

УДК 004.93:004.94

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.3.20>

**Сергій РЕВА**

кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та робототехніки,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
[ies-lab@karazin.ua](mailto:ies-lab@karazin.ua)

ORCID: 0000-0002-2615-9226

**Денис ЦИБЛІЄВ**

аспірант кафедри комп'ютерних систем та робототехніки,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
[dtsibliev@gmail.com](mailto:dtsibliev@gmail.com)

ORCID: 0009-0008-4373-8773

**РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ,  
АНАЛІЗУ ТА ВЕРИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ**

**Анотація.** Мета роботи. Стаття присвячена розробці програмної платформи, яка дозволяє комплексно досліджувати та використовувати методи комп'ютерного аналізу оцифрованих спектрометричних сигналів. Функціонал розробленого програмного засобу включає в себе моделювання цифрових образів сигналів з повністю відомими, регульованими параметрами, комп'ютерну обробку даних за допомогою існуючих або нових розроблених методів аналізу, а також програмну верифікацію та візуалізацію результатів роботи таких методів. Крім цього програма підтримує можливість завантаження даних, що були отримані під час реальних експериментів, та їх подальший аналіз для побудови спектрів.

**Методологія.** У статті наводиться детальний опис можливостей програмної платформи та її внутрішньої архітектури. Функціонал та графічний інтерфейс програми створені з використанням методів та технологій розробки програмного забезпечення на мові програмування C++ на основі фреймворку QT. Даний фреймворк є кросплатформним, що дозволяє компілювати та запускати розроблений додаток на різних операційних системах, таких як Windows та Linux. Для генерації цифрових образів спектрометричних сигналів застосовуються методи математичного та комп'ютерного моделювання. В процесі комп'ютерної обробки даних використовуються методи цифрової обробки сигналів, методи і алгоритми інтелектуального аналізу великих масивів даних. Наприкінці наводиться порівняльний аналіз результатів роботи декількох існуючих та нового методу комп'ютерного аналізу, що були отримані за допомогою створеного програмного засобу.

**Наукова новизна.** Вперше розроблено платформу (програмний засіб), яка надає можливості комплексного дослідження точності та швидкодії як відомих, так і нових розроблених методів комп'ютерного аналізу параметрів спектрометричних сигналів. Введено чіткі критерії оцінювання точності роботи (поняття верифікованої точності) того чи іншого методу комп'ютерної обробки на змодельованих даних, які перевіряються за допомогою програмно реалізованого алгоритму верифікації.

**Висновки.** Створений в ході дослідження програмний засіб дозволяє виконувати комп'ютерне моделювання спектрометричного сигналу із заданими, регульованими параметрами і здійснювати аналіз симульованих або завантажених з реальних експериментів даних за допомогою програмно реалізованих існуючих та запропонованих методів комп'ютерної обробки. Результати дослідження свідчать, що програма дозволяє обчислити та порівняти основні метрики роботи методів комп'ютерного аналізу, такі як швидкість обробки даних і точність розпізнавання основних параметрів імпульсів, а також візуалізувати результати. В перспективі функціональні можливості платформи можуть бути розширені шляхом додавання підтримки більшого числа методів комп'ютерного аналізу, що дозволить краще дослідити ефективність як відомих, так і нових методів комп'ютерної обробки спектрометричних сигналів.

**Ключові слова:** комп'ютерний аналіз спектрометричних сигналів, програмна платформа, комп'ютерне моделювання, алгоритми розпізнавання, комп'ютерна система, візуалізація даних, алгоритми верифікації.

**Sergiy REVA, Denys TSYBLYIEV. DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PLATFORM FOR COMPUTER MODELING,  
ANALYSIS AND VERIFICATION OF SPECTROMETRIC SIGNALS**

**Abstract. Purpose of the work.** The article is devoted to the development of a software platform that allows for the comprehensive study and use of methods of computer analysis of digitized spectrometric signals. The functionality of the developed software application includes modeling of digital signal images with fully known, adjustable parameters, computer data processing using existing or newly developed analysis methods, as well as software verification and visualization of the results of such methods. In addition, the program supports the ability to load data obtained during real experiments and their further analysis to construct spectra.

© С. Рева, Д. Циблієв, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

**Methodology.** The article provides a detailed description of the capabilities of the software platform and its internal architecture. The functionality and graphical interface of the program are created using methods and technologies of software development in the C++ programming language based on the QT framework. This framework is cross-platform, allowing you to compile and run the developed application on different operating systems, such as Windows and Linux. Mathematical and computer modeling methods are used to generate digital images of spectrometric signals. In the process of computer data analysis, digital signal processing methods, methods and algorithms for intelligent analysis of large data sets are used. At the end, a comparative analysis of the results of several existing and new computer analysis methods obtained using the created software is presented.

**Scientific novelty.** For the first time, a platform (software tool) has been developed that provides the ability to comprehensively study the accuracy and speed of both known and newly developed methods of computer analysis of spectrometric signal parameters. Clear criteria for assessing the accuracy of work (the concept of verified accuracy) of a particular computer processing method on simulated data, which is verified using a software-implemented verification algorithm, have been introduced.

**Conclusions.** The software application created during the research allows for computer modeling of a spectrometric signal with specified, adjustable parameters, as well as analysis of simulated or loaded from real experiments data using software-implemented existing and proposed computer processing methods. The results of the study show that the program allows you to calculate and compare the main metrics of the work of computer analysis methods, such as data processing speed and accuracy of recognition of the main pulse parameters, as well as visualize the results. In the future, the platform's functionality can be expanded by adding support for a larger number of computer analysis methods, which will allow for better research into the effectiveness of both known and new methods of computer processing of spectrometric signals.

**Key words:** computer analysis of spectrometric signals, software platform, computer modeling, recognition algorithms, computer system, data visualization, verification algorithms.

**Поставка проблеми.** 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 обробки даних та вимірювання спектрів. Під поняттям «спектрометричного сигналу» в цифровій спектрометрії іонізуючого випромінювання зазвичай розуміють послідовність імпульсів (рис. 1), які генеруються детекторами рентгенівського, гамма або іншого типу випромінювання, та оцифровуються за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) або діджитайзерів [1; 6]. Ці сигнали в оцифрованому вигляді являють собою великі масиви даних, які можуть бути оброблені методами комп'ютерного аналізу за певними алгоритмами з метою виявлення корисної інформації про матеріали і процеси, що досліджуються. Проте існує проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого методу комп'ютерної обробки, оскільки немає можливості отримання повністю достовірних вхідних даних через випадковість процесів на вході детектора. Ця проблема може бути віришена за допомогою комп'ютерного моделювання [4] цифрових образів сигналів із заздалегідь відомими параметрами та програмної верифікації результатів аналізу цих даних. Тому розробка програмної платформи, яка може здійснювати в комплексі комп'ютерне моделювання, аналіз та верифікацію параметрів спектрометричних сигналів є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження у галузі комп'ютерного аналізу спектрометричних сигналів часто підкреслюють важливість механізмів зменшення впливу електричного шуму в процесі обробки цифрових даних та спрямовані на покращення ефективності методів аналізу, особливо при частій суперпозиції імпульсів. Так, у роботі [12] було представлено метод аналізу оцифрованого спектрометричного сигналу отриманого зі сцинтиляційного детектора, одним з етапів роботи якого є фільтрація сигналу від шуму за допомогою застосування цифрових фільтрів (ковзне середнє, фільтр Бесселя, Чебишева або Баттерворта). У роботі [7] було запропоновано алгоритм

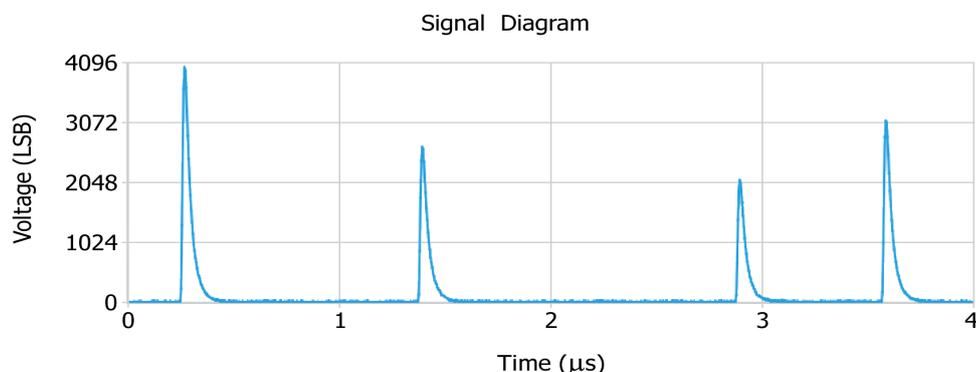


Рис. 1. Візуалізація оцифрованого спектрометричного сигналу

послаблення впливу суперпозиції імпульсів (pile-up ефекту) на результуючий спектр, що базується на розрідженій апроксимації сигналу для розділення накладених імпульсів та використанні методів регресійного аналізу Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO). Представлений підхід дозволив зменшити вплив pile-up ефекту та покращити результуючий досліджений спектр. Проте оскільки у вищезазначених працях перевірка роботи запропонованих алгоритмів проводилася тільки на реальних спектрах, аналіз результатів їх роботи на змодельованих, повністю відомих вхідних даних з додаванням механізму верифікації дозволив би краще дослідити точність розпізнавання імпульсів даними методами.

У роботах [5; 11] авторами було представлено підхід до комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів, а також детально досліджено та отримано порівняльні характеристики одразу кількох методів аналізу таких сигналів: методів Максимуму (Maximum), Сум (Sum), Підбору (Fitting) та Деконволюції (Deconvolution). За допомогою розробленого авторами програмного забезпечення (DeGaSum) 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 підходів було отримано спектри та проаналізовано їх характеристики. 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.

**Формулювання мети дослідження.** Метою даної роботи є створення програмного засобу для комплексного дослідження та оцінки ефективності методів комп'ютерного аналізу оцифрованих спектрометричних сигналів. А також детальний опис функціоналу розробленого додатку, його внутрішньої архітектури, принципів роботи та отриманих експериментальних результатів.

**Виклад основного матеріалу.** Для комплексного аналізу точності та швидкодії методів комп'ютерної обробки оцифрованих спектрометричних сигналів в рамках дослідження була розроблена програмна платформа, яка реалізує наступні можливості:

- 1) комп'ютерне моделювання (симуляція) цифрових образів спектрометричних сигналів, які за форматом відповідають вихідним даним діджитайзера та наближені до реальних сигналів, що отримуються під час проведення експериментів;
- 2) розпізнавання та вимірювання параметрів імпульсних сигналів за допомогою програмно реалізованих існуючих та нових розроблених методів аналізу;
- 3) верифікація точності аналізу та отримання метрик ефективності роботи різних методів комп'ютерної обробки;
- 4) візуалізація отриманих результатів.

Програмний засіб являє собою додаток для персональних комп'ютерів, який був розроблений на мові програмування C++ з використанням бібліотеки QT [8] (версії 6.4.0). Дана бібліотека була обрана через те, що містить широкий набір графічних компонентів для візуалізації даних, а також дозволяє створювати кросплатформне програмне забезпечення. Тому програмний засіб може бути встановлений на декілька різних операційних систем, зокрема на Windows та Unix-подібні ОС.

На (рис. 2) наводиться вигляд основного інтерфейсу користувача розробленої програми.

Головне вікно програми містить наступні групи елементів інтерфейсу користувача відповідно до свого функціоналу:

- 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.
- D. Діаграма відображення розподілу амплітуд (спектру) змодельованих/розпізнаних/верифікованих імпульсів.
- E. Діаграма відображення спектрометричного сигналу (симульованого або завантаженого з діджитайзера).

Моделювання спектрометричного сигналу. Додаток надає можливість моделювання образу сигналу зі сталим (константним) значенням амплітуд імпульсів (з опцією збереження симульованих даних у файл) або моделювання згідно попередньо завантаженого спеціального файлу-шаблону, який задає розподіл амплітуд імпульсів. Для генерації цифрового образу 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 працях [2; 3]. За необхідності можна також застосовувати і спеціально створені

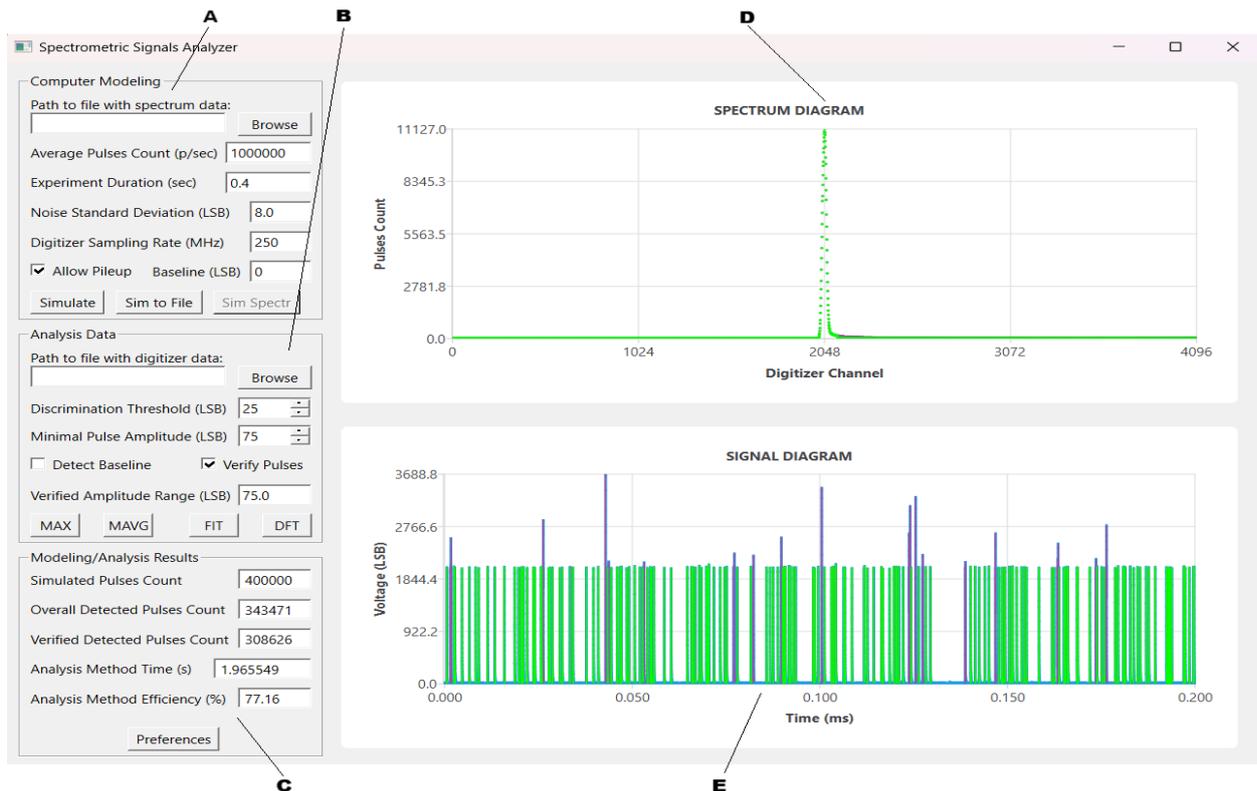


Рис. 2. Вигляд інтерфейсу користувача головного вікна розробленого програмного засобу

(ідеалізовані) функції розподілу. Миттєві значення сигналу відображаються в одиницях значення наймолодшого розряду діджитайзера (Least Significant Bit – LSB).

При симуляції цифрового образу сигналу можливо 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)

Окрім моделювання, в програмі була реалізована можливість завантаження цифрових даних, які були отримані під час реальних експериментів та оцифровані за допомогою діджитайзера. Діаграма Е візуалізує змодельований імпульсний сигнал або сигнал, що був завантажений з файлу з даними, записаними під час реальних експериментів.

Комп'ютерний аналіз, верифікація та відображення результатів. Для подальшого комп'ютерного аналізу було реалізовано два існуючі методи по визначенню параметрів спектрометричних сигналів – Максимуму (Maximum) та Підбору (Fitting), основні принципи роботи яких описано в статті [5]. Також було програмно реалізовано вдосконалений метод аналізу з механізмом фільтрації сигналу від шуму за допомогою фільтра ковзне середнє [9] та розроблений метод аналізу під назвою Відстеження [10] з використанням власних алгоритмічних підходів. Результати роботи вищезазначених методів візуалізуються у вигляді числових параметрів, часових діаграм сигналів та гістограм спектрів, побудованих на основі проведеного аналізу.

Для конфігурації роботи методів аналізу можливо вказати наступні параметри:

- Поріг дискримінації (в LSB).
- Мінімальне (порогове) значення амплітуди розпізнаного імпульса (в LSB).
- Необхідність визначення базової лінії сигналу (так/ні)

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

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 представлений у роботі [10], 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.

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 (рис. 2) відображає розподіл амплітуд (результуючий спектр) змодельованих, розпізнаних та верифікованих імпульсів та дозволяє наглядно побачити наскільки ці графіки співпадають між собою.

Окрім описаних вище елементів, в програмі реалізовані додаткові налаштування, які дозволяють змінювати параметри діаграм, що відображають спектрометричний сигнал та отриманий результуючий спектр після роботи методів комп'ютерної обробки даних.

Архітектура програми. Оскільки програмний засіб створений на об'єктно-орієнтованій мові програмування C++ з використанням бібліотеки QT, то загалом весь функціонал реалізований за допомогою об'єктів-класів, кожен з яких виконує свої певні задачі. На рисунку 3 зображена UML діаграма класів, що візуалізує внутрішню архітектуру програми, а саме основні розроблені компоненти (C++ класи, їх основні методи) та зв'язки між ними. Нижче наводяться опис класів представлених цій UML діаграмі та задач, які вони виконують:

- SSAnalyzerWnd – клас, що наслідуються від QWidget бібліотеки QT та реалізує функціонал/інтерфейс користувача головного вікна додатку, загальний вигляд якого був представлений на рисунку 2. Для реалізації комп'ютерного моделювання (симуляції) сигналу, програмного аналізу, відображення результатів та додаткових налаштувань даний клас агрегує інші об'єкти, 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 завантаження спеціальних файлів-шаблонів (\*.dat, \*.spr) для генерації цифрового образу сигналу згідно шаблонного розподілу амплітуд імпульсів використовуючи розроблені моделі і алгоритми моделювання описані в роботі [3].

- SignalAnalyzer – один з найбільших класів, який містить програмну реалізацію існуючих та розроблених методів аналізу спектрометричних сигналів. Методи AnalyzeMax, AnalyzeMAVRG, AnalyzeFitting, AnalyzeTracking відповідають за комп'ютерний аналіз цифрових даних методами Максимуму, Ковзне Середнє, Підбору, Відстеження відповідно. Окрім цього метод VerifyDetectedPulses цього класу містить програмну реалізацію алгоритму верифікації для співставлення згенерованих та розпізнаних імпульсів після аналізу з метою визначення верифікованої точності кожного з методів комп'ютерної обробки.

- PreferencesDialog – даний клас наслідуються від QDialog і реалізує відображення та функціонал вікна додаткових налаштувань програми. Містить методи для 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.

Порівняльний аналіз точності та швидкодії декількох методів комп'ютерної обробки. Використовуючи розроблений програмний засіб було проведено дослідження точності та швидкодії відомих методів аналізу спектрометричних сигналів (Максимуму та Підбору) і нового розробленого методу під назвою Відстеження [10] на змодельованих даних. Цифровий образ сигналу для подальшого аналізу було симульовано з наступними параметрами: рівень завантаження детектора (інтенсивність генерації імпульсів) –  $10^6$  імпульсів за секунду, тривалість експерименту – 0.4 секунди, загальна кількість

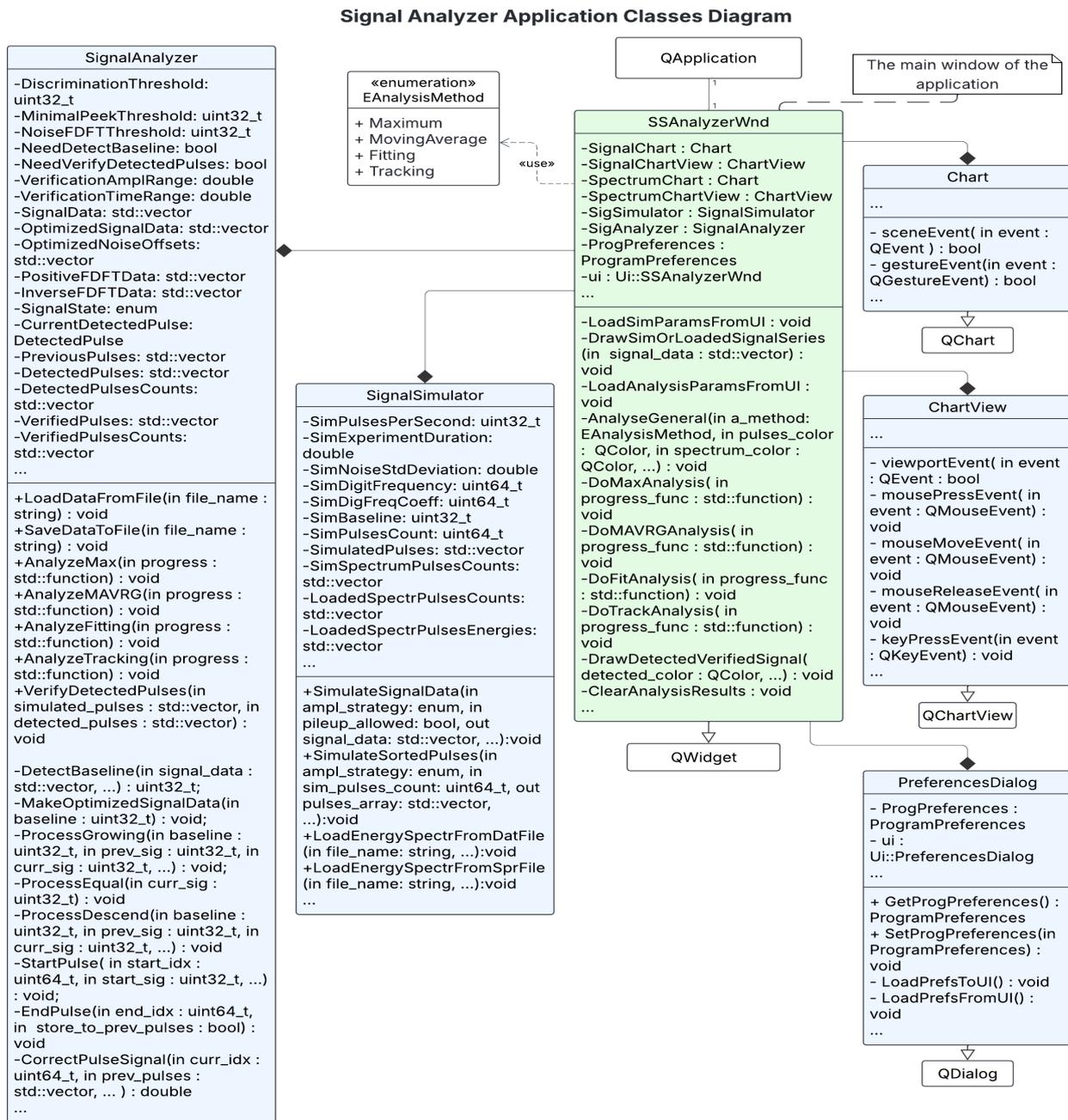


Рис. 3. UML діаграма класів, що реалізують функціонал додатку

змодельованих імпульсів – 400000, значення амплітуд кожного з імпульсів – 2048 LSB, середньоквадратичне відхилення рівня електричного шуму – 8 LSB, допустимий діапазон відхилення по амплітуді верифікованих імпульсів – 75 LSB. Порівняльні результати комп’ютерної обробки модельованих даних вищезазначеними методами аналізу наведені в (табл. 1).

Таблиця 1

**Результати роботи методів аналізу на змодельованих вхідних даних**

Назва методу	Кількість змодельованих імпульсів	Кількість загалом розпізнаних імпульсів	Кількість верифікованих імпульсів	Час роботи методу (сек)	Верифікована точність методу (%)
Максимуму	400000	343471	308626	1.965	77.16
Підбору	400000	390995	377920	5.919	94.48
Відстеження	400000	391349	378961	11.063	94.74

Як можна побачити з (табл. 1) в досліджуваному сценарії простий метод Максимуму продемонстрував найкращу швидкодюю, проте його верифікована точність є відносно низькою внаслідок того, що даний метод не здатний правильно розпізнавати імплітуди імпульсів при їх суперпозиції. Метод Відстеження показав на 18% кращу верифіковану точність аналізу, ніж метод Максимумів, та дещо кращу верифіковану точність, ніж існуючий метод Підбору.

Висновки. Розроблена в ході дослідження програмна платформа дозволяє комплексно оцінити 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. Наведені результати підтверджують, що такі дані можуть бути програмно проаналізовані за допомогою реалізованих існуючих та розроблених методів аналізу з метою визначення ключових параметрів сигналів та побудови спектрів. Чіткі критерії точності розпізнавання параметрів імпульсів, які були введені в рамках дослідження, та механізм програмної верифікації дозволили більш об'єктивно оцінити і порівняти точність різних підходів спектрального аналізу.

В подальшому функціональні можливості програмного засобу можуть бути розширені шляхом додавання підтримки більшого числа методів обробки даних, що дозволить краще дослідити ефективність як відомих, так і нових розроблених методів комп'ютерного аналізу спектрометричних сигналів.

#### Список використаних джерел:

1. Грабовський В. А. Прикладна спектрометрія йонізуючих випромінювань: Навчальний посібник. Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка. 2008. 296 с.
2. 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»*. 2024. Том 65. С. 64–73. URL: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-06>
3. 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. URL: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/23502>
4. Averill M. Law, W. David Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. Third edition. McGraw-Hill. 2000. 760 pages.
5. Khilkevitch E. M., Shevelev A. E., Chugunov I. N., Iliasova M. V., Doinikov, D. N., Gin D. B. et al. 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 977, 164309. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164309>
6. Knoll G. F. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons. 2010. 864 pages.
7. Lopatin M., Moskovitch N., Trigano T., Sepulcre Y. Pileup attenuation for spectroscopic signals using a sparse reconstruction. *IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*. 2012. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/eeei.2012.6377045>
8. QT Framework Official Website. URL: <https://www.qt.io/product/framework>
9. Reva S. M., Tsyblyiev 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. URL: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/22593>
10. Reva S. M., Tsyblyiev D. O. Devising a computer method to recognize and analyze spectrometric signals parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 6(9 (132)), 86–96. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318558>
11. Shevelev A. E., Khilkevitch E. M., Lashkul S. I., Rozhdestvensky V. V., Altukhov A. B., Chugunov I. N. 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, pp. 102–108. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.075>
12. 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, pp. 30–35. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.080>

Дата надходження статті: 17.09.2025

Дата прийняття статті: 20.10.2025

Опубліковано: 04.12.2025