



ӘӨЖ 29.15.39

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2024-148-3-86-97>

Ғылыми мақала

Многоканальный анализатор со схемой совпадения для идентификаций легкозаряженных частиц

А. Темиржанов^{1,2*}, Б. Садыков², Т. Жолдыбаев², Ж. Керимкулов²,
К. Мендибаев^{2,3}

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

³Объединенный Институт ядерных исследований, Дубна, Россия

(E-mail:alik-25.01.97@mail.ru)

Аннотация. В экспериментах по ядерной физике применяются специально созданные модульные блоки, обрабатывающие сигналы с детекторов излучения и позволяющие получить информацию о природе этих процессов. Эти блоки, называемые ядерной электроникой, легли в основу систем ядерной спектрометрии в медицине, дозиметрии, в исследованиях космические лучей и в других источниках ионизирующего излучения.

В статье описано создание электрической схемы измерения для ΔE-E метода регистрации и идентификации легкозаряженных частиц использованием программы MultiSim. С помощью данной программы были смоделированы спектрометрический усилитель, одноканальный анализатор и схема совпадений с применением современных микроэлектронных компонентов. На основе смоделированной схемы был создан прототип спектрометрического усилителя. Сигнал, полученный с созданного прототипа, совпадает с смоделированным. Полученные данные свидетельствуют о том, что смоделированную схему можно использовать для экспериментов в ядерной физике для идентификаций легкозаряженных частиц, а также в других областях, где есть нужда в ядерной спектроскопии.

Ключевые слова: ядерная электроника, многоканальный анализатор, альфа спектроскопия, гамма спектроскопия, микроэлектроника.

Введение

Во всех областях науки, где приходится иметь дело с ионизирующими излучениями, используются специальные электронные приборы или так называемая ядерная электроника для получения, преобразования и обработки информации, поступающей от детекторов. Такие приборы применяются в таких разных областях исследования, как в экспериментах по ядерной физике, дозиметрии, ядерной медицины и т.д. [1, 2, 3]. В число этих устройств входят зарядочувствительные предусилители, спектрометрический усилитель, дискриминатор или одноканальный анализатор, схема совпадения, контроллер, блоки аналогового цифрового преобразователя и многие другие. Для унификации данных устройств были разработаны и приняты международные стандарты NIM и SAMAC. До настоящего времени в основном применяются модульные системы, разработанные в данных стандартах и которые находят широкое применение и удовлетворяют требованиям большинства задач [4, 5].

В то же время необходимо отметить, что достижения последних десятилетий в области микроэлектроники оказывают существенное влияние на развитие ядерной электроники. Большие усилия были направлены на разработку приборов и систем для нужд ядерной спектроскопии путем использования оцифровки аналоговых сигналов с использованием современной микропроцессорной схемотехники [6-9].

Вместо большого количества модулей разного назначения разрабатываются многоканальные анализаторы (МКА), собранные в одно компактное устройство, внутри которого программируемая логическая интегральная схема с быстрой оперативной памятью и быстрыми АЦП со скоростью до 250 миллионов выборок в секунду, осуществляет набор данных с детектора ионизирующего излучения. Электронные модули обработки и преобразования сигнала реализованы в виде программы внутри контроллера, которая называется цифровым алгоритмом обработки сигнала [10, 11, 12].

Другой способ реализаций многоканального анализатора основан на применении микроконтроллеров со специальными электронными схемами обработки сигнала и пикового детектора. В современных микроконтроллерах внутри имеется АЦП и встроенная оперативная память с прямым доступом от периферийных устройств, что позволяет записывать сигналы с АЦП на память напрямую без участия процессора [13-19].

Целью статьи является моделирование специальной двухдетекторной схемы для набора данных в экспериментах по ядерной физике на Циклотроне У-150М Института ядерной физики (г. Алматы). Использование такой схемы позволит реализовать двухдетекторную методику идентификации и регистрации частиц из ядерных реакций, так называемый ΔE - E -метод. Суть данного метода заключается в одновременном использовании тонкого прострельного детектора ΔE и детектора полного поглощения энергии E , которые находятся один за другим. Такой подход позволяет идентифицировать легкозаряженные частицы, появившиеся после взаимодействия бомбардирующей частицы с ядром мишенью в камере рассеивания на основе измерений удельных потерь энергии и полной энергии. Распределение энергий между двумя детекторами различно для разных типов частиц из-за их разных тормозных способностей, что позволяет проводить их

идентификация на двумерной матрице ΔE -E, на которой каждый тип частицы находится на своем локусе [20-23].

Данная схема была смоделирована в программе MultiSim [21, 22], которая позволяет симулировать реальную электрическую схему. В схеме реализованы блоки спектрометрического усилителя –SA, дискриминатора –Discr, схемы совпадения –CS на основе коммерчески доступных и малобюджетных операционных усилителей, компараторов и других интегральных микросхем. Был собран прототип спектрометрического усилителя на основе моделированного SA.

Методология

Принцип работы системы регистрации легкозаряженных частиц показан на рисунке 1, где легкие заряженные частицы (${}^1,2,3\text{H}$, ${}^{3,4,6}\text{He}$), образовавшиеся после взаимодействия ускоренной частицы с мишенью, регистрируются полупроводниковыми детекторами с толщиной 10-100 микрон для пролетного ΔE и 2-10 миллиметров для детектора полного поглощения E. Сигнал с детекторов усиливается до нужного уровня зарядочувствительными предусилителями, обозначенными на схеме как ЗЧПУ. Далее выходные сигналы с предусилителей преобразуются спектрометрическими усилителями СУ. Одноканальный анализатор ОА работает как компаратор и вырабатывает логический сигнал, если уровень входного сигнала выше установленного уровня. Схема совпадения СС вырабатывает логический сигнал 1, если на его вход одновременно попадают прямоугольные сигналы с ОА, то есть СС представляет собой логическую схему “И”. Сигнал со СС выступает триггером, запускающим АЦП микроконтроллера. Далее данные отправляются на компьютер, где можно увидеть собранный спектр в специально созданных программах, например, в пакете объектно-ориентированных программ и библиотек ROOT, разработанном в CERN.

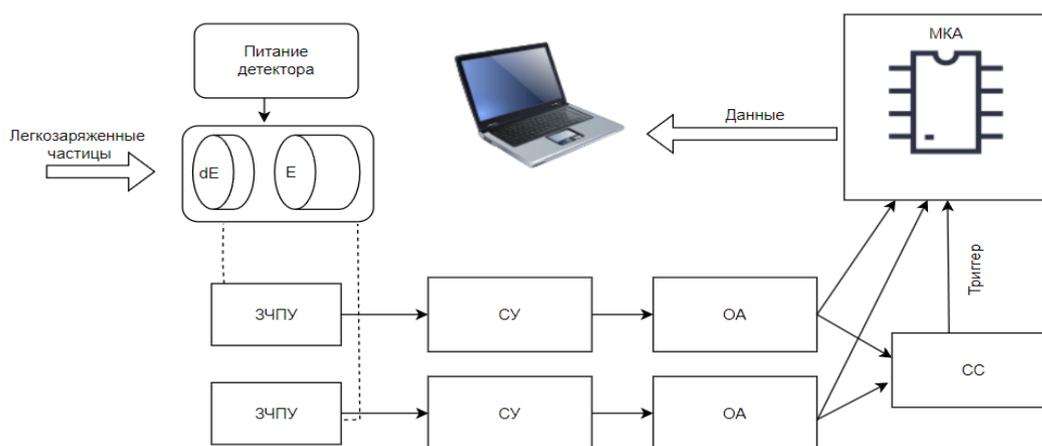


Рисунок 1. Блок-схема метода регистрации и идентификации легкозаряженных частиц

Чтобы обеспечить полный сбор заряда с детектора, схема предусилителя настроена на создание длительного времени затухания импульса (типичное время затухания составляет около 500-1000 микросекунд). Поскольку импульсы возникают в случайные моменты времени (радиоактивный распад является случайным процессом), то при высокой частоте счета они могут накладываться друг на друга. Амплитуды этих импульсов несут важную информацию, поскольку они соответствуют заряду, накопленному в детекторе, который пропорционален энергии регистрируемых частиц. Поэтому наложение импульсов, их насыщение и последующий нелинейный отклик являются крайне нежелательными процессами. Применение спектрометрического усилителя решает эту проблему и позволяет добиться лучшего отношения сигнала к шуму.

Комбинация из конденсатор-резистор CR-дифференциатора и резистор-конденсатор RC-интегратора, приведенная на рисунке 2а), используется в качестве формирователя гауссовского импульса в спектрометрических усилителях. Добавление операционного усилителя позволяет добиться импедансной изоляции двух цепей друг от друга. Операционные усилители работают в режиме повторителя напряжения и на втором операционном усилителе происходит усиление сигнала. Спектрометрический усилитель смоделирован на основе операционных усилителей OPA354. Емкость конденсатора составляет 50 пФ, а сопротивление резистора 10 кОм, что позволяет добиться временной константы преобразования сигнала в гауссовскую форму в 0,5 микросекунд. Как результат, на выходе получаем сигнал с шириной в 2 микросекунды, представленный на рисунке 2б).

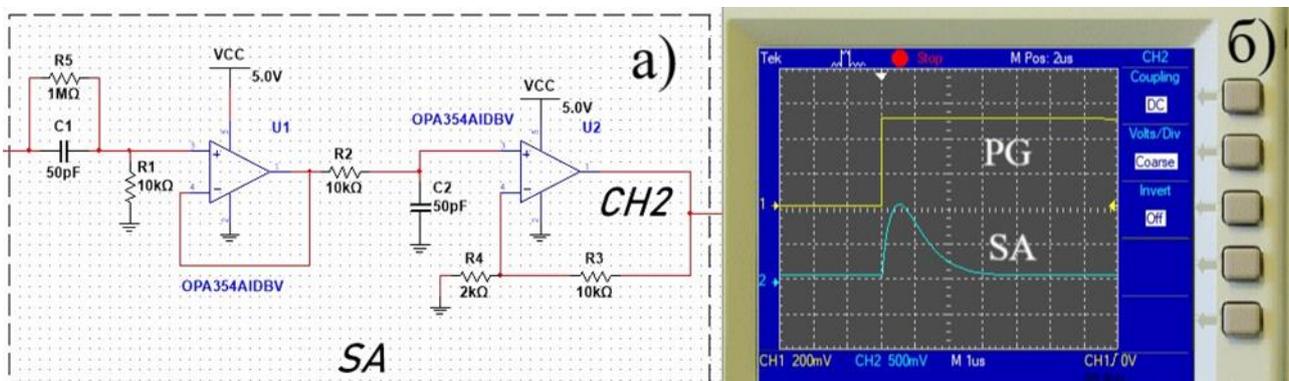


Рисунок 2. а) Принципиальная схема SA, б) сигнал с выхода SA и PG

На рисунке 3 представлена смоделированная с использованием программы MultiSim полная электрическая схема преобразования сигнала, состоящая из спектрометрического усилителя -SA, одноканального анализатора или компаратора - Discr на основе компаратора LM339N и схемы совпадения -CS на основе логического элемента И 74HC08N.

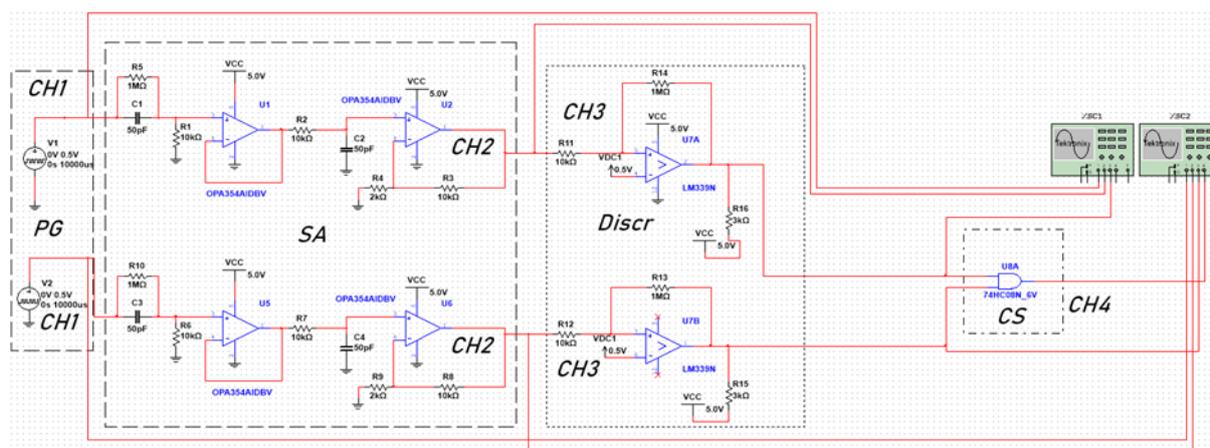


Рисунок 3. Предложенная электрическая схема МКА со схемой совпадения

На рисунке 3 генератор сигнала обведен в рамку и обозначен как PG, а его выходы подключены ко входам CH1 виртуальных осциллографов. Соответственно в рамки обведены SA и Discr, CS и к какому каналу осциллографа подключены их выходы.

Для моделирования на вход SA был подан сигнал с генератора сигналов, похожий на реальный сигнал с предусилителя [24]. Высота сигнала 500 mV, нарастание 10 ns и длинный спад сигнала в 1000 us повторяет форму сигнала с выхода предусилителя ORTEC 142B, который создан для работы с кремниевыми детекторами. На рисунке 3 генератор сигнала обведен в рамку и обозначен как PG, а их выходы подключены ко входам CH1 виртуальных осциллографов. Соответственно в рамки обведены SA и Discr, CS и к какому каналу осциллографа подключены их выходы.

Результаты и Обсуждение

Для симуляции работы предложенной схемы на вход SA был подан сигнал с виртуального генератора сигналов, встроенного в программу MultiSim. Высота сигнала 500 mV, нарастание 10 ns и длинный спад сигнала в 1000 us повторяет форму сигнала с выхода предусилителя ORTEC 142B, который специально создан для работы с кремниевыми детекторами [26]. В результате были получены следующие сигналы с каждого из элементов электрической схемы, которые представлены на рисунке 4. Прохождение регистрируемой частицы через два последовательных детектора приводит к образованию двух одновременных сигналов, в то время как шум и фоновые частицы в основном взаимодействуют только с одним детектором. В результате все эти паразитные процессы, которые могут привести к росту мертвого времени АЦП, отсекаются работой схемой совпадений.

Для проверки работоспособности предложенной схемы, собранной в MultiSim, начато создание прототипа в виде отдельной печатной платы. На первом этапе был реализован прототип спектрометрического усилителя SA, представленный на рисунке 5. Для проверки его работоспособности был создан измерительный стенд, состоящий из альфа источника Ra226 и кремниевого детектора фирмы ORTEC, толщиной 300 микрон и зарядово-чувствительного предусилителя 142B фирмы ORTEC.

На рисунке 6а показаны полученные на стенде сигналы с предусилителя 142В и с выхода прототипа SA. На рисунке 6б показаны те же сигналы, но в другом масштабе времени, чтобы видеть структуры единичного импульса. Как видно из рисунка 6б, выходной сигнал с выхода прототипа спектрометрического усилителя SA идентичен смоделированному (рисунок 4а, сигнал SA), что говорит о возможности его дальнейшего использования при реализации полной схемы. Прототип отличается компактными размерами и малым энергопотреблением по сравнению с модулями NIM. Созданная плата может найти свое применение как при проведении ядерно-физических экспериментов, так и в других смежных областях науки.

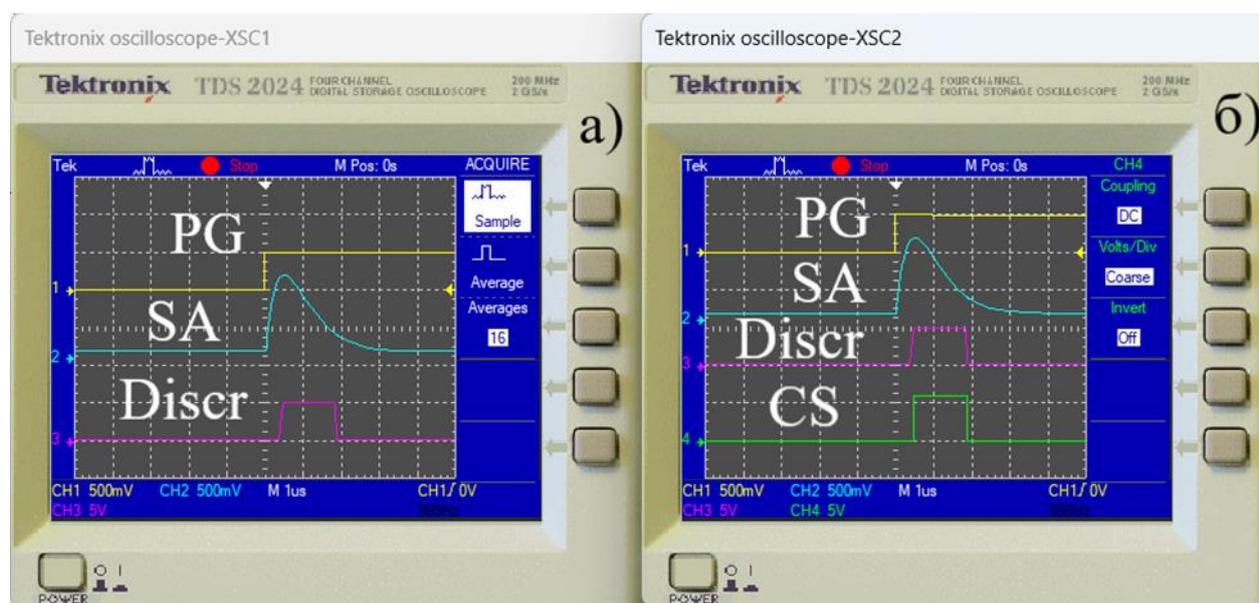


Рисунок 4. Сигналы, полученные в процессе симуляций электрической схемы МКА со схемой совпадения: а) первый канал схемы б) второй канал и схема совпадения



Рисунок 5. Созданный прототип SA

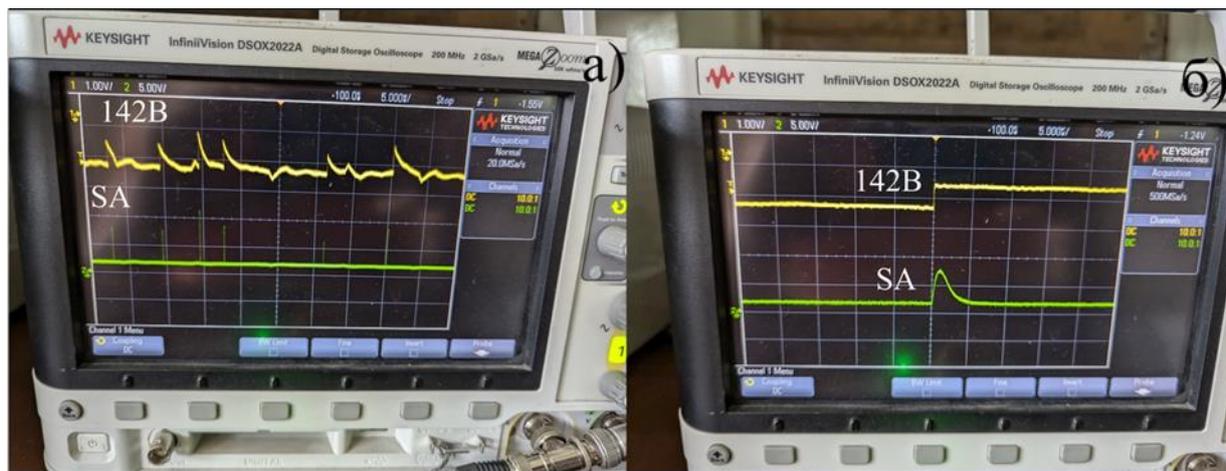


Рисунок 6. Сигналы, полученные на измерительном стенде: а) сигналы с предусилителя 142В и с выхода прототипа SA, б) те же сигналы, но в другом масштабе времени

Заключение

Была предложена и смоделирована система из современных операционных усилителей, компараторов и логической схемы, которая выполняет аналоговую электрическую схему обработки сигнала для МКА. Схема должна работать в связке с микроконтроллерной системой с встроенным АЦП и пиковым детектором.

На основе смоделированной схемы в MultiSim для проверки ее работоспособности была реализована плата спектрометрического усилителя на основе операционного усилителя. Полученные сигналы с предусилителя совпадают с сигналом смоделированной схемы. Достигнутые результаты свидетельствуют о том, что современными микросхемами и программным обеспечением можно создавать сложные устройства как для ядерно-физических экспериментов, так и для смежных областей науки, где приходится иметь дело с ионизирующими излучениями. Предложенная схема будет реализована для набора данных в экспериментах по ядерной физике на Циклотроне У-150М Института ядерной физики (г. Алматы).

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Грант №. AP14870958.

Вклад авторов

Темиржанов Әлішер Әлібекұлы – Проведение исследований, сбор данных и доказательств, анализ и интерпретация полученных данных. Составление черновика рукописи. Программирование, разработка программного обеспечения, проектирование компьютерных программ.

Садыков Бахтияр Маденұлы – Предоставление измерительных приборов, вычислительных ресурсов и иных инструментов для проведения эксперимента. Утверждение окончательного варианта рукописи.

Жолдыбаев Тимур Кадыржанұлы – Составление черновика рукописи и его критический пересмотр с внесением ценного замечания. Утверждение окончательного варианта рукописи.

Керімкулов Жамбыл Куанышбекұлы – Формирование идеи; формулировка или развитие ключевых целей и задач.

Мендибаев Кайрат Оразбаевич – Предоставление измерительных приборов, вычислительных ресурсов и иных инструментов для проведения эксперимента. Составление черновика рукописи. Утверждение окончательного варианта. Разработка методологии исследования.

Список литературы

1. Marques L., Vale A., Vaz P. State-of-the-art mobile radiation detection systems for different scenarios //Sensors, 21(4), 1051(2021).
2. Tsoulfanidis N., Landsberger S. Measurement and detection of radiation. – CRC press, 2021.
3. Pausch G. et al. Detection systems for range monitoring in proton therapy: Needs and challenges // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 954, 161227(2020).
4. Clark A. M. et al. Improvements for heavy-ion accelerator mass spectrometry at the university of Notre Dame’s nuclear science laboratory //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 541, 342-349(2023).
5. Kim Y. et al. Position-sensitive NaI (TL) detector module for large-area Compton camera //Journal of the Korean Physical Society, 72, 26-32(2018).
6. Vaz S. C. et al. Nuclear medicine and molecular imaging advances in the 21st century //The British journal of radiology, 93(1110), 20200095(2020).
7. Quaglia L. et al. Eco-friendly Resistive Plate Chambers for detectors in future HEP applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1058, 168757(2024).
8. Pausch G. et al. Detection systems for range monitoring in proton therapy: Needs and challenges // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 954, 161227(2020).
9. Holík M. et al. A synchronization and data acquisition system for silicon detectors //Journal of Instrumentation, 13(11), 11019(2018).
10. Villamarín D. et al. Design of a high performance Digital data Acquisition SYstem (DAISY) for innovative nuclear experiments //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1055, 168526(2023).
11. Mostafanezhad I. et al. Measurements on All-In-One Digitizer System-an-chip (AODS): a High Dynamic Range Front-End Digitizer for Particle Physics Experiments //2020 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). – IEEE, 1-2(2020).

12. Recker M. C., Cazalas E. J., McClory J. W. Pulse shape discrimination with a low-cost digitizer using commercial off-the-shelf components //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 954, 161479(2020).
13. Jithin B. P., Sastri O. Novel coincidence setup using indigenously developed portable USB gamma spectrometer and associated analysis software //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 964, 163793(2020).
14. Cardoso J. M. et al. A very low-cost portable multichannel analyzer //2000 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record (Cat. No. 00CH37149). – IEEE, 2(2), 12/164-12/167 (2000).
15. Voss H. D., Bakke J. C., Roselle S. N. A spacecraft multichannel analyzer for a multidetector solid state detector array //IEEE Transactions on Nuclear Science, 29(1), 173-177(1982).
16. Bombelli L. et al. A multichannel integrated readout circuit for high throughput X-ray spectroscopy with Silicon Drift Detectors //IEEE Transactions on Nuclear Science, 60(1), 430-436(2013).
17. Carminati M. et al. Handheld magnetic-compliant gamma-ray spectrometer for environmental monitoring and scrap metal screening //Sensors, 22(4), 1412(2022).
18. Zhang J., Yang Z., Li Y. Research on gamma spectroscopy system while drilling based on DSP and FPGA //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2418(1), 012024(2023).
19. Chierici A. et al. Resource Constrained Electronics and Signal Processing for UAV Radiation Sensors //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 288, 10019(2023).
20. Sweany S. et al. Reaction losses of charged particles in CsI (Tl) crystals //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1018, 165798(2021).
21. Dubey R. et al. High-energy electron measurements with thin Si detectors //Measurement, 228, 114392(2024).
22. Ahmadov G. S. et al. Detection of ternary and quaternary fission fragments from ^{252}Cf with a position-sensitive ΔE -E telescope based on silicon detectors //Physics of Particles and Nuclei Letters, 12, 542-549(2015).
23. Aidos A. et al. Study of one-step and two-step neutron transfer in the reaction $^6\text{Li} + ^9\text{Be}$ //arXiv preprint arXiv:2407.19846. – 2024
24. Atiea H. M., Rashid J. M. Simulation of Charge Sensitive Preamplifier to improve Nuclear Pulse detecting using Multisim Software //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 1999(1), 012125(2021).
25. Li Y. et al. Energy spectrum response of a CsI (Tl) detector read out by an APD //Journal of Instrumentation, 15(5), T05005(2020).
26. Bertoni R. et al. Innovative amplifiers for muon spectroscopy experiments at RAL //Journal of Instrumentation, 15(3), C03020(2020).

Ә. Теміржанов^{1,2*}, Б. Садықов², Т. Жолдыбаев², Ж. Керімкулов², Қ. Мендібаев^{2,3}

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан,

²Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан,

³Біріккен Ядролық Зерттеулер Институты, Дубна, Ресей

*(E-mail: alik-25.01.97@mail.ru)

Жеңіл зарядты бөлшектерді анықтауға арналған сәйкестік схемасы бар көп арналы анализатор

Аңдатпа. Ядролық физика эксперименттерінде радиациялық детекторлардың сигналдарын өңдейтін және осы процестердің табиғаты туралы ақпарат беретін арнайы құрылған модульдік қондырғылар қолданылады. Ядролық электроника деп аталатын бұл блоктар медицинада, дозиметрияда, ғарыштық сәулелерді зерттеуде және иондаушы сәулеленудің басқа көздерінде ядролық спектрометрия жүйелерінің негізін құрайды.

Мақалада MultiSim бағдарламасында жеңіл зарядталған бөлшектерді тіркеудің $\Delta E-E$ әдісі үшін электрлік өлшеу тізбегін құру сипатталған. Бағдарлама заманауи микроэлектрондық компоненттерді пайдалана отырып, спектрометриялық күшейткішті, бір арналы анализаторды және сәйкестік тізбегін модельдеді. Модельдеу схемасын қолдана отырып, спектрометриялық күшейткіштің прототипі жасалды. Құрылған прототиптен алынған сигнал имитацияланғанымен сәйкес келеді. Алынған деректер симуляцияланған схеманы жеңіл зарядталған бөлшектерді анықтау үшін ядролық физикадағы тәжірибелер үшін, сондай-ақ ядролық спектроскопия қажеттілігі бар басқа салаларда қолдануға болатындығын көрсетеді.

Түйін сөздер: ядролық электроника, көп арналы анализатор, альфа-спектроскопия, гамма-спектроскопия, микроэлектроника

A. Temirzhanov^{2*}, B. Sadykov², T. Zholdybayev², Zh. Kerimkulov², K. Mendibayev^{2,3}

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

²Institute of nuclear physics, Almaty, Kazakhstan,

³Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*(E-mail: alik-25.01.97@mail.ru)

Multichannel coincidence analyzer for light charged particle identification

Abstract. Nuclear physics experiments use specially designed modular units that process signals from radiation detectors and provide information on the nature of these processes. These units, called nuclear electronics, form the basis of nuclear spectrometry systems in medicine, dosimetry, cosmic ray research, and other sources of ionizing radiation.

The article describes the creation of an electrical measurement circuit for the $\Delta E-E$ method of recording and identifying lightly charged particles using the MultiSim program. By using this program, a spectrometric amplifier, a single-channel analyzer, and a coincidence circuit were simulated using modern microelectronic components. Based on the simulated circuit, a prototype of a spectrometric

amplifier was created. The signal obtained from the created prototype coincides with the simulated one. The obtained data indicate that the simulated scheme can be used for experiments in nuclear physics for the identification of lightly charged particles, as well as in other areas where there is a need for nuclear spectroscopy.

Keywords: Nuclear electronics, multichannel analyzer, alpha spectroscopy, gamma spectroscopy, microelectronics

Информация об авторах:

Теміржанов Алишер Алибекулы – автор для корреспонденции, младший научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан.

Садықов Бахтияр Маденович – кандидат физ-мат. наук, ведущий научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан.

Жолдыбаев Тимур Кадыржанович – кандидат физ-мат. наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан.

Керімқулов Жамбул Қуанышбекович – кандидат физ-мат. наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, РГПРГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан.

Мендибаев Кайрат Оразбаевич – PhD по специальности «Ядерная физика», старший научный сотрудник, Лаборатория ядерных процессов, Объединенный Институт ядерных исследований (Российская Федерация) и РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан.

Авторлар туралы ақпарат:

Теміржанов Әлішер Әлібекұлы – корреспондент автор, РМК Ядролық физика институтының ядролық процестер зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ-да, «Робототехника» мамандығы бойынша докторантураны аяқтады.

Садықов Бахтияр Маденұлы – РМК Ядролық физика институтының ядролық процестер зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты.

Жолдыбаев Тимур Кадыржанұлы – РМК Ядролық физика институтының ядролық процестер зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор.

Керімқулов Жамбыл Қуанышбекұлы – РМК Ядролық физика институтының ядролық процестер зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор.

Мендибаев Кайрат Оразбаевич – Біріккен ядролық зерттеулер институты (Ресей Федерациясы) және РМК Ядролық физика институты ядролық процестер зертханасының аға ғылыми қызметкері, «Ядролық физика» мамандығы бойынша PhD докторы.

About the authors:

Temirzhanov Alisher Alibekuly – corresponding author, Junior Researcher at Laboratory of Nuclear Processes of RSE Institute of Nuclear Physics, completed his doctorate at KazNITU named after K. Satpayev in Robotics.

Sadykov Bakhtiyar Madenovich – Leading Researcher at Laboratory of Nuclear Processes of RSE Institute of Nuclear Physics, PhD in Physics and Mathematics.

Zholdybaev Timur Kadyrzhanovich – Leading Researcher at Laboratory of Nuclear Processes of RSE Institute of Nuclear Physics, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Kerimkulov Zhambul Kuanyshbekovich – Leading Researcher at Laboratory of Nuclear Processes of RSE Institute of Nuclear Physics, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Mendibaev Kairat Orazbaevich – Senior Researcher at Joint Institute for Nuclear Research (Russian Federation) and Laboratory of Nuclear Processes of RSE Institute of Nuclear Physics, PhD in Nuclear Physics.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).