

## ПРОТОТИП ЦИФРОВОГО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ТРАКТА ДЛЯ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ GABRIELA И ПЕРВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

*Р. С. Мухин<sup>а, 1</sup>, А. В. Ерёмин<sup>а, б</sup>, И. Н. Изосимов<sup>а</sup>,  
А. В. Исаев<sup>а</sup>, А. А. Кузнецова<sup>а</sup>, О. Н. Малышев<sup>а, б</sup>, А. Г. Попеко<sup>а, б</sup>,  
Ю. А. Попов<sup>а, б</sup>, Б. Сайлаубеков<sup>а</sup>, А. И. Свирихин<sup>а, б</sup>, Е. А. Сокол<sup>а</sup>,  
М. С. Тезекбаева<sup>а, в</sup>, М. Л. Челноков<sup>а</sup>, В. И. Чепигин<sup>а</sup>, К. Хошилд<sup>з</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

<sup>в</sup> Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

<sup>з</sup> IJCLab, IN2P3-CNRS, Университет Париж–Сакле, Орсе, Франция

Описан прототип цифрового спектрометрического тракта для детектирующей установки GABRIELA. Цифровой алгоритм призван уменьшить мертвое время тракта до десятков наносекунд без потери энергетического и временного разрешения. Приведены структура и временные диаграммы работы алгоритма. Также представлены энергетическое разрешение алгоритма в сравнении с существующей аналоговой системой и результаты первого запуска на пучке.

This paper describes a prototype digital spectrometric tract for the GABRIELA detector. The digital algorithm is designed to reduce the dead time of the tract to tens of nanoseconds without loss of energy and time resolution. The structure and timing diagrams of the algorithm are given. The paper also shows the energy resolution of the algorithm in comparison with the existing analogue system and the results of the first run on a beam.

PACS: 29.50.Vx; 07.50.Qx; 06.30.-k

### ВВЕДЕНИЕ

Современные эксперименты в области ядерной спектроскопии с каждым годом предъявляют всё более высокие требования к точности измерения энергетических и временных характеристик. Добиться выполнения этих требований можно совместно двумя подходами: 1) улучшением детектирующей системы: модернизацией существующих детекторов либо поиском принципиально новых методов детектирования (как правило, сделать это в условиях исследовательской лаборатории сложно или даже

---

<sup>1</sup>E-mail: rmukhin@jinr.ru

невозможно из-за технологических требований; 2) улучшением параметров измерительного тракта, что и является объектом обсуждения данной работы.

В Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ на сепараторе SHELS (the Separator for Heavy Element Spectroscopy) проводятся эксперименты по спектроскопии трансфермиевых элементов с использованием детектирующей системы GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the Electromagnetic Analyzer) [1]. В настоящее время спектрометрический тракт представляет собой классическую аналоговую систему «предусилитель – формирующий усилитель – пиковый детектор – АЦП – анализатор», работающую по стандарту КАМАК [2]. Подобная система является надежной и позволяет получать отличное энергетическое разрешение. Однако классический аналоговый спектрометрический тракт обладает и рядом недостатков: 1) сложностью модернизации системы; 2) большим мертвым временем, складывающимся из мертвых времен компонентов тракта. Это делает невозможным изучение короткоживущих изотопов, периоды полураспада которых меньше 1 мкс.

Проблемы классического аналогового спектрометрического тракта призван решить новый цифровой тракт, который состоит из предусилителя, АЦП и анализатора. Данная система за счет уменьшения количества составляющих в цепи позволит существенно уменьшить мертвое время тракта, в перспективе — до десятков наносекунд против единиц микросекунд существующего аналогового тракта без потери энергетического и временного разрешения.

## АЛГОРИТМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

При регистрации частицы полупроводниковый детектор генерирует короткий зарядовый сигнал, амплитуда которого прямо пропорциональна энергии зарегистрированной частицы. Он попадет на вход зарядочувствительного предусилителя (ПУ), где преобразовывается в сигнал напряжения. Сигнал, выходящий с ПУ, является сверткой входного сигнала с детектора и переходной функции ПУ.

Форма сигнала с ПУ оцифровывается с помощью высокоскоростного АЦП и может быть обработана программно. Цифровой подход к обработке спектрометрических сигналов позволяет использовать продвинутый математический аппарат к измеряемым сигналам [3]. Это позволяет реализовать «развертку» — алгоритм, обратный математической операции свертки. Основной идеей цифрового спектрометрического тракта является восстановление сигнала с детектора из оцифрованной формы сигнала с ПУ при известной переходной функции ПУ [4].

После восстановления сигнала встает задача измерения его амплитуды. Использование пикового детектора сразу после развертки даст плохое энергетическое разрешение из-за высокого влияния шумов. Поэтому для улучшения отношения сигнал/шум решено применить формирователь трапецеидальной формы (рис. 1). К настоящему времени разными авторами предложено несколько вариаций алгоритма [5–9]. Однако

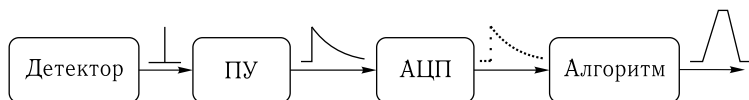


Рис. 1. Структурная схема алгоритма «развертка–формирование»

большинство из них являются, по сути, одинаковыми и отличаются лишь порядком выполнения. После проверки на реальных сигналах для реализации был выбран алгоритм, описанный в работе [3]. Схема алгоритма показана на рис. 2. На рис. 3, а представлены результаты моделирования работы алгоритма в программной среде Python 3. Результаты работы алгоритма, реализованного на ПЛИС (программируемой логической интегральной схеме), приведены на рис. 3, б и 4. Сигнал был получен с помощью кремниевоегo стрипового детектора, облучаемого  $\alpha$ -источником  $^{238}\text{Pu}$ .

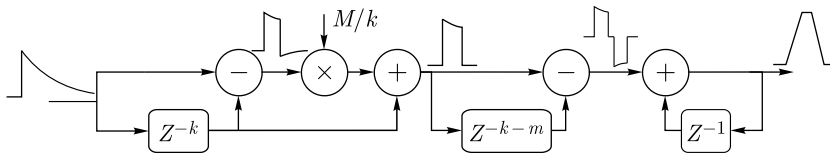


Рис. 2. Схема алгоритма «развертка–формирование»:  $Z$  – блок задержки;  $k$  – длительность боковых сторон трапеции;  $m$  – длительность вершины трапеции;  $M$  – параметр коррекции нуля

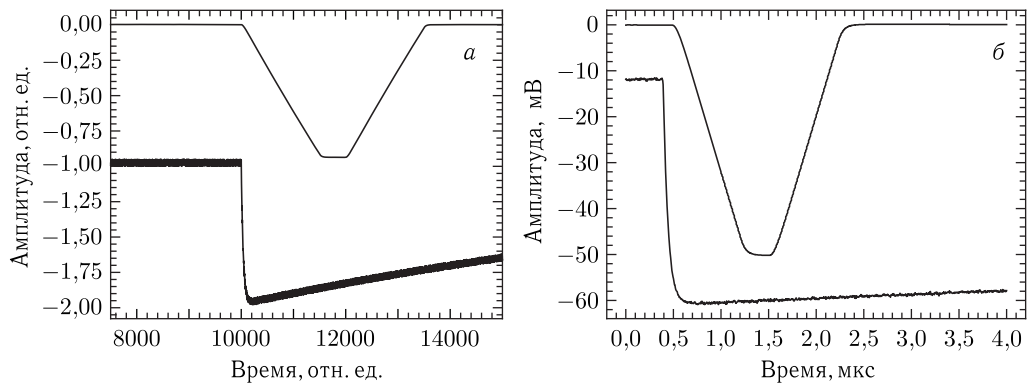


Рис. 3. Результаты работы алгоритма «развертка–формирование»: а) моделирование; б) реальный сигнал. Экспоненциальный сигнал – входной, трапецидальный – выходной

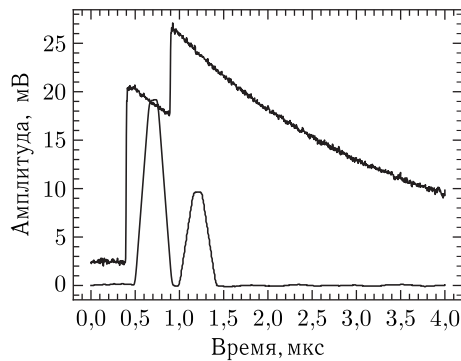


Рис. 4. Результаты работы алгоритма с наложенными сигналами. Входной экспоненциальный и выходной трапецидальный сигналы

## АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММЫ

Основной нашей идеей было создание легкомасштабируемой и гибкой системы на ПЛИС, универсальной для разных типов детекторов и ПУ, позволяющей быстро менять настройки алгоритма в зависимости от задачи. Программа должна в реальном времени получать информацию об энергии, времени регистрации и дополнительных метках зарегистрированной частицы и передавать на хост-ПК готовую информацию с помощью блока FIFO (First In First Out) по шине PXIe (PCI eXtension for Instrumentation express). Структурная схема такой системы показана на рис. 5.

Сигнал с ПУ оцифровывается с помощью АЦП, попадает на вход алгоритма и разделяется на два направления: 1) быстрое, где регистрируется приход сигнала с ПУ и генерируется строб, разрешающий работу основного алгоритма; 2) основной обрабатывающий алгоритм.

В «быстрой» части программы сигнал направляется на вход блока цифрового дифференцирования для устранения постоянной и низкочастотной составляющих. После этого отфильтрованный сигнал поступает на вход триггера по фронту. Уровень срабатывания, тип фронта (спадающий или нарастающий), величина гистерезиса триггера контролируются программно в режиме реального времени. Введением строба «Вкл. канал», разрешающего либо блокирующего сигнал триггера, дополнительно реализована возможность включения/отключения отдельных каналов.

По основному направлению сигнал после АЦП попадает на блок задержки (рис. 6), необходимый для того, чтобы не потерять «pre-trigger samples», т. е. данные, полу-

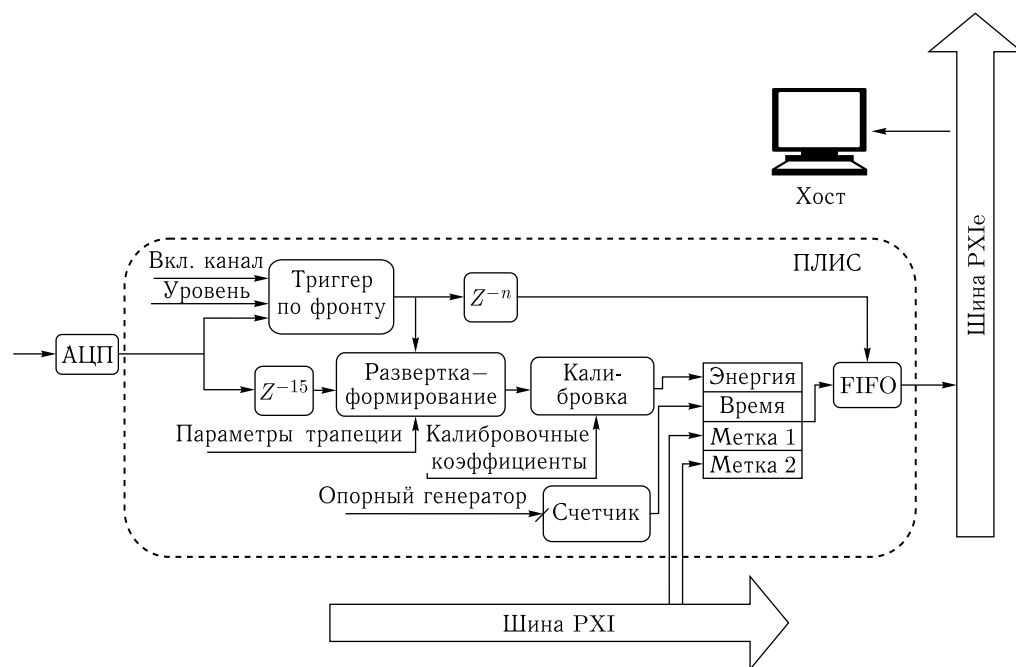


Рис. 5. Структурная схема алгоритма обработки сигналов с ПУ, реализованная на ПЛИС:  $Z$  — блок задержки;  $n$  — время формирования трапеции

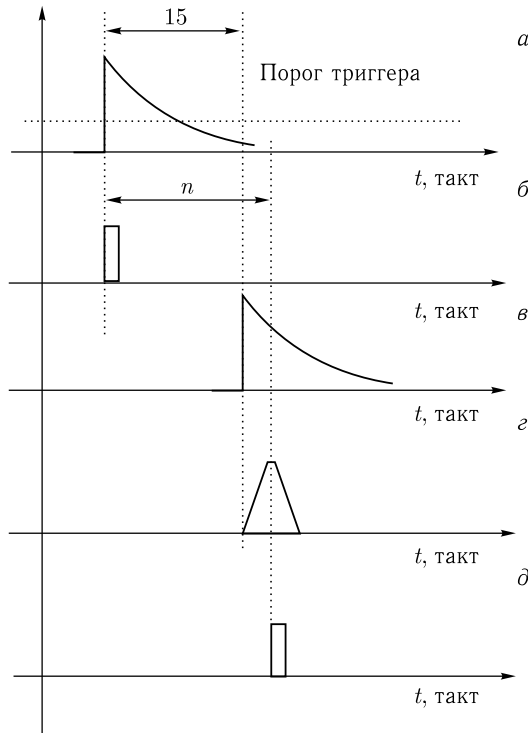


Рис. 6. Временная диаграмма сигналов, распространяющихся по схеме описанного алгоритма: а) выход АЦП; б) выход триггера по фронту; в) вход на блок алгоритма «развертка-формирование»; г) выход блока алгоритма развертки-формирования; д) строб, разрешающий запись в FIFO. Временные соотношения на диаграмме показаны схематично

чаемые между началом импульса и моментом срабатывания триггера. После этого следует блок цифровой обработки, в котором реализуется алгоритм «развертка-формирование», описанный в предыдущем разделе. Временные настройки трапеции и параметра развертки контролируются программно в режиме реального времени. Длительность боковых сторон и плоской вершины трапеции меняются в диапазоне от 0 до 8 мкс с шагом 16 нс.

После формирования сигнала получаем его амплитуду, которая измеряется в каналах АЦП, и в блоке «Калибровка» производим калибровку, переводя каналы АЦП в энергетические единицы (кэВ). Калибровочные коэффициенты задаются программно в режиме реального времени.

Для получения информации о времени события предусмотрен 64-битный счетчик с частотой тактирования 125 МГц. Таким образом, время регистрации события измеряется с точностью до 8 нс.

Для обеспечения синхронной работы времяизмерительной системы каналов используется внешний опорный генератор и реализована возможность одновременного сброса всех таймеров в ноль внешним сигналом. Также на блок синхронизации приходят внешние сигналы: метка от времяпролетной системы и метка включения/отключения пучка. Эти сигналы передаются на ПЛИС по шине PXIe.

Данные об энергии, времени регистрации и дополнительных метках объединяются в одно слово. Задержанный на время формирования трапеции сигнал триггера, разрешающего работу блока DSP (Digital Signal Processing), в свою очередь, разрешает, запись в FIFO. Оттуда хост-программа на ПК их считывает, записывает в бинарный файл и визуализирует.

## ПРОТОТИП ЦИФРОВОГО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ТРАКТА И ПЕРВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Детектирующая система GABRIELA [10] представляет собой «колодец» из двусторонних кремниевых стриповых детекторов (DSSD) для регистрации ядер отдачи, осколков деления и  $\alpha$ -частиц, окруженных детекторами из сверхчистого германия различной конфигурации для регистрации  $\gamma$ -квантов и сцинтилляторами ВГО ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) для антикомpton-защиты. В дополнение к этому перед детекторами установлена времяпролетная система — сборка из микроканальных пластин (МКП) [11].

Прежде чем проводить полномасштабный запуск цифрового измерительного тракта, было решено реализовать функциональный прототип. Данный прототип обрабатывает сигналы с 32 каналов DSSD, 4 каналов Clover-детектора и 4 МКП. Для обработки сигналов с DSSD использовались модули NI PXIe-5170R (частота дискретизации АЦП 250 МГц, частота работы ПЛИС 125 МГц, входное сопротивление 50 Ом), для работы с детекторами Ge и ВГО использовались NI PXIe-5172 (частота дискретизации АЦП 250 МГц, частота работы ПЛИС 125 МГц, входное сопротивление 1 МОм), для работы с МКП — NI PXIe-5764 (частота дискретизации АЦП 1 ГГц, частота работы ПЛИС 125 МГц, входное сопротивление 50 Ом).

После проведения всех функциональных тестов в октябре 2020 г. был проведен первый запуск прототипа системы на пучке. В качестве тестовой была выбрана реакция  $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb} \rightarrow ^{222}\text{Th}^*$ . Энергия ионов  $^{48}\text{Ca}$  в центре мишени составляла примерно 219,4 МэВ, что соответствует каналам реакции полного слияния с испарением от 3 до 6 нейтронов.

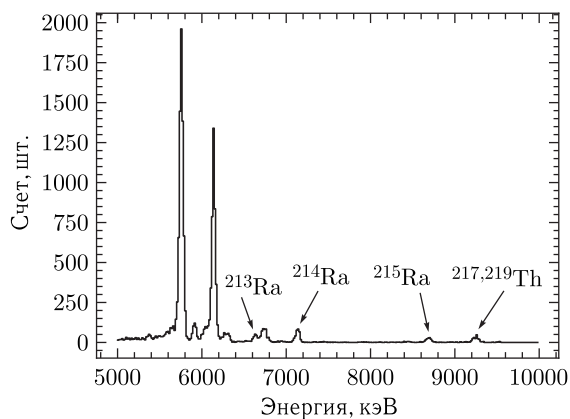


Рис. 7. Энергетический спектр  $\alpha$ -частиц, зарегистрированных с помощью цифрового тракта в ходе изучения реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb} \rightarrow ^{222}\text{Th}^*$

Целью эксперимента было подтверждение возможности нахождения корреляций типа «ядро отдачи –  $\alpha$ -распад» и « $\alpha$ -распад –  $\alpha$ -распад» с помощью цифрового спектрометрического тракта. Энергетический спектр  $\alpha$ -частиц со всех стрипов после грубой калибровки и диаграмма поиска корреляций показаны на рис. 7 и 8 соответственно.

Энергетическое разрешение существующего аналогового тракта в сравнении с разрабатываемым цифровым показано на рис. 9. Приведенные спектры получены с помощью спектрометрического источника  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu} + ^{244}\text{Cm}$ . В настоящее время разрешение цифровой системы заметно уступает аналоговой: 28 против 16 кэВ на линии 5900 кэВ. Объяснить это можно тем, что ПУ, используемые при измерениях, разработаны специально для аналогового тракта и позволяют работать лишь на узком

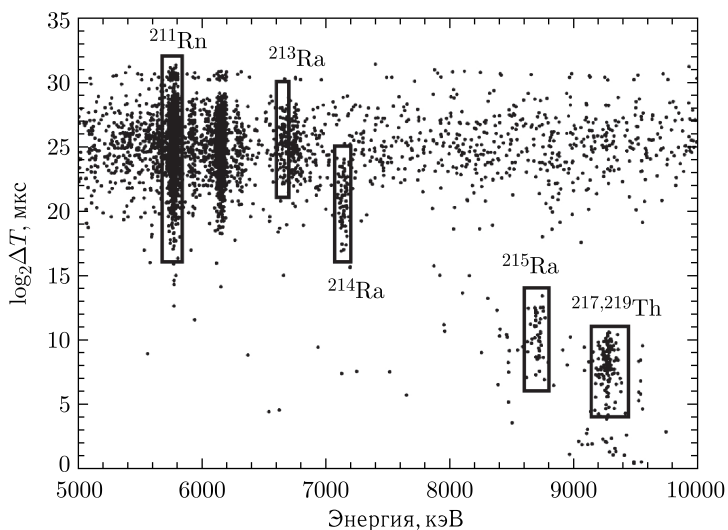


Рис. 8. Диаграмма поиска корреляций, полученная с помощью цифрового тракта в ходе изучения реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb} \rightarrow ^{222}\text{Th}^*$

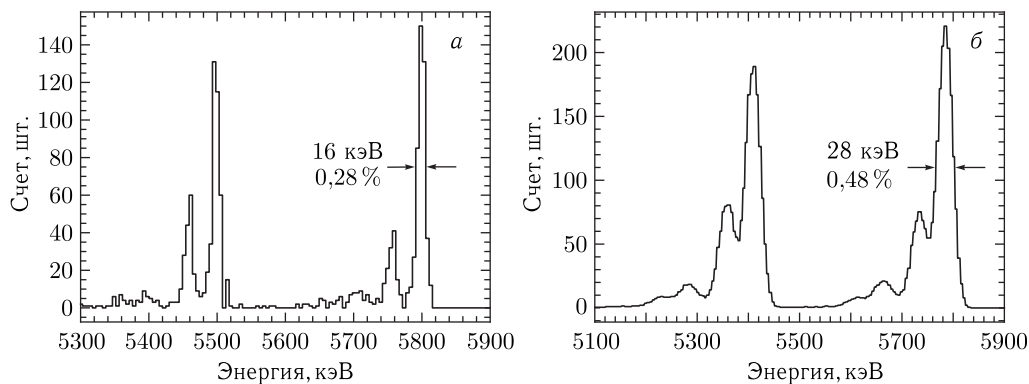


Рис. 9. Энергетический спектр  $\alpha$ -частиц, испускаемых источником  $^{238}\text{Pu} + ^{244}\text{Cm}$ , который получен с помощью существующего аналогового (а) и разрабатываемого цифрового (б) трактов

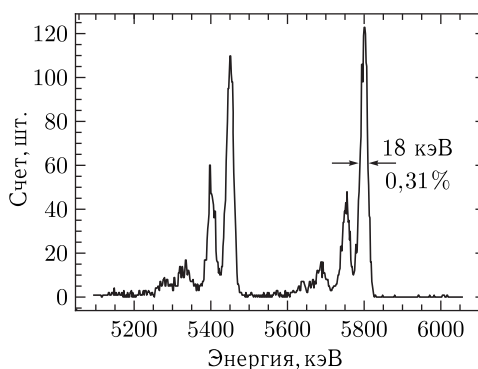


Рис. 10. Энергетический спектр  $\alpha$ -частиц, испускаемых источником  $^{238}\text{Pu} + ^{244}\text{Cm}$ , который получен с помощью цифрового спектрометрического тракта с уменьшенным входным диапазоном

участке динамического диапазона АЦП цифровых модулей (входной диапазон модуля 5170R составляет  $\pm 2,5$  В).

Если изменить входной диапазон цифровых модулей на  $\pm 0,2$  В (при амплитудах сигналов с ПУ, примерно равных 50 мВ), то разрешение «цифрового» спектра составляет 18 кэВ (рис. 10) и приближается к «аналоговому» (рис. 9, а). Исходя из этого можно ожидать, что при использовании ПУ, выходной диапазон которых будет соответствовать входному диапазону АЦП, энергетическое разрешение цифрового тракта будет не хуже, чем у существующего аналогового.

## ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В ходе данной работы был протестирован прототип цифрового спектрометрического тракта для детектирующей системы GABRIELA. Целью первых испытаний прототипа на пучке стало подтверждение возможности поиска корреляций типа «ядро отдачи –  $\alpha$ -распад» и « $\alpha$ -распад –  $\alpha$ -распад». Тракт работает в режиме реального времени и передает информацию об энергии, номере канала, времени события и дополнительных метках с частотой дискретизации АЦП 250 МГц и частотой работы ПЛИС 125 МГц. Цифровая система измеряет время регистрации события с шагом 8 нс против 1 мкс существующего аналогового тракта и по своим характеристикам сопоставима с мировыми аналогами [12–14].

В настоящее время энергетическое разрешение цифрового тракта хуже, чем у существующего аналогового (28 против 16 кэВ). Ожидается, что эту проблему удастся решить с использованием новых ПУ, выходной диапазон которых будет соответствовать входному диапазону АЦП цифровых модулей, а также модернизацией алгоритма.

Энергетическое разрешение описанного тракта зависит от временных настроек трапеции: длительности плоской вершины и времени нарастания/спада (времени интегрирования). Чем дольше время интегрирования и меньше плоская вершина трапеции, тем лучше разрешение. Однако слишком затянутые боковые стороны трапеции увеличивают вероятность наложения сигналов, а ширина вершины должна быть не



меньше длительности переднего фронта сигнала с ПУ, что необходимо для уменьшения влияния баллистического дефицита. Оптимальные характеристики формирователя подбираются экспериментально.

Отличительной особенностью цифрового тракта от аналогового стало использование независимого FIFO для каждого отдельного канала. Таким образом, полностью исключается необходимость использования дополнительных систем приоритета и возможность потери данных при одновременном срабатывании нескольких каналов. Если на данном этапе внутри одного канала произойдут два события по времени ближе, чем длительность переднего фронта и плоской вершины трапеции, то получить корректную информацию об энергии каждого события будет невозможно.

В перспективе планируется добавить дополнительный обработчик наложений, позволяющий разделять два наложившихся сигнала независимо от их близости во времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-52-15004) и ОМУС ОИЯИ (грант № 21-502-09).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yeremin A. V., Popeko A. G., Malyshev O. N., Isaev A. V., Kuznetsova A. A., Popov Yu. A., Svirikhin A. I., Sokol E. A., Tezekbayeva M. S., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Lopez-Martens A., Hauschild K., Dorvaux O., Gall B., Piot J., Antalic S., Mosat P., Tonev D., Stefanova E.* Spectroscopy of the Isotopes of Transfermium Elements in Dubna: Current Status and Prospects // *Phys. At. Nucl.* 2020. V. 83. P. 503–512.
2. *Isaev A. V., Yeremin A. V., Zamyatin N. I., Kuznetsov A. N., Malyshev O. N., Svirikhin A. I., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Hauschild K., Lopez-Martens A., Dorvaux O.* Application of a Double-Sided Stripped Si Detector in the Focal Plane of the VASSILISSA Separator // *Instrum. Exp. Tech.* 2011. V. 54. P. 37–42.
3. *Jordanov V. T.* Unfolding-Synthesis Technique for Digital Pulse Processing. Part 1: Unfolding // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 805. P. 63–71; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215008694>.
4. *Jordanov V. T.* Deconvolution of Pulses from a Detector–Amplifier Configuration // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1994. V. 351, No. 2. P. 592–594; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294913943>.
5. *Jordanov V. T., Knoll G. F., Huber A. C., Pantazis J. A.* Digital Techniques for Real-Time Pulse Shaping in Radiation Measurements // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1994. V. 353, No. 1. P. 261–264; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294916527>.
6. *Georgiev A., Gast W.* Digital Pulse Processing in High-Resolution, High-Throughput, Gamma-Ray Spectroscopy // *IEEE Conf. Nucl. Science Symp. Medical Imaging.* 1992. V. 1. P. 534–536.
7. *Stein J., Scheuer F., Gast W., Georgiev A.* X-Ray Detectors with Digitized Preamplifiers // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1996. V. 113, No. 1. P. 141–145; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168583X95014179>.
8. *Födisch P., Wohsmann J., Lange B., Schönherr J., Enghardt W., Kaefer P.* Digital High-Pass Filter Deconvolution by Means of an Infinite Impulse Response Filter // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 830. P. 484–496; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.019>.

9. Regadío A., Sánchez-Prieto S., Prieto M., Tabero J. Implementation of a Real-Time Adaptive Digital Shaping for Nuclear Spectroscopy // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 735. P. 297–303; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213013053>.
10. Chakma R., Hauschild K., Lopez-Martens A., Yerebin A., Malyshev O., Popeko A., Popov Yu., Svirikhin A., Chepigin V., Dorvaux O., Gall B., Che A. Gamma and Conversion Electron Spectroscopy Using GABRIELA // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56. P. 245.
11. Andreyev A., Bashevoy V., Bogdanov D., Chepigin V., Kabachenko A., Malyshev O., Roháč J., Saro S., Taranenko A., Ter-Akopian G., Yerebin A. Large Area High-Efficiency Time-of-Flight System for Detection of Low Energy Heavy Evaporation Residues at the Electrostatic Separator VASSILISSA // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 364, No. 2. P. 342–348; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016890029500355X>.
12. Khuyagbaatar J., Yakushev A., Düllmann C., Ackermann D., Andersson L.L., Block M., Brand H., Cox D., Even J., Forsberg U., Golubev P., Hartmann W., Herzberg R.D., Heßberger F., Hoffmann J., Hübner A., Jäger E., Jeppsson J., Kindler B., Yakusheva V. New Short-Lived Isotope  $^{221}\text{U}$  and the Mass Surface near  $N = 126$  // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115.
13. Stoica V.I. Digital Pulse-Shape Analysis and Controls for Advanced Detector Systems. Ph. D. Thesis. 2012. Relation: <http://www.rug.nl/>.
14. David H., Chen J., Seweryniak D., Kondev F., Gates J., Gregorich K., Ahmad I., Albers M., Alcorta M., Back B., Baartman B., Bertone P., Bernstein L., Campbell C., Carpenter M., Chiara C., Clark R., Cromaz M., Doherty D., Zhu S. Decay and Fission Hindrance of Two- and Four-Quasiparticle  $K$  Isomers in  $^{254}\text{Rf}$  // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 132502.

Получено 21 мая 2021 г.