

## 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 середи 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 діджітайзера 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 Cs<sup>137</sup> and Co<sup>60</sup> 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.*