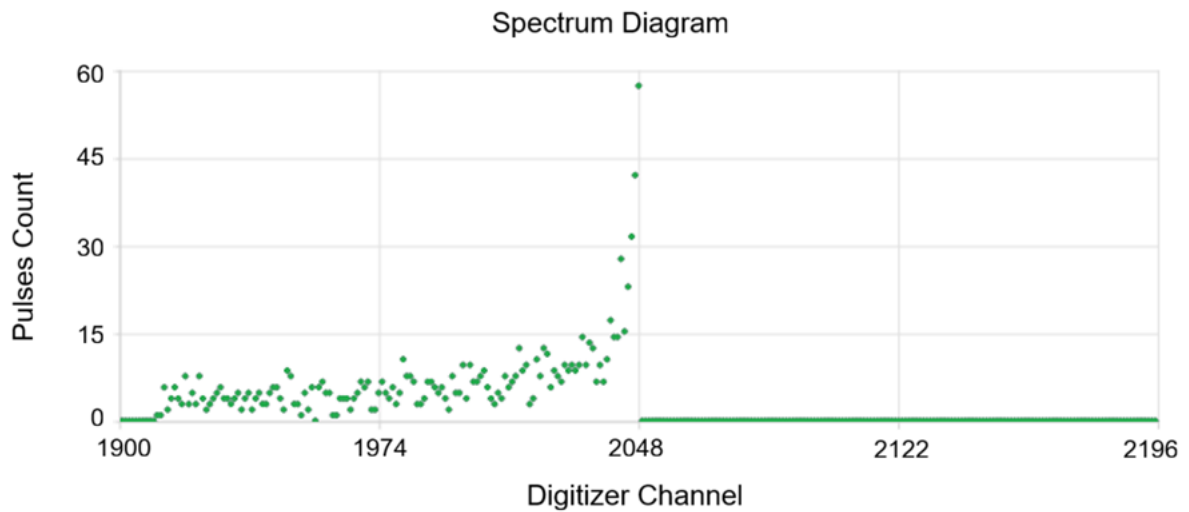


Рис. 4.11. Розподіл амплітуд (спектр) імпульсів, розпізнаних методом Максимуму для сценарію моделювання з частотою 100 МГц та коефіцієнтом деталізації рівним шістидесяти.

Далі при моделюванні цифрового образу сигналу з більшими частотами оцифрування (250 МГц, 500 МГц і т. д.) і його подальшим аналізом методом Максимуму значення похибки дискретизації зменшується. При аналізі сигналу, що був змодельований з параметром частоти оцифрування 2 ГГц похибка дискретизації досягла нульового значення, як можна побачити на рисунку 4.12 [73]. В цьому випадку всі 1000 згенерованих імпульсів були розпізнані з правильним значенням амплітуди 2048 LSB, тому результуючий спектр являє собою одну точку з відповідними значеннями.

В таблиці 4.10 наводяться підсумкові результати, які містять максимальні значення похибок (в LSB) при визначенні амплітуд імпульсів методом Максимуму для різних значень частот оцифрування діджитайзером [73]. З даних наведених в таблиці 4.10 можна побачити, що при частоті оцифрування діджитайзером 100 МГц максимальна похибка дискретизації сигналу є досить великою і становить близько

137 LSB. При використанні діджитайзера з частотою оцифрування 1 ГГц і 1.5 ГГц значення такої похибки становить 1 LSB, а при частоті 2 ГГц і вище — 0 LSB.

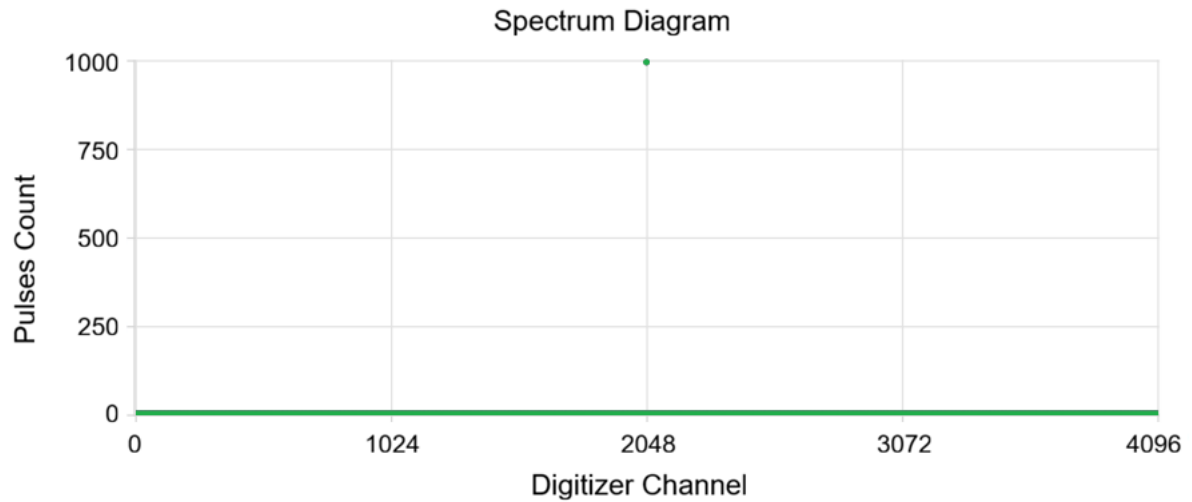


Рис. 4.12. Розподіл амплітуд (спектр) імпульсів, розпізнаних методом Максимуму для сценарію моделювання з частотою 2 ГГц та коефіцієнтом деталізації рівним трьом.

Таблиця 4.10.

Дані про значення максимальної похибки дискретизації при визначенні амплітуди імпульсів в залежності від частоти оцифрування діджитайзера.

Частота оцифрування (МГц)	Коефіцієнт деталізації молодшого розряду діджитайзера	Амплітуда змодельованих імпульсів (LSB)	Максимальна похибка дискретизації (LSB)
100	60	2048	137
250	24	2048	23
500	12	2048	6
750	8	2048	3
1000	6	2048	1
1500	4	2048	1
2000	3	2048	0

Для досягнення максимальної точності вимірювання амплітуд імпульсів ці дані потрібно враховувати на практиці при виборі моделі оцифровувача та частоти дискретизації сигналу для конкретного експерименту.

4.6. Практичні рекомендації по використанню розроблених методів аналізу та методів комп'ютерного моделювання

В рамках дослідження були розглянуті методи розпізнавання та аналізу параметрів спектрометричних сигналів, а також математичні моделі та методи комп'ютерного моделювання таких сигналів. Відповідно до результатів тестування та отриманих порівняльних характеристик роботи методів комп'ютерної обробки можна зробити наступні рекомендації щодо застосування запропонованих методів аналізу:

1. Розроблені методи аналізу спектрометричних сигналів показали високу точність розпізнавання основних параметрів імпульсів, навіть при високих рівнях завантаження (10^5 , 10^6 , 10^7 імпульсів за секунду) та наявності електричного шуму близько 8-25 LSB і вище. У випадку використання детекторів випромінювання з нижчим рівнем шумів (наприклад напівпровідникових), де рівень шуму є меншим і може становити близько 2-6 LSB, існуючий метод Підбору може демонструвати аналогічну або дещо кращу точність визначення параметрів імпульсів, ніж запропоновані методи.

2. Оскільки механізм фільтрації сигналу від електричного шуму в розробленому методі Відстеження базується на застосуванні прямого перетворення Фур'є та відсіканні високочастотної компоненти зі значеннями магнітуди нижче певного порогу M_{tr} (як було детально описано у розділі 2.2.1), важливо підібрати оптимальне значення даного порогу. Занадто низьке значення порогу може призводити до того, що коливання рівня сигналу спричинені електричним шумом будуть згладжені не повністю. В свою чергу дуже високі значення порогу M_{tr} можуть призводити до змін амплітуди або форми самих імпульсів. При дослідженні роботи метода Відстеження на симульованих даних згідно сценаріїв вказаних у розділах 3.3 та 4.1 в програмній реалізації методу було встановлене значення порогу M_{tr} рівним 500. Також в розробленій програмі передбачена можливість зміни/регулювання даного параметру в додаткових налаштуваннях. При використанні методу Відстеження на реальних

спектрометричних даних з більш високим рівнем шумів (25-40 LSB та вище), фільтрація даним методом може бути недостатньо ефективною. Для таких даних краще використовувати розроблений метод комп'ютерного аналізу з використанням дискретних вейвлет-перетворень і автоматичним визначенням порогу шумоподавлення (представлений у розділі 2.2).

Беручи до уваги результати програмної реалізації та застосування моделей і методів комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів, можливо надати наступні рекомендації щодо їх можливого використання:

1. Метод моделювання згідно заданого шаблону з використанням відрізків ймовірностей (представлений у розділі 2.3.2.1) може бути використаний, якщо потрібно послідовно симулювати хід експерименту і поступову появу імпульсів з плином часу. В іншому випадку, якщо цікавить тільки кінцевий результат генерації образу сигналу – краще використовувати інші підходи до моделювання. Адже результуючий спектр (розподіл амплітуд змодельованих імпульсів), отриманий даним методом, може містити статистичні відхилення від шаблонного розподілу.

2. Метод моделювання згідно заданого шаблону з використанням детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд дозволяє генерувати цифровий образ сигналу з розподілом амплітуд імпульсів без статичних відхилень від заданого шаблону. Проте результат моделювання буде точно відповідати шаблону лише наприкінці процесу симуляції.

3. Розроблений метод комп'ютерного моделювання з підвищеною деталізацією дозволяє генерувати образи спектрометричних сигналів, які є максимально наближені до реальних сигналів, адже даний підхід реалізує можливість зміщення фаз імпульсів відносно точок оцифрування. І оскільки для цього частота дискретизації симульованого сигналу повинна на порядок або більше перевищувати частоту оцифрування діджитайзером, то значення коефіцієнту деталізації (представленого в даному методі) варто задавати від десяти і вище.

Висновок до розділу 4

В розділі 4 дисертації було проведено оцінку точності та швидкодії роботи розроблених методів аналізу спектрометричних сигналів — методу Відстеження та методу на основі дискретних вейвлет-перетворень. Після перевірки на симульованих даних нові підходи показали досить високу точність розпізнавання при рівнях завантаження 10^5 і 10^6 імпульсів за секунду (близько 99.3 % та 93.4 % відповідно) в розглянутих умовах моделювання експериментів. При рівні завантаження 10^7 та високій ймовірності суперпозиції імпульсів верифікована точність розпізнавання склала близько 50.5–54.7 % (в залежності від способу моделювання даних та методу аналізу). З метою оцінки ефективності розроблених алгоритмів та порівняльного аналізу було програмно реалізовано два існуючі методи спектрального аналізу: метод Максимумів та Підбору. Було обчислено їх швидкість обробки даних, верифіковану точність розпізнавання та отримано порівняльні характеристики усіх розглянутих методів. В підсумку, нові методи показали на 15–44 % кращу точність розпізнавання, ніж простий метод Максимумів, при високих рівнях завантаження. Крім того, у досліджених сценаріях розроблені методи дозволили дещо покращити точність розпізнавання у порівнянні з існуючим методом Підбору.

Далі розроблені методи комп'ютерної обробки були використані для аналізу спектрометричних даних, отриманих під час реальних експериментів з матеріалами джерелами випромінювання Cs^{137} та Co^{60} . Було програмно побудовано амплітудні спектри досліджених зразків, які відповідали загальновідомим спектрам даних матеріалів. Це підтверджує можливість впровадження та практичного застосування розроблених методів обробки даних в комп'ютерних системах спектрального аналізу.

Наприкінці було застосовано розроблений метод моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією з метою програмної генерації еталонних вхідних даних для комп'ютерного аналізу з ідеалізованим (сталим) розподілом амплітуд імпульсів. Створений образ сигналу не містив

електричного шуму та накладань імпульсів, тому подальший аналіз таких вхідних даних методом Максимуму та застосування алгоритму верифікації дозволили визначити величину похибки при визначенні амплітуд імпульсів, яка зумовлена дискретизацією аналогового сигналу. Наведені результати свідчать, що для мінімізації похибки визначення амплітуди (досягнення рівня 1 LSB або менше), яку вносить дискретизація аналогового сигналу, потрібно використовувати діджитайзер з тактовою частотою понад 1 ГГц або використовувати математичні методи відновлення інформації, частково втраченої в результаті процесу дискретизації..

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [1, 4, 6, 9, 10].

ВИСНОВКИ

1. В ході дослідження було проведено огляд методів розпізнавання та визначення параметрів спектрометричних сигналів, які використовуються в комп'ютерних системах спектрального аналізу. В результаті було виявлено, що деякі існуючі підходи до фільтрації цифрового сигналу від електричного шуму можуть змінювати саму корисну складову сигналу, що може впливати на точність визначення характеристик імпульсів. Також було відмічено, що точність може знижуватися при високих рівнях завантаження внаслідок суперпозиції імпульсів та значної видозміни форми цифрового сигналу, тож актуальною є задача підвищення точності або швидкодії методів аналізу. Окрім того існує проблема об'єктивного оцінювання того чи іншого методу комп'ютерної обробки, оскільки немає можливості отримання повністю достовірних вхідних даних через випадковість процесів на вході спектрометричного вимірювального тракту. Вирішити цю проблему можливо шляхом комп'ютерного моделювання штучного спектрометричного сигналу з повністю відомими параметрами та програмною верифікацією результатів роботи різних методів комп'ютерного аналізу.

2. Найбільш важливими науковими і прикладними результатами, що були отримані в роботі, є наступні.

а) Розроблений метод комп'ютерного аналізу параметрів спектрометричних сигналів, особливістю якого є механізм фільтрації сигналу від електричного шуму на основі алгоритмів дискретних перетворень Фур'є та додаткова обробка імпульсів при їх суперпозиції, що в сукупності забезпечує підвищення точності розпізнавання та вимірювання основних параметрів сигналів в комп'ютерних системах спектрального аналізу.

б) Розроблений метод комп'ютерного аналізу спектрометричних даних, що відрізняється від існуючих механізмом фільтрації сигналу від шуму за допомогою дискретних вейвлет-перетворень та алгоритму BayesShrink для автоматичного визначення шумового порогу, а також алгоритмом аналізу рівня

сигналу з обробкою суперпозиції імпульсів. Це дозволило підвищити універсальність застосування методу та точність визначення параметрів спектрометричних даних.

с) Удосконалені математичні моделі та методи комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів за рахунок реалізації моделювання згідно спеціальних шаблонів. Це дозволило генерувати образи спектрометричних сигналів, що відтворюють цифрові дані записані під час реальних експериментів або створювати штучні, ідеалізовані образи сигналів, що дало можливість створити вхідні дані для аналізу з повністю відомими параметрами та отримати метрики ефективності методів комп'ютерної обробки.

д) Метод комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів за рахунок підвищення деталізації генерації образу сигналу та додавання коефіцієнту деталізації, що на порядок або більше перевищує частоту оцифрування. Це дозволило моделювати цифровий імпульсний сигнал, що є максимально наближеним до реальних сигналів та враховує можливість зміщення фаз імпульсів відносно точок дискретизації. За рахунок цього стало можливим виміряти максимальні величини похибок при визначенні амплітуд імпульсів простими методами аналізу, що зумовлені саме дискретизацією аналогового сигналу.

3. Розроблені математичні моделі та методи отримали відповідну програмну реалізацію та були протестовані із застосуванням алгоритму програмної верифікації точності визначення параметрів спектрометричних даних.

4. Отримані результати підтверджують можливість практичного використання запропонованих комп'ютерних методів аналізу параметрів спектрометричних сигналів з покращеною фільтрацією від шуму та обробкою суперпозиції імпульсів при розробці програмно-апаратних комплексів спектрального аналізу. Показано, що дані методи можуть демонструвати високу точність визначення параметрів оцифрованих сигналів отриманих зі сцинтиляційного детектора, в яких присутні електричні шуми характерні для цього типу детекторів. Вдосконалені математичні моделі та методи комп'ютерного

моделювання спектрометричних сигналів можуть використовуватися для створення цифрових образів сигналів, які досить складно або дорого вартісно отримати експериментальним шляхом. Показані результати оцінки максимальної похибки, що виникає під час аналізу спектрометричних сигналів простими методами і є зумовлена дискретизацією сигналу, можуть бути враховані на практиці при виборі моделі діджитайзера і частоти оцифрування під час проведення реальних експериментів.

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується аргументованими результатами досліджень і підтверджується співставленням з результатами експериментальних досліджень на основі принципів та методів системного аналізу, а також застосування імітаційного та математичного моделювання, чисельних методів, теорії математичної статистики, теорії ймовірностей, методів цифрової обробки сигналів, методів і алгоритмів аналітичної обробки та інтелектуального аналізу великих масивів даних.

Основні результати роботи було реалізовано в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна у рамках НДР «Концептуальні моделі, методи і технології створення адаптивних інформаційних систем на основі знання-орієнтованих підходів та засобів розробки програмного забезпечення» за 2022 – 2024 рр. (ДР № 0121U110310).

В підсумку дослідження показано, що розроблені методи аналізу мають високу точність розпізнавання основних параметрів спектрометричних сигналів, таких як амплітуди та час появи імпульсів. Перевірку точності та швидкодії роботи методів було здійснено на симульованих даних з повністю відомими параметрами, які були змодельовані з використанням удосконалених методів комп'ютерного моделювання сигналів згідно заданого шаблону для декількох сценаріїв з різними параметрами завантаження і різною ймовірністю суперпозиції імпульсів. Показано, що застосування розроблених методів аналізу спектрометричних сигналів дає наступну точність розпізнавання параметрів імпульсів: близько

99.3 % та 93.4 % при рівнях завантаження 10^5 і 10^6 імпульсів за секунду відповідно (коли ймовірність накладання імпульсів один на одного є відносно невеликою), близько 50.5 % — при рівні завантаження 10^7 та частій суперпозиції імпульсів. В кінцевому рахунку, при високих рівнях завантаження нові методи показали на 15–44 % кращу точність розпізнавання, ніж простий метод Максимуму. Крім цього, запропоновані методи дозволили дещо покращити точність розпізнавання у порівнянні з існуючим методом Підбору у сценаріях, що досліджувалися.

6. Результати, що були отримані в роботі можуть бути рекомендовані до застосування в науково-дослідних організаціях для розробки комп'ютеризованих систем спектрального аналізу.

7. Сукупність отриманих у дисертації нових наукових результатів, а також підтвердження факту їх достовірності, наукової та практичної значущості, дають змогу вважати, що сформульована наукова задача розробки нових комп'ютерних методів аналізу параметрів спектрометричних сигналів для підвищення точності обробки даних, а також удосконалення математичних моделей та методів моделювання зазначених сигналів — розв'язаною, а поставлену мету — досягнутою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, 2010. 864 pages.
2. Грабовський В. А. Прикладна спектрометрія йонізуючих випромінювань: Навчальний посібник. Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. 296 с.
3. Site of Spectrum Instrumentation Company. A/D products and Digitizers. URL: <https://spectrum-instrumentation.com/products/digitizer/index.php>
4. Site of Mirion Company. Spectroscopy & Scientific Analysis Systems. URL: <https://www.mirion.com/products/technologies/spectroscopy-scientific-analysis>
5. Site of CAEN Company. Digitizers. URL: <https://www.caen.it/subfamilies/digitizers/>
6. Muller, H., Pimenta, R., Yin, Z., Zhou, D., Cao, X., Li, Q., Liu, Y., Zou, F., Skaali, B., Awes, T.C. Configurable electronics with low noise and 14-bit dynamic range for photodiode-based photon detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2006. Volume 565 (2), pp. 768–783. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2006.05.246>
7. Bourne M.M., Clarke S.D., Paff M., Di Fulvio A., Norsworthy M., Pozzi S.A. Digital pile-up rejection for plutonium experiments with solution-grown stilbene. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2017. Volume 842. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.10.023>
8. Hartman J., Barzilov A., Novikov I. Remote sensing of neutron and gamma radiation using aerial unmanned autonomous system. 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, NSS/MIC, IEEE, San Diego, CA, USA. 2015. Pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2015.7581763>
9. Danagoulian A., Bertozzi W., Hicks Jr. C.L., Klimenko A.V., Korbly S.E., Ledoux R.J., Wilson C.M. Prompt neutrons from photofission and its use in homeland

security applications. 2010 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST), 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/THS.2010.5654938>

10. Kiptily V. G., Cecil F.E., Medley S.S. Gamma ray diagnostics of high temperature magnetically confined fusion plasmas. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2006. Volume 48 (8). R59–R82. DOI: <https://doi.org/10.1088/0741-3335/48/8/R01>

11. Warburton, W., Momayezi, M., Hubbard-Nelson, B., Skulski, W. Digital pulse processing: new possibilities in nuclear spectroscopy. *Applied Radiation and Isotopes*. 2000. Volume 53 (4-5), pp. 913–920. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00247-5](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00247-5)

12. Belli P., Bernabei R., Caracciolo V., Cerulli R., C., Danevich F., Incicchitti A., Kobychhev V. et al. Final results of the measurement to search for rare decays of naturally occurring osmium isotopes with ultra-low background gamma-ray spectrometry. *European Physical Journal A*. 2024. Volume 60 (7). DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-024-01371-x>

13. Kobychhev V. V. The program simourg for simulating the response functions of gamma detectors with simple Geometries. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2011. Volume 12 (3), pp. 301-306. DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2011.03.301>

14. Reva S. M., Tsybliyev D. O. Devising a computer method to recognize and analyze spectrometric signals parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 6(9 (132)), pp. 86–96. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318558>

15. Averill M. Law, W. David Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. Third edition. McGraw-Hill. 760 pages.

16. Wolszczak W., Dorenbos P. Time-resolved gamma spectroscopy of single events. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*. 2018. Volume 886. P. 30–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.080>

17. Birks J.B. The Theory and Practice of Scintillation Counting, Pergamon Press, 1964
18. Dinca L., Dorenbos P., J. de Haas, Bom V., and Eijk C. V. Alphagamma pulse shape discrimination in CsI:Tl, CsI:Na and BaF₂ scintillators. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2002. Vol. 486, no. 12, pp. 141-145.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00691-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00691-5)
19. Kobayashi M., Tamagawa Y., Tomita S., Yamamoto A., Ogawa I., and Usuki Y. Significantly different pulse shapes for γ - and α -rays in Gd₃Al₂Ga₃O₁₂:Ce³⁺ scintillating crystals. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2012. Vol. 694, pp. 91-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.07.055>
20. Yang K., Menge P. R., and Ouspenski V. Enhanced α - γ discrimination in co-doped LaBr₃:Ce. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2016. Vol. 63, pp. 416-421. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7431223>
21. Larman Craig. Applying UML and patterns: an introduction to object-oriented analysis and design and iterative development (3rd edition). New Delhi: Pearson, 2004. 736 pages.
22. Khilkevitch E. M., Shevelev A. E., Chugunov I. N., Iliasova M. V., Doinikov D. N., Gin D. B., Naidenov V. O., Polunovsky I. A. Advanced algorithms for signal processing scintillation gamma ray detectors at high counting rates. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2020. Volume 997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164309>
23. Smith S. W. The Scientist and Engineers Guide to Digital Signal Processing. San Diego, CA, USA: California Technical Publishing, 1997. 664 pages. URL: <https://www.dspguide.com>
24. Shevelev A. E. et al. High performance gamma-ray spectrometer for runaway electron studies on the FT-2 tokamak. Nuclear Instruments and Methods in

Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2016. Volume 830. P. 102–108.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.075-01901285-2>

25. Morhac M., Matousek V. High-resolution boosted deconvolution of spectroscopic data. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2011. Volume 235, issue 6. P. 1629–1640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2010.09.005>

26. Gold R. ANL-6984, Argonne National Laboratories, Argonne, Ill, 1964. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1035356/>

27. Morhac M., Kliman J., Matousek V., Veselsky M., Turzo I. Efficient one and two dimensional Gold deconvolution and its application to gamma-ray spectra decomposition. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A*. 1997. Volume 401 (2–3). P. 385–408. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)01058-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)01058-9)

28. Morhac M., Matousek V., Kliman J. Optimized multidimensional nonoscillating deconvolution. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2002. Volume 140 (1–2). P. 639–658. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(01\)00521-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(01)00521-0)

29. Pollastrone F., Cardarilli G. C., Riva M., Costa Pereira R., Fernandes A., Cruz N. et al. A clustering algorithm for scintillator signals applied to neutron and gamma patterns identification. *Fusion Engineering and Design*. 2019. Volume 146. P. 2110–2114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.117>

30. Lopatin M., Moskovitch N., Trigano T., Sepulcre Y. Pileup attenuation for spectroscopic signals using a sparse reconstruction. 2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/eeei.2012.6377045>

31. Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the LASSO. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1996. Volume 58, no. 1. P. 267–288. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x>

32. Graps A. An introduction to wavelets. *IEEE Computational Science and Engineering*. 1995. Volume 2, issue 2. P. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.1109/99.388960>

33. Zhiyuan Li, Jie Li, Yueting Zhang, Jiayi Guo, Yirong Wu. A Noise-Robust Blind Deblurring Algorithm with Wavelet-Enhanced Diffusion Model for Optical Remote Sensing Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2024. Volume 17, pp. 16236 – 16254. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3422175>
34. Wissam Jenkal, Rachid Latif, Ahmed Toumanari, Azzedine Dliou, Oussama El B'charri, Fadel M.R. Maoulainine. An efficient algorithm of ECG signal denoising using the adaptive dual threshold filter and the discrete wavelet transform. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2016. Volume 36, Issue 3, pp. 499-508. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2016.04.001>
35. GuoLiang Yu, JianZhong Gu, Long Hou, ZhenYu Li, YanZhao Wang & YiYun Zhang. Application of wavelet transform in γ -ray spectra analysis. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. 2013. Volume 56, pp. 1735–1739. URL: <https://doi.org/10.1007/s11433-013-5185-3>
36. Krizhevsky A., Sutskever I. and Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems* 25. 2012. P. 1097–1105. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks.pdf>
37. He K., Zhang X., Ren S. and Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016. P. 770–778. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
38. Hinton G., Deng L., Yu D., Dahl G., Abdel-rahman Mohamed, Jaitly N. et al. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2012. Volume 29. P. 82-97. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2205597>
39. Xin Ma, Yaohui Wang, Xinyuan Chen, Gengyun Jia, Ziwei Liu, Yuan-Fang Li, Cunjian Chen, Yu Qiao. Latte: Latent Diffusion Transformer for Video Generation. *Computer Vision and Pattern Recognition (arXiv)*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.03048>

40. Yoon S., Lee C., Won B.-H., Hong S.-B., Seo H., Kim H.-D. Fast neutron-gamma discrimination in organic scintillators via convolution neural network. *Journal of the Korean Physical Society*. 2022. Volume 80 (5). Pages 427–433. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40042-022-00398-x>
41. Yoon S., Lee C., Seo H., Kim H.-D. Improved fast neutron detection using CNN-based pulse shape discrimination. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023. Volume 55 (11). Pages 3925–3934. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.07.007>
42. Mohit Sewak, Md. Rezaul Karim, Pradeep Pujari. *Practical Convolutional Neural Networks*. Packt Publishing. 2018. 218 pages. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/practical-convolutional-neural/9781788392303/>
43. Abdullah Abdulaziza, Jianxin Zhou, Ming Fang, Stephen McLaughlin, Angela Di Fulvio, Yoann Altmanna. A variational autoencoder for minimally-supervised pulse shape discrimination. *Annals of Nuclear Energy*. 2024. Volume 204. Article 110496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110496>
44. Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser, Illia Polosukhin. Attention Is All You Need. *Computation and Language*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
45. Ronald Wurtz. Consistent principles for particle identification by pulse shape discriminating systems. *SPIE Proceedings, Hard X-Ray, Gamma-Ray and Neutron Detector Physics XXI*. 2019. Volume 11114. P. 1–14. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11114/111140X/Consistent-principles-for-particle-identification-by-pulse-shape-discriminating-systems/10.1117/12.2528898.full?SSO=16940-6951>
46. Hammad M. E., Hany Kasban, Refaat Mohamed Fikry, Fathi E. Abd El-Samie. Digital pulse processing algorithm for neutron and gamma rays discrimination. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. 2019. Volume 101. P. 475–487. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10470-019-01498-8>
47. Blanc P., Hamel M., Rocha L. et al., Study and understanding of n/γ discrimination in organic plastic scintillators. 2012 IEEE Nuclear Science Symposium

and Medical Imaging Conference Record (NSS/WC). 2012. P. 1978-1982. DOI: <https://doi.org/10.1109/nssmic.2012.6551457>

48. Ai P., Wang D., Huang G., Fang N., Xu D., Zhang F. Timing and characterization of shaped pulses with MHz ADCs in a detector system: a comparative study and deep learning approach. Journal of Instrumentation. 2019. Volume 14 (03), P03002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/14/03/p03002>.

49. Ai P., Wang D., Huang G. et al. PulseDL: A reconfigurable deep learning array processor dedicated to pulse characterization for high energy physics detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020. Volume 978, 164420. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2020.164420>

50. Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софіна О. Ю., Шушура О.М. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1: навчальний посібник. ВНТУ. 2012. 193 с.

51. Фельдман Л. П., Петренко А. І., Дмитрієва О. А. Чисельні методи в інформатиці. Київ: Видавнича група ВНУ. 2006. 480 с.

52. Wahab M. F., Gritti F., O'Haver T. C. Discrete Fourier transform techniques for noise reduction and digital enhancement of analytical signals. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2021. Volume 143, 116354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116354>

53. Osgood B.G. Lectures on the Fourier Transform and its Applications, American Mathematical Society, Providence, Rhode Islands, 2019. URL: <https://see.stanford.edu/materials/lsoftae261/book-fall-07.pdf> .

54. Edmund Lai. Practical Digital Signal Processing for Engineers and Technicians. Newnes. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5798-3.X5000-0>

55. Bracewell, R. N. The Fourier Transform and its Applications. New Delhi: McGraw-Hill Education. 2000. 640 pages.

56. Heideman, M. T., Johnson, D. H., Burrus, C. S. Gauss and the history of the fast Fourier transform. *Archive for History of Exact Sciences*. 1985. 34 (3). Pages 265–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00348431>
57. Brigham E.O. *The Fast Fourier Transform and its Applications*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, NJ, 1988. 448 pages.
58. Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B. *Numerical recipes. The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press. 2007. 1256 pages. URL: <https://www.cambridge.org/us/universitypress/subjects/mathematics/numerical-recipes/numerical-recipes-art-scientific-computing-3rd-edition-9414-2023-108945>
59. OMG Unified Modeling Language Specification. Version 2.5 (2015). URL: <https://www.omg.org/spec/UML/2.5/PDF>
60. Larman C. *Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development*. Addison Wesley Professional. 2004. 736 pages.
61. Рева С. М., Циблієв Д. О. Розробка методу комп'ютерного аналізу параметрів спектрометричних сигналів з використанням дискретних вейвлет-перетворень. *Інформаційні технології та суспільство*. 2025. (4 (19), 144-153. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.4.23>
62. Vu Dang Hoang. Wavelet-based spectral analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2014. Volume 62, pages 144-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.07.010>
63. Проценко М. М. Методика вибору вейвлет-функції для обробки цифрових сигналів. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*. 2016. (2(49), С.97–100. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2009-2\(49\)-97-100](https://doi.org/10.26642/tn-2009-2(49)-97-100)
64. Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1989. Volume 11, Issue 7, pages 674–693. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.192463>

65. Chang S. G., Bin Yu, Vetterl M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2000. Volume 9 (9). DOI: <https://doi.org/10.1109/83.862633>
66. Gin D.B., Chugunov I.N., Shevelev A.E. Development of a technique for high-speed gamma-ray spectrometry. *Instruments and Experimental Techniques*. 2008. Volume 51. P. 240–245. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441208020152>
67. Рева С. М., Циблієв Д. О., Математичні моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, сер. «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2023. Том 58. С.64-74. DOI: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-01>
68. Adam Drozdek. *Data Structures and Algorithms in C++*. Second Edition. Brooks/Cole. 2001. 650 pages.
69. Стеценко І. В. *Моделювання систем: навчальний посібник*. М-во освіти і науки України, Черкаський державний технологічний університет. Черкаси. 2010. 399 с.
70. Reva S. M., Tsyblyiyev D. O. Computer methods of recognition and analysis of X-ray and gamma radiation parameters. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series “Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems”*. 2022. Volume 55, pp.38-48. DOI: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2022-55-04>
71. Циблієв Д. О., Рева С. М. Комп'ютерне моделювання та аналіз параметрів гамма-випромінювання. *Науковий збірник праці 9-ї міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання у наукоємних технологіях (КМНТ-2023)»*. Харків, 2023. С. 158–161.
72. Tsyblyiyev D. O., Reva S. M. Method of computer modeling of spectrometric signals with increased detailing. *IX International Scientific and Theoretical Conference «Theoretical and practical scientific achievements: research and results of their*

implementation». England, Liverpool, 2025. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-08.08.2025>

73. Рева С. М., Циблієв Д. О. Комп'ютерне моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2025. Том 65. С. 92-101. DOI: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-08>

74. Site of Microsoft .NET Framework. URL: <https://dotnet.microsoft.com/en-us/>

75. Site of QT Framework. URL: <https://www.qt.io/product/framework>

76. Site of Boost C++ Library. URL: <https://www.boost.org/libraries/latest/grid/>

77. Site of OpenCV C/C++ Library. URL: <https://opencv.org/releases/>

78. Meyers S. Effective Modern C++: 42 Specific Ways to Improve Your Use of C++11 and C++14. O'Reilly Media, Inc. Addison-Wesley, 2014, 320p.

79. Nicolai M. Josuttis. C++20 - The Complete Guide. Nicolai M. Josuttis, 2022. 768 pages.

80. Рева С. М., Циблієв Д. О. Розробка програмної платформи для комп'ютерного моделювання, аналізу та верифікації параметрів спектрометричних сигналів. Інформаційні технології та суспільство. 2025. (3 (18), 145-151. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.3.20>

81. Tsyblyiyev D. O., Reva S. M. Comparative analysis of computer methods for recognition and determination of parameters of spectrometric signals. XI International Scientific and Theoretical Conference «Scientific Forum: Theory and Practice of Research». USA, San-Francisco, 2026. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-13.03.2026>

82. Site of CAEN. Digitizer DT5730. URL: <https://www.caen.it/products/dt5730/>

83. Site of Maximus.Energy. The Rich Physics of Cs-137 Gamma Spectrum. URL: https://maximus.energy/index.php/2020/10/24/the-rich-physics-of-cs-137-gamma-spectrum/?srsltid=AfmBOoohdDdDpVWfs_ZoyAe61LhUG-D_bZDbP_cOOgrHEgZq8Jj0F6m9
84. Grinyov B. V., Ryzhikov V. D., Sidletskiy O. T. et al. Absolute light yield determination for LGSO:Ce, CWO, ZnSe:Al, and GSO:Ce crystals. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2010. Volume 57, Issue 3, pp. 1236-1240. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2047732>
85. Kajal Kumari, Mayank Goswami. Relative estimation of scattering noise and electronic noise of a radiation detector. Measurement Science and Technology. 2023. Volume 34 (12). DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6501/acdd88>
86. Site of allRadioactive. Radioactive Cobalt 60. URL: <https://allradioactive.com/cobalt-60/>

**Додаток А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЇ**

**Статті у наукових фахових виданнях, що входять до міжнародних
наукометричних баз**

1. Reva S., **Tsyblyiyev D.** Devising a computer method to recognize and analyze spectrometric signals parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6, No 9 (132). P. 86–96 (**Scopus**). DOI: 10.15587/1729-4061.2024.318558.

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Reva S.M., **Tsyblyiyev D.O.** Computer methods of recognition and analysis of X-ray and gamma radiation parameters. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series “Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems”*. 2022. Vol. 55. P.38-48. DOI: 10.26565/2304-6201-2022-55-04

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих методів розпізнавання параметрів рентгенівського і гамма-випромінювання та робіт присвяченій цій області, реалізація комп'ютерного моделювання цифрового образу спектрометричного сигналу, програмна реалізація методів спектрального аналізу та візуалізація результатів їх роботи, підготовка тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, перевірка тексту роботи, редагування та доповнення. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

3. Рева С. М., **Циблієв Д. О.** Математичні моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне*

модельовання. *Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2023. Т. 58. С. 64-74. DOI: 10.26565/2304-6201-2023-58-07

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих математичних моделей генерації цифрового спектрометричного сигналу, розробка моделей та алгоритмів комп'ютерного моделювання цифрового образу сигналу згідно заданого шаблону, програмна реалізація розроблених підходів та візуалізація симульованих даних, написання частини тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, розробка підходу до моделювання цифрового сигналу згідно заданих файлів-шаблонів, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, написання частини тексту статті, перевірка роботи. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

4. Рева С. М., **Циблієв Д. О.** Комп'ютерне моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2025. Т. 65. С. 92-101. DOI: 10.26565/2304-6201-2025-65-08

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих моделей та методів генерації цифрового спектрометричного сигналу, розробка та програмна реалізація алгоритмів комп'ютерного моделювання цифрового образу сигналу з підвищеною деталізацією, візуалізація симульованих даних, проведення програмних експериментів, написання частини тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, постановка проблеми, розробка підходу до моделювання цифрового сигналу з підвищеною деталізацією, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів,

написання частини тексту статті, перевірка тексту роботи. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

5. Рева С. М., **Циблієв Д. О.** Розробка програмної платформи для комп'ютерного моделювання, аналізу та верифікації параметрів спектрометричних сигналів. *Інформаційні технології та суспільство*. 2025. № 3 (18). С. 145-151. DOI: 10.32689/maur.it.2025.3.20

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих підходів та програмних засобів для спектрального аналізу, програмна реалізація розроблених алгоритмів комп'ютерного моделювання, аналізу та верифікації спектрометричних сигналів, візуалізація результатів обробки даних, опис архітектури створеної програмної платформи, підготовка тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, формулювання вимог до функціональності розробленого програмного засобу, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, перевірка тексту роботи, редагування та доповнення. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

6. Рева С. М., **Циблієв Д. О.** Розробка методу комп'ютерного аналізу параметрів спектрометричних сигналів з використанням дискретних вейвлет-перетворень. *Інформаційні технології та суспільство*. 2025. № 4 (19). С. 144-153. DOI: 10.32689/maur.it.2025.4.23

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих підходів та методів аналізу спектрометричних сигналів, розробка та програмна реалізація нового методу аналізу з використанням дискретних вейвлет-перетворень, порівняння з існуючими підходами, підготовка тексту статті. Результати наведені у відповідних частинах роботи.

Особистий внесок Рева С. М.: аналіз предметної області, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, перевірка тексту роботи, редагування та доповнення. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. **Циблієв Д. О.,** Рева С. М. Комп'ютерне моделювання та аналіз параметрів гамма-випромінювання. Науковий збірник праці 9-ї міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання у наукоємних технологіях (КМНТ-2023)». Харків, 2023. С. 158–161.

8. **Циблієв Д. О.,** Рева С. М. Комп'ютерне моделювання та аналіз параметрів спектрометричних сигналів. Науковий збірник праці 10-ї міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання у наукоємних технологіях (КМНТ-2024)». Харків, 2024.

9. **Tsyblyiyev D.,** Reva S. Method of computer modeling of spectrometric signals with increased detailing. IX International Scientific and Theoretical Conference «Theoretical and practical scientific achievements: research and results of their implementation». England, Liverpool, 2025. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-08.08.2025>

10. **Tsyblyiyev D.,** Reva S. Comparative analysis of computer methods for recognition and determination of parameters of spectrometric signals. XI International Scientific and Theoretical Conference «Scientific Forum: Theory and Practice of Research». USA, San-Francisco, 2026. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-13.03.2026>

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 21:50:17 11.05.2026

Назва файлу з підписом: Tsybliyev_Diss.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 6.1 МБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Tsybliyev_Diss.pdf
Розмір файлу без підпису: 6.8 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ЦИБЛІЄВ ДЕНИС ОЛЕКСАНДРОВИЧ
П.І.Б.: ЦИБЛІЄВ ДЕНИС ОЛЕКСАНДРОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 3064421219
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 21:50:15
11.05.2026
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер: 5E984D526F82F38F0400000087644701E6675607
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2026.04.06 13:00