DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-08

УДК (UDC) 004.93:004.94

Рева Сергій Миколайович
к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних систем та робототехніки
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: iec-lab@karazin.ua
https://orcid.org/0000-0002-2615-9226

Циблієв Денис Олександрович
аспірант кафедри комп'ютерних систем та роботехніки
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи,4, Харків, Україна, 61022
e-mail:dtsibliev@gmail.com;
https://orcid.org/0009-0008-4373-8773

Комп'ютерне моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією

Актуальність. Комп'ютерні методи аналізу оцифрованих спектрометричних сигналів набули широкого розвитку. Разом з тим, має місце проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого методу цифрової обробки через випадковість процесів на вході детектора випромінювання, яка може бути вирішена за допомогою комп'ютерного моделювання образів сигналів із повністю відомими параметрами. Для більшої відповідності реальним оцифрованим імпульсним сигналам, алгоритми моделювання мають реалізовувати можливість випадкового зміщення часу виникнення і амплітуди імпульсів відносно точок дискретизації.
Метою дослідження є підвищення точності комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів шляхом розробки алгоритмів моделювання зі збільшеною деталізацією цифрового образу сигналу. Додатковим завданням є оцінка максимальної похибки при визначенні параметрів імпульсів простими методами аналізу, що виникає при визначенні амплітуди імпульсів та яка зумовлена самим процесом дискретизації на різних частотах.
Методи дослідження базуються на математичному та комп'ютерному моделюванні, включають в себе чисельні методи та використовують власні розроблені алгоритми. В рамках дослідження розробляється програма, яка здатна генерувати цифрові образи спектрометричних сигналів із заданими параметрами та містить програмно реалізовані методи їх аналізу.
Результати. Було розроблено підхід до моделювання імпульсних сигналів з використанням регульованого коефіцієнту деталізації їх амплітудних та часових параметрів. Використовуючи даний підхід, згенеровано деталізований образ сигналу зі сталою амплітудою імпульсів і випадковим розподілом їх у часі, проведено моделювання процесу його дискретизації при різних тактових частотах. Отримані дані проаналізовано методом Максимуму та визначено максимальні значення похибок при розпізнаванні амплітуд, які зумовлені самим процесом дискретизації.
Висновки. 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 діджітайзерів. Отримані результати досліджень з використанням створених алгоритмів свідчать про те, що для мінімізації похибок, зумовлених дискретизацією, потрібно застосовувати діджітайзери з тактовою частотою понад 1 ГГц або використовувати математичні методи відновлення інформації, частково втраченої в результаті процесу дискретизації.

Ключові слова: *комп'ютерне моделювання, спектрометричні сигнали, діджітайзер, методи аналізу оцифрованих сигналів, похибка дискретизації.*

Як цитувати: 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. вип. 65. С. 92-101. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-08

How to quote: S. Reva, and D. Tsybliyev, "Computer modeling of spectrometric signals with increased detailing", *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 65, pp. 92-101, 2025. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-08 [in Ukrainian]

© Рева С. М., Циблієв Д. О., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

1. Вступ. Актуальність дослідження

Комп'ютерні методи аналізу оцифрованих спектрометричних сигналів, зокрема рентгенівського та гамма-випромінювання, набули широкого розвитку за останні десятки років. Під поняттям «спектрометричного сигналу» зазвичай розуміють послідовність імпульсів, яка генеруються детекторами рентгенівського, гамма та іншого іонізуючого випромінювання [1]. 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. Провідні компанії, які займаються їх розробкою та виробництвом, сьогодні пропонують широкий асортимент таких пристроїв [2]. Частота дискретизації (оцифрування) вхідного аналогового сигналу в залежності від моделі може становити від 100 МГц до 3 ГГц і навіть більше. Загалом сигнали, що надходять на вхід оцифровувача, можуть бути попередньо оброблені за допомогою тих чи інших аналогових пристроїв, що відфільтровують їх від шуму, змінюють форму, тощо, однак при цьому не змінюється їх призначення: вони несуть в собі інформацію про енергію частинок випромінювання, що були зареєстровані детектором, і можуть бути оброблені методами комп'ютерного аналізу для побудови енергетичного спектру та інших досліджень. 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. Проте, існує проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого комп'ютерного методу аналізу, 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 цифрових вхідних даних із заздалегідь відомими параметрами.

Так, у роботі [3] була представлена формула моделювання цифрового сигналу, що відповідає сигналу реєстрації гамма-квантів у сцинтиляційному детекторі в аналітичній формі. Оскільки аналоговий сигнал з детектора оцифровується діджітайзером з певною частотою дискретизації, то також була наведена формула генерації сигналу в дискретній формі, яка має наступний вигляд:

$$s_i = z_i + n_i + \sum_{j=0}^{L} A_j\, p(i - t_j)\,, \tag{1.1}$$

де i – порядковий номер дискретного кадру з діджітайзера, 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 (більш детально описана в статті [3]).

Як було розглянуто в роботі [4], використовуючи формулу (1.1) можна програмно згенерувати цифровий образ сигналу для певної частоти дискретизації діджітайзера, наприклад 250 МГц, 500 МГц, тощо. Приклад схематичної візуалізації такого цифрового сигналу, який не містить електричний шум, наводиться на рисунку 1.1. 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.

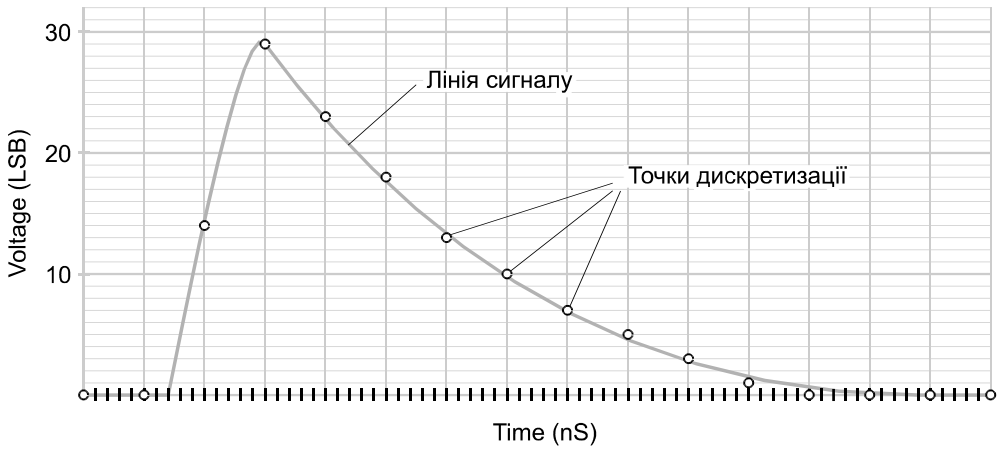

Рис. 1.1 Візуалізація імпульсного сигналу з відміченими точками дискретизації (оцифрування)
Fig. 1.1 Visualization of a pulse signal with marked sampling points (digitization)

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 1.2. 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.

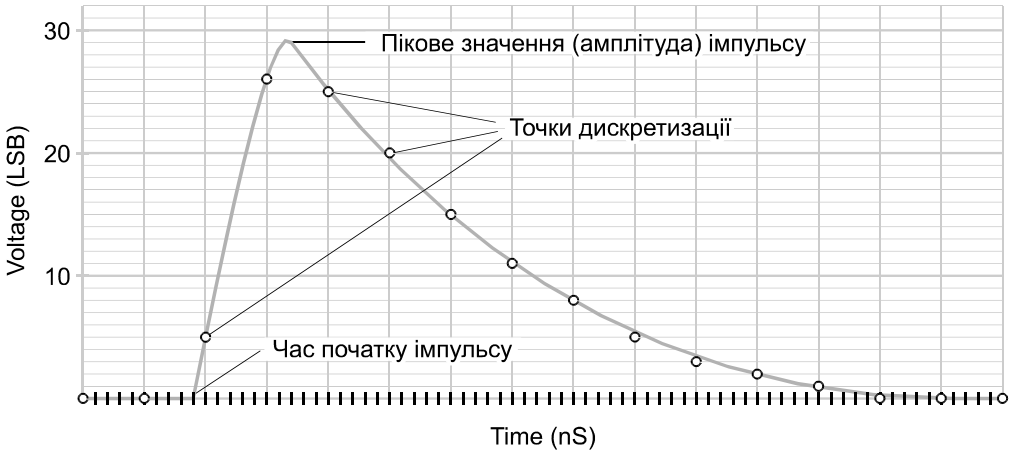

Рис. 1.2 Візуалізація імпульсного сигналу зі зміщенням часу появи та амплітуди імпульсу відносно точок дискретизації
Fig. 1.2 Visualization of a pulse signal with a shift in the time of occurrence and amplitude of the pulse relative to the sampling points

При розробці алгоритмів моделювання важливо врахувати ці фактори. Тому, насамперед, актуальною задачою є розробка моделі та алгоритмів, які дозволяють генерувати цифровий образ сигналу з підвищеною деталізацією та можливим зміщенням фаз імпульсів відносно точок дискретизації, що зробить змодельований сигнал більш наближеним до даних, що отримуються під час реальних експериментів. Також актуальним завданням є моделювання ідеалізованого сигналу з відомими параметрами та визначення величини максимальної похибки при розпізнаванні амплітуди імпульсів простими методами аналізу, яку може вносити дискретизація аналогового сигналу, в залежності від частоти оцифрування. На практиці це може бути використано з метою тестування при створенні нових та вдосконаленні існуючих комп'ютеризованих систем для спектрального аналізу. Окрім цього, дані про максимальну похибку дискретизації сигналу можуть допомогти при виборі найбільш підходящої моделі оцифровувача і частоти оцифрування для умов конкретного експерименту.

2. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення точності комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів шляхом розробки математичної моделі та алгоритмів моделювання з покращеною деталізацією цифрового образу сигналу. Це дасть можливість моделювати масиви даних, які є більш наближеними до реальних сигналів, та дослідити ефективність роботи методів спектрометричного аналізу. Окрім цього, генерація образу сигналу з урахуванням можливого зміщення фази імпульсів відносно точок дискретизації дозволить оцінити похибку при визначенні параметрів імпульсів (час реєстрації, амплітуда), яка зумовлена оцифруванням аналогового сигналу діджітайзером з певною частотою.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі:

- розробити підхід до моделювання спектрометричного імпульсного сигналу з використанням регульованого коефіцієнту деталізації процесу генерації цифрового образу сигналу;
- змоделювати еталонні вхідні дані для комп'ютерного аналізу з ідеалізованим (сталим) розподілом амплітуд імпульсів використовуючи розроблені алгоритми;
- виконати програмний аналіз еталонного цифрового сигналу методом Максимуму та визначити величину максимальної похибки при розпізнаванні амплітуд імпульсів, що зумовлена дискретизацією аналогового сигналу, для різних частот оцифрування сигналу діджітайзером.

3. Методи дослідження

Теоретичні основи дослідження базуються на використанні: математичного та комп'ютерного моделювання, чисельних методів, алгоритмів аналітичної обробки та інтелектуального аналізу великих масивів даних. Крім цього, були використані методи візуалізації інформації та власні розроблені алгоритми.

В ході дослідження розробляється програма, що реалізує можливість комп'ютерного моделювання [5] цифрового образу спектрометричного сигналу. Додаток надає можливість симулювати наближений до реального сигнал з попередньо вказаним законом розподілу амплітуд імпульсів, ідеалізований сигнал (зі сталим або лінійним розподілом амплітуд) або завантажити дані, отримані безпосередньо за допомогою діджітайзера. Однак, на відміну від чітко визначеного спектрального складу, під час симуляції програма забезпечує випадковий розподіл імпульсів у часі, що наближує результат до даних реального експерименту та створює деяку неоднозначність цифрового образу сигналу.

В програмі було реалізовано два існуючі методи по визначенню параметрів спектрометричних сигналів (метод Максимуму та метод Підбору). Також був розроблений новий метод аналізу під назвою Відстеження [6] 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 перевірки правильності розпізнавання було розроблено алгоритм верифікації, який порівнює згенеровані імпульси із розпізнаними в межах допустимих діапазонів відхилення, які можуть бути задані в інтерфейсі програми. Додаток розробляється на мові програмування C++ (стандарту 14, 17) [7, 8] з використанням бібліотеки QT [9]. Ця бібліотека була обрана через те, що містить широкий набір графічних компонентів для візуалізації даних, а також дозволяє створювати кросплатформне програмне забезпечення.

4. Результати

4.1. Реалізація підходу до моделювання спектрометричного імпульсного сигналу з використанням регульованого коефіцієнту деталізації процесу генерації цифрового 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 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 + δ, 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 діджітайзера, яка задається в інтерфейсі програми, було введено поняття коефіцієнту деталізації молодшого розряду діджітайзера (LSB) – D_{coeff}. Таким чином, програмна генерація сигналу виконується з частотою дискретизації F_m, яка виражається наступною формулою:

$$F_m = F_d \times D_{coeff} \tag{4.1}$$

Значення коефіцієнту D_{coeff} може змінюватися в налаштуваннях додатку і по замовчуванню є рівним десяти, щоб забезпечувати дискретність, яка на порядок перевищує задану частоту оцифрування при моделюванні експерименту. Використовуючи формулу (1.1) ми можемо програмно згенерувати масив значень сигналу *S[i]*, розмір якого обчислюється за формулою:

$$S_{size} = F_d \times D_{coeff} \times T\ , \tag{4.2}$$

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

На рисунку 4.1 наведено приклад візуалізації згенерованого в додатку імпульсного сигналу з амплітудою 2048 LSB при заданій частоті діджітайзера 250 МГц і коефіцієнті деталізації рівним 12ти (тобто програмний алгоритм генерації цифрових даних виконується з частотою дискретизації 3.0 ГГц). Точки дискретизації програмно візуалізовано для частоти дискретизації 250 МГц.

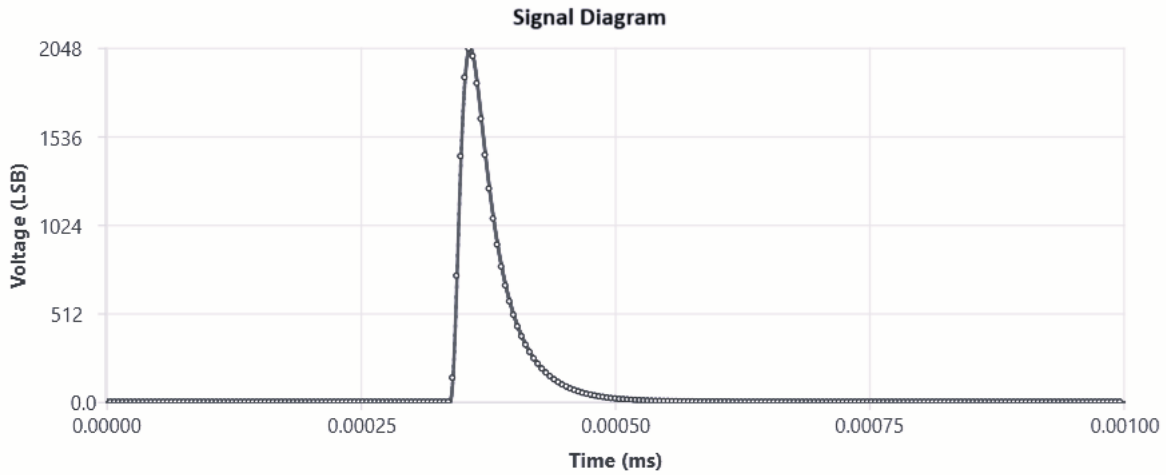

Рис. 4.1 Візуалізація згенерованого імпульсного сигналу з точками дискретизації (оцифрування)
Fig. 4.1 Visualization of the generated pulse signal with sampling points (digitization)

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 діджітайзера 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, LSB) тільки з частотою оцифрування діджітайзера (F_d), який використовується в обладнанні експерименту. Тому, в алгоритмах аналізу програмна ітерація по масиву даних *S[i]*, що містить значення змодельованого сигналу (float) 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 діджітайзера, якому відповідає змодельоване деталізоване значення сигналу (число з плаваю точкою), це значення повинне округлятися до найближчого цілого числа. Наприклад, значення сигналу від 6.5 до 7.4999… будуть потрапляти в канал діджітайзера під номером 7.

4.2. Моделювання еталонних вхідних даних для комп'ютерного аналізу з ідеалізованим (сталим) розподілом амплітуд імпульсів

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 (тобто всі імпульси мали однакову амплітуду) для різних частот оцифрування діджітайзером. Сеанси моделювання було виконано з наступними параметрами:

- 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 (діджітайзера);
- рівень електричного шуму, що накладається на сигнал (n) – 0 LSB;
- частоти оцифрування діджітайзером (F_d) – 100 МГц, 250 МГц, 500 МГц, 750 МГц, 1 ГГц, 1.5 ГГц, 2 ГГц.
- коефіцієнти деталізації молодшого розряду діджітайзера (D_{coeff}) для вищезазначених частот оцифрування відповідно – 60, 24, 12, 8, 6, 4, 3;

Коефіцієнти деталізації молодшого розряду діджітайзера (D_{coeff}) було обрано таким чином, щоб внутрішня програмна генерація значень сигналу для кожної частоти оцифрування діджітайзера F_d відбувалося на однаковій частоті дискретизації F_m рівній 6 ГГц (згідно формули (4.1)). 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 4.2, де відображається частина змодельованого сигналу зі сталим розподілом амплітуд імпульсів.

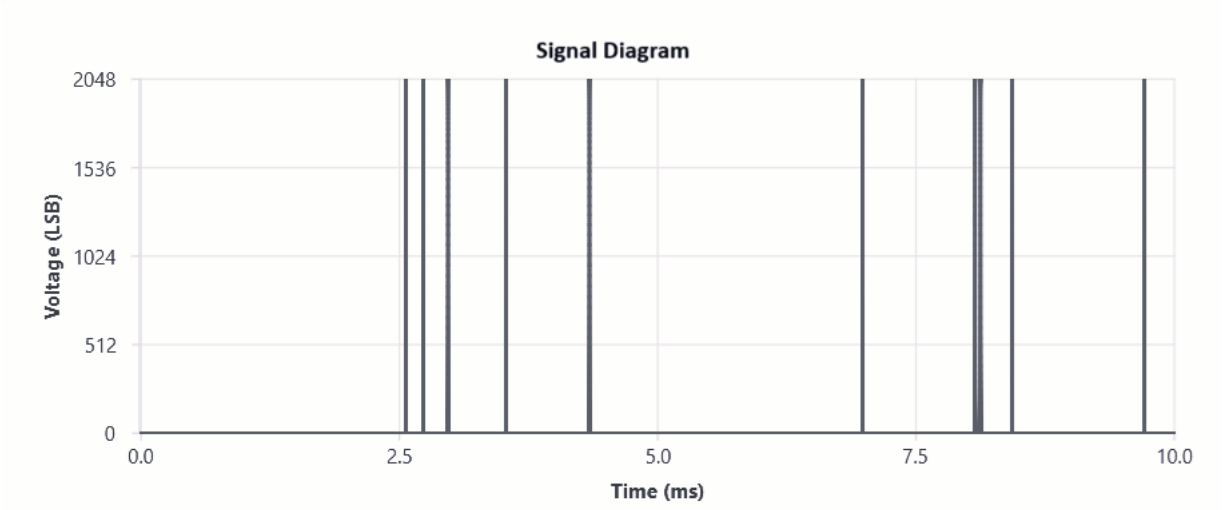

Рис. 4.2 Програмно згенерований сигнал зі сталим розподілом амплітуд імпульсів
Fig. 4.2 Software-generated signal with constant pulse amplitude distribution

4.3. Програмний аналіз еталонного цифрового сигналу методом Максимуму та визначення максимальної величини похибки при розпізнаванні амплітуд імпульсів, що зумовлена дискретизацією аналогового сигналу

З метою визначення величини максимальної похибки при визначенні амплітуд імпульсів, яку може вносити оцифрування сигналу, змодельований еталонний монохромний сигнал був проаналізований методом Максимуму [3]. Даний метод є досить простим, принцип його роботи полягає в наступних кроках:

1. Визначення набору інтервалів, на яких значення сигналу перевищує значення базової лінії (рівень електричного сигналу за умови відсутності імпульсів у поточний період часу) на величину встановленого порогу (регульований параметр методу). Тобто, для кожного значення сигналу s_i потрібно знайти всі інтервали індексів $B_j...E_j$, в яких $\forall i \in [B_j..E_j] : |s_i| > r$, 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.

Як зазначалося раніше, алгоритми методів аналізу, зокрема методу Максимуму, працюють лише з точками дискретизації сигналу з частотою діджітайзера 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 4.3 візуалізовано розподіл амплітуд (спектр) імпульсів, розпізнаних методом Максимуму, для вхідних даних змодельованих з частотою оцифрування 250 МГц та коефіцієнтом деталізації молодшого розряду діджітайзера рівним 24. 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. В таблиці 1 наводяться підсумкові результати, які містять максимальні значення похибок (в LSB) при визначенні амплітуд імпульсів методом Максимуму для різних значень частот оцифрування діджітайзером.

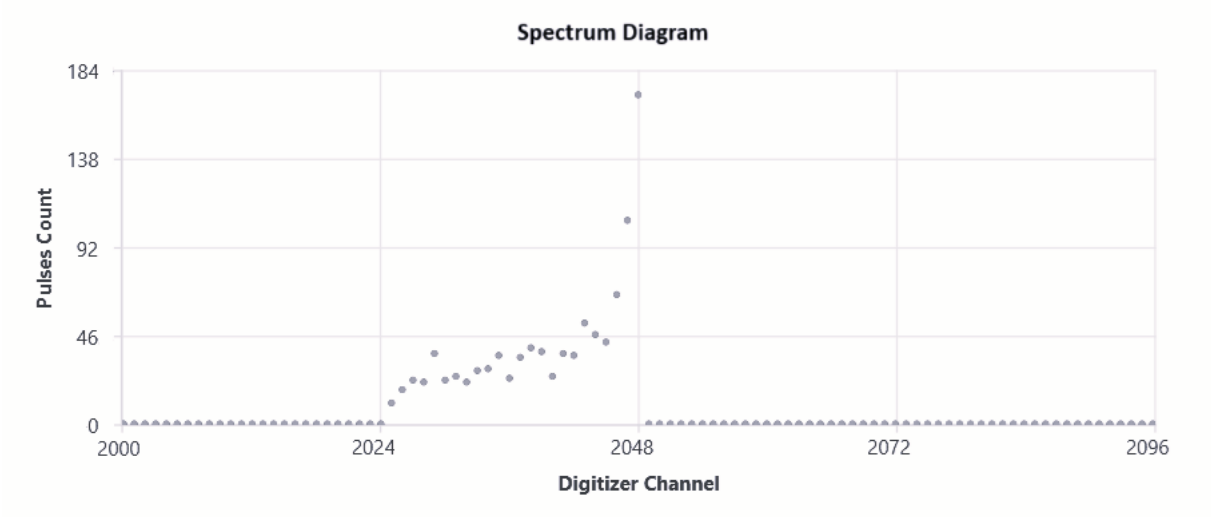

Рис. 4.3 Розподіл амплітуд (спектр) імпульсів, розпізнаних методом Максимумів для сценарію моделювання з частотою 250 МГц та коефіцієнтом деталізації рівним двадцяти чотирьом
Fig. 4.3 Distribution of amplitudes (spectrum) of pulses recognized by the Maximum method for a simulation scenario with a frequency of 250 MHz and a resolution coefficient equal to twenty-four

Таблиця 1. Дані про значення максимальної похибки дискретизації при визначенні амплітуди імпульсів в залежності від частоти оцифрування діджітайзера
Table 1. Values of maximum sampling error when determining pulse amplitude depending on the digitizer sampling frequency

Частота оцифрування (МГц)	Коефіцієнт деталізації молодшого розряду діджітайзера	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

З даних наведених в таблиці 1 можна побачити, що при частоті оцифрування діджітайзером 100 МГц максимальна похибка дискретизації сигналу є досить великою і становить близько 137 LSB. При використанні діджітайзера з частотою оцифрування 1 ГГц і 1.5 ГГц значення такої похибки становить 1 LSB, а при частоті 2 ГГц і вище – 0 LSB. Для досягнення максимальної точності вимірювання амплітуд імпульсів ці дані потрібно враховувати при виборі моделі оцифровувача та частоти дискретизації сигналу для конкретного експерименту.

Висновки

1. В рамках дослідження було розроблено підхід до комп’ютерного моделювання оцифрованих спектрометричних сигналів з використанням регульованого коефіцієнту деталізації молодшого розряду оцифровувача. Це дозволяє програмно генерувати цифровий образ сигналу з дискретністю, яка на порядок або більше перевищує частоту оцифрування діджітайзером, та враховує можливе зміщення фаз імпульсів відносно точок дискретизації. Таке моделювання спектрометричного сигналу є більш наближеним до оцифрованих сигналів, отриманих під час реальних експериментів. В подальшому використання розроблених алгоритмів моделювання та створеного програмного забезпечення дозволять краще дослідити ефективність комп’ютерних методів розпізнавання і аналізу параметрів спектрометричних сигналів.

2. Було програмно реалізовано розроблені алгоритми моделювання та згенеровано еталонні вхідні дані 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 дозволив визначити величину похибки при визначенні амплітуд імпульсів, яка зумовлена дискретизацією аналогового сигналу.

3. Було визначено максимальні значення похибок дискретизації сигналу для різних частот оцифрування діджітайзером, шляхом програмного аналізу еталонного сигналу методом Максимуму та застосування алгоритму верифікації розпізнаних імпульсів. Наведені результати свідчать, що для мінімізації похибки визначення амплітуди (досягнення рівня 1 LSB або менше), яку вносить дискретизація аналогового сигналу, потрібно використовувати діджітайзери з частотою дискретизації 1 ГГц або вище. Врахування впливу такої похибки може бути особливо важливим при проведені реальних експериментів з використанням напівпровідникових або сцинтиляційних детекторів з низьким рівнем власних шумів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, 2010, 864p.
2. Spectrum Instrumentation Official Website. URL: https://spectrum-instrumentation.com/products/digitizer/index.php (дата звернення: 05.04.2025)
3. E.M. Khilkevitch, A.E. Shevelev, I.N. Chugunov, M.V. Iliasova, D.N. Doinikov, D.B. Gin, V.O. Naidenov, I.A. Polunovsky, 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. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900220307051 (дата звернення: 05.04.2025)
4. 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. т. 58. С.64-74. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-01 (дата звернення: 05.04.2025)
5. A. M. Law, W. D. Kelton, Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, 2000, 760p.
6. Рева, С.М., Циблієв, Д.О., Розробка комп’ютерного методу розпізнавання та аналізу параметрів спектрометричних сигналів. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Т. 6, 9 (132), 86–96. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318558 (дата звернення: 05.04.2025)
7. S. Meyers, Effective Modern C++: 42 Specific Ways to Improve Your Use of C++11 and C++14. O'Reilly Media, Inc. Addison-Wesley, 2014, 320p.
8. A. Drozdek, Data Structures and Algorithms in C++. Brooks/Cole, 2001, 650p.
9. QT Framework Official Website. Available at: https://www.qt.io/product/framework (дата звернення: 05.04.2025)

REFERENCES

1. G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, 2010, 864p.
2. Spectrum Instrumentation Official Website. URL: https://spectrum-instrumentation.com/products/digitizer/index.php (last accessed: 05.04.2025)
3. E.M. Khilkevitch, A.E. Shevelev, I.N. Chugunov, M.V. Iliasova, D.N. Doinikov, D.B. Gin, V.O. Naidenov, I.A. Polunovsky, 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. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900220307051 (last accessed: 05.04.2025)
4. S.M. Reva, D.O. Tsybliyev, “Mathematical models and algorithms of computer modeling of spectrometric signals” Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems, vol. 58, pp.64-74, 2023. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-01 (last accessed: 05.04.2025)
5. A. M. Law, W. D. Kelton, Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, 2000, 760p.

6. S. M. Reva, D.O. Tsybliyev, Devising a computer method to recognize and analyze spectrometric signals parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Volume 6 (9 (132), 86–96. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318558 (last accessed: 05.04.2025)
7. S. Meyers, Effective Modern C++: 42 Specific Ways to Improve Your Use of C++11 and C++14. O'Reilly Media, Inc. Addison-Wesley, 2014, 320p.
8. A. Drozdek, Data Structures and Algorithms in C++. Brooks/Cole, 2001, 650p.
9. QT Framework Official Website. Available at: https://www.qt.io/product/framework (last accessed: 05.04.2025)

Reva Sergiy *Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Computer Systems and Robotics; V. N. Karazin National University, Svobody Sq. 4, Kharkiv, Ukraine, 61022*
e-mail: iec-lab@karazin.ua;
https://orcid.org/0000-0002-2615-9226

Tsybliyev Denys *PhD Student, V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq. 4, Kharkiv, Ukraine, 61022*
e-mail: dtsibliev@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-4373-8773

Computer modeling of spectrometric signals with increased detailing

Relevance. Computer methods for analyzing digitized spectrometric signals have been widely developed. However, there is a problem of objectively assessing the effectiveness of a particular digital processing method due to the randomness of processes at the input of the radiation detector, which can be solved by computer modeling of signal images with fully known parameters. To better match real digitized pulse signals, simulation algorithms should implement the possibility of a random shift in the time of occurrence and amplitude of pulses relative to the digitizer sampling points.
The goal of the research is to increase the accuracy of computer modeling of spectrometric signals by developing modeling algorithms with increased detailing of the digital signal image. An additional task is to estimate the maximum margin of error in determining pulse parameters using simple analysis methods, which arises when determining the pulse amplitude and which is caused by the process of discretization at different frequencies.
Research methods are based on mathematical and computer modeling, include numerical methods, and use proprietary algorithms. As part of the research, an application is being developed that is capable of generating digital images of spectrometric signals with specified parameters and contains software-implemented methods for their analysis.
The results. An approach to modeling pulse signals using an adjustable coefficient of their amplitude and time parameters detailing was developed. Using this approach, a detailed image of a signal with a constant amplitude of pulses and their random distribution in time was generated, and the modeling of its discretization process was carried out at different clock frequencies. The obtained data were analyzed using the Maximum method and the maximum margins of errors in recognizing amplitudes, which are caused by the discretization process itself, were determined.
Conclusions. The developed modeling algorithm allows to programmatically generate a digital image of a signal with a discreteness that brings it closer to a real analog signal. At the same time, the accuracy of its simulation exceeds the resolution of modern digitizers by at least an order of magnitude. The results of research using the developed algorithms indicate that to minimize margin of errors caused by discretization, it is necessary to use digitizers with a clock frequency of more than 1 GHz or to use mathematical methods to restore information partially lost as a result of the discretization process.

Keywords: *computer modeling, spectrometric signals, digitizer, digitized signals analysis methods, discretization margin of error.*

Надійшла у першій редакції 25.02.2025, в останній - 27.03.2025.
The first version has been received on 25.02.2025, the final version - on 27.03.2025.