

## РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РАДИАЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

© 2022 г. **Gozde Tektas<sup>a,b,\*</sup>, Cuneyt Celiktas<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Izmir University of Economics, Faculty of Arts and Sciences,  
Department of Physics, Izmir, Turkey*

<sup>b</sup> *Ege University, Faculty of Science, Department of Physics,  
Izmir, Turkey*

\*e-mail: gozdetektas@hotmail.com

Поступила в редакцию 09.03.2022 г.

После доработки 18.05.2022 г.

Принята к публикации 19.05.2022 г.

Разработан виртуальный многоканальный анализатор (МСА), который можно использовать в составе спектрометра при детектировании излучений. Разработка заключалась в написании кода с помощью программных функций. Проведено сравнение виртуального МСА с реальным, что позволило проверить его функционирование. Спектры для разных расстояний от источника до детектора регистрировались реальным и виртуальным МСА. Проведено сравнение полученных обоими МСА параметров: общего числа сосчитанных сигналов, числа сигналов в фотопике, живого времени, доли мертвого времени и энергетического разрешения. Кроме того, полученные результаты и формы спектра, отображаемые в виртуальном МСА, сравнивались с реальными.

DOI: 10.31857/S003281622205024X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для определения энергетического спектра частиц, испускаемых источником, с помощью детектора и соответствующей электроники измеряется амплитудное распределение импульсов, создаваемых этими частицами [1].

Детектор NaI(Tl) состоит из монокристалла активированного таллием йодида натрия, оптически связанного с фотокатодом фотоумножителя. Когда  $\gamma$ -излучение попадает в детектор, оно взаимодействует с йодидом натрия, вызывая ионизацию. Это создает в кристалле возбужденные состояния, которые распадаются, испуская фотоны видимого света. Это излучение называет-

ся сцинтилляцией. На фотокатод сцинтилляционные фотоны высвобождают электроны за счет фотоэффекта. В вакуумированной стеклянной трубке фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) расположен ряд динодов на которых происходит размножение электронов [2]. Заряд в выходном импульсе ФЭУ интегрируется на входной емкости предварительного усилителя для получения импульса напряжения [3]. Усилитель усиливает сигнал с предусилителя и формирует его для дальнейшей обработки [4].

Многоканальный анализатор (МСА) записывает и сохраняет импульсы в соответствии с их амплитудой. Каждая единица хранения называ-

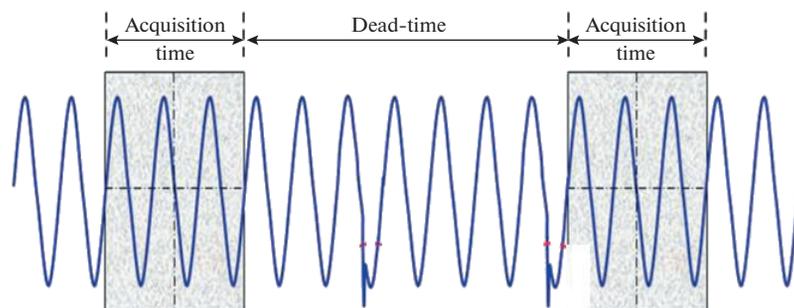


Рис. 1. Мертвое время осциллографа [7].

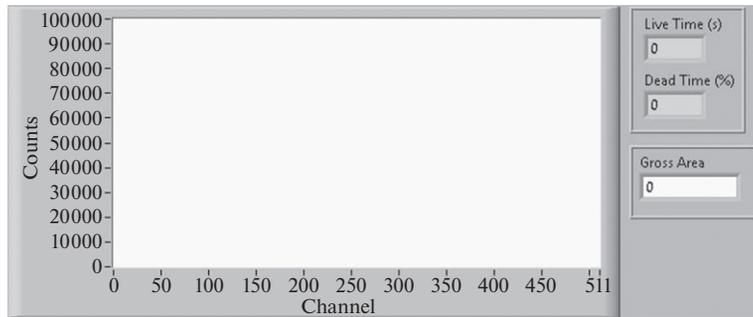


Рис. 2. Передняя панель виртуального МСА.

ется каналом. Каждый импульс сохраняется в определенном канале, соответствующем определенной энергии. Распределение импульсов в каналах является отображением распределения энергий частиц. В таком распределении по горизонтальной оси отложен номер канала или энергия частицы, а по вертикальной — количество частиц, зарегистрированных в канале [1]. Реальное время означает полное время измерения, определенное по часам. Живое время определяется временем, в течение которого анализатор готов регистрировать импульсы (т.е. его вход не заблокирован), и равно реальному времени за вычетом мертвого времени [5]. Системы МСА часто представляют мертвое время в процентах [100·(реальное время — живое время)/реальное время] [6].

Осциллографы имеют мертвое время. Это время между сборами данных осциллографа, когда осциллограф обрабатывает ранее полученный сигнал для отображения на дисплее осциллографа (рис. 1) [7]. Виртуальные приборы осуществляют фундаментальный переход от традиционных аппаратно-ориентированных измерительных систем к программно-ориентированным системам, использующим вычислительные мощности, производительность, возможности отображения информации и связи настольных компьютеров и рабочих станций. Виртуальная измерительная система — это программное обеспечение, которое используется пользователем для разработки компьютеризированной системы испытаний и измерений, для управления внешним измерительным аппаратным устройством с настольного компьютера и для отображения данных испытаний или измерений на экране компьютера [8]. С помощью виртуального инструмента, используя производительное и мощное программное обеспечение, инженеры и ученые могут настраивать функции сбора, анализа, хранения, совместного использования и представления информации [9].

Поскольку LabVIEW предоставляет собой простую в использовании среду создания приложений, разработанную специально с учетом потребностей инженеров и ученых, она является неотъемлемой частью виртуальных инструментов [10].

LabVIEW — это графический язык программирования, который использует значки вместо строк текста для создания приложений [11]. Его графическая природа делает его идеальным для приложений тестирования и измерения, автоматизации, сбора и анализа данных [12].

Для детекторов, предназначенных для измерения энергии падающего излучения, наиболее важным фактором является энергетическое разрешение. Этот параметр определяет, как детектор может различать две близко лежащие энергии. Разрешение определяется полной шириной на половине высоты максимума пика (FWHM). Разрешение по энергии  $E$  дается следующим выражением [4]:

$$\text{Разрешение} = \Delta E/E, \quad (1)$$

где  $\Delta E$  — полная ширина на половине высоты.

Приведем краткий обзор литературы по проблеме. Jana, Singh, Gupta et al. [13] разработали недорогой многоканальный анализатор, основанный на цифровой обработке сигналов. В качестве дигитайзера использовалась встроенная звуковая карта персонального компьютера [13]. Система радиационного мониторинга окружающей среды была разработана Hung et al [14]. В этой системе использовался цифровой многоканальный анализатор. Группой Gol, Khakzad, Jamili et al. [15] для измерения характеристик импульса сцинтилляционного детектора использовалась цифро-

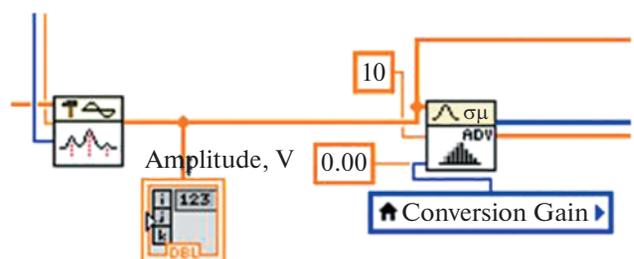


Рис. 3. Часть кода виртуального МСА.

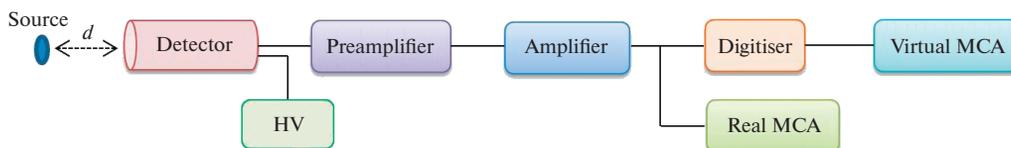


Рис. 4. Схема спектрометра.  $d$  – расстояние от источника до детектора, HV – источник питания высокого напряжения.

вая система сбора данных. Kasani et al. [16] использовали звуковую карту персонального компьютера в качестве дигитайзера в цифровой  $\gamma$ -спектроскопии со сцинтилляционным детектором NaI(Tl). Tektas и Celiktas [17] разработали виртуальный МСА. Для подачи сигналов в их исследовании использовался генератор импульсов. Энергетические  $\gamma$ -спектры получены аналоговым и цифровым методами. Исследовано влияние на энергетическое разрешение емкости предусилителя и расстояния от источника до детектора. Счет в фотопиках также изучался в работе Ermis et al. [18].

В статье [18] виртуальный МСА был создан путем разработки кода. Виртуальный МСА был использован в спектрометре, состоящем из сцинтилляционного детектора NaI(Tl), чтобы выяснить, совместимы ли результаты виртуального и реального МСА. Спектры отображались и сравнивались в обоих МСА для различных расстояний от источника до детектора, определялись также общее количество импульсов, число импульсов в фотопиках, живое время, доля мертвого времени и значения энергетического разрешения.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Виртуальный МСА для использования в спектрометре был разработан с помощью программного обеспечения LabVIEW. Как и в реальном МСА, вертикальная и горизонтальная оси экрана в виртуальном МСА представляют собой отсчеты и номера каналов соответственно. Также возможно отображение спектров в логарифмическом виде на другом экране. Разработанный виртуальный МСА позволяет также определять общее количество импульсов в спектре, живое время и долю

Таблица 1. Общее количество импульсов (ТС), живое время (LT) и доля мертвого времени (DT), полученные реальным и виртуальным МСА

$d$ , см	Реальный МСА			Виртуальный МСА		
	ТС	LT, с	DT, %	ТС	LT, с	DT, %
1	2410520	155.70	22.15	2534720	179.0	10.48
2	1865007	161.76	19.12	1925520	179.9	10.07
3	1490290	166.64	16.68	1550231	180.3	9.852
4	1237452	170.36	14.82	1263439	180.7	9.633

мертвого времени. Последний параметр рассчитывается с использованием уравнения из работы [7]. После этого время жизни рассчитывается с использованием уравнения, приведенного в [6], а также упомянутого во введении. Эти расчеты выполняются разработанным кодом. В дополнение к общему количеству отсчетов можно получить количество отсчетов в выбранной части спектра (области интереса), например число отсчетов в фотопике или в части спектра. Программа также может рассчитать энергетическое разрешение для фотопика в соответствии с уравнением (1). Кроме того, можно сравнивать разные спектры друг с другом. На экране отображается спектр, а индикаторы, показывающие общее количество импульсов (Gross Area), время жизни (Live Time) и долю мертвого времени (Dead Time), расположены справа на передней панели виртуального МСА (рис. 2).

После накопления сигналов виртуальным МСА значения амплитуд сигналов определялись функцией “Peak Detector.vi”. Эти значения были обработаны функцией “Общая гистограмма.vi” и получен спектр. Часть блок-схемы разработанного виртуального МСА представлена на рис. 3.

С целью проверки разработанный виртуальный МСА использовался в  $\gamma$ -спектрометре одновременно с реальным. Система состояла из точечного источника излучения  $^{137}\text{Cs}$  (5 мкКи), сцинтилляционного детектора NaI(Tl) ( $3 \times 3$  дюйма),

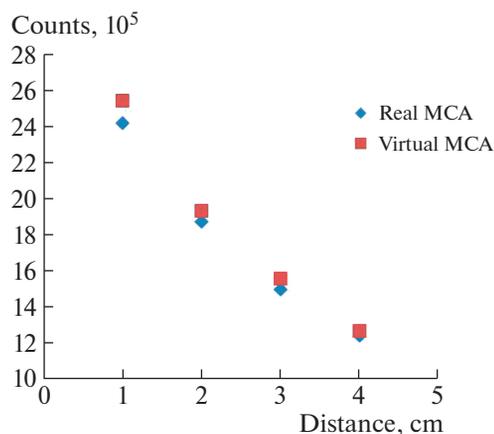
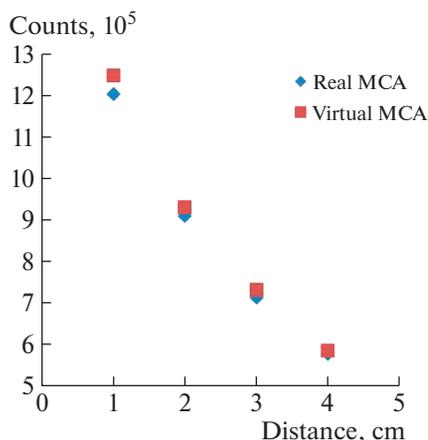


Рис. 5. Общее число отсчетов для различных расстояний источник–детектор.



**Рис. 6.** Отсчеты в фотопиках для разных расстояний источник–детектор.

высоковольтного источника питания (ORTEC 456), предварительного усилителя (ORTEC 113), усилителя (ORTEC 485), реального МСА (ORTEC TRUMP 8k), дигитайзера (NI USB-5133) и разработанного виртуального МСА. Частота дискретизации дигитайзера 100 Мвыб/с, разрешение 8 бит [19]. Используемая экспериментальная установка показана на рис. 4.

Как видно из рисунка, частицы, испускаемые источником излучения, регистрировались сцинтилляционным детектором. Сигналы с детектора поступали на предусилитель и затем на усилитель. Энергетический спектр  $\gamma$ -излучения одновременно отображался в обоих МСА при подаче выходных сигналов усилителя на реальный и виртуальный МСА через дигитайзер.

В эксперименте использовались значения расстояния  $d$  от источника до детектора, равные 1, 2, 3 и 4 см. Результаты, полученные от реального и виртуального МСА сравнивались между собой. Во время измерения реальное время поддерживалось постоянным на уровне 200 с в обоих МСА. Полученные результаты приведены в разд. 3.

**Таблица 2.** Отсчеты в фотопиках, полученные реальным и виртуальным МСА

$d$ , см	Реальный МСА	Виртуальный МСА
1	1 201 331	1 246 604
2	909 556	928 367
3	712 551	730 735
4	575 452	584 585

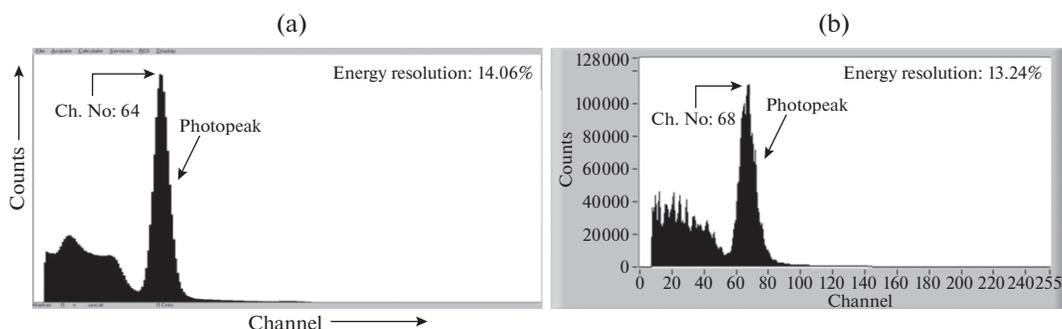
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерений реальным и виртуальным МСА общего количества импульсов, реального времени и доли мертвого времени для различных расстояний от источника до детектора приведены в табл. 1. Данные этой таблицы также показаны графически на рис. 5.

Число импульсов в фотопиках для различных расстояний детектор–источник, полученные каждым МСА, приведены в табл. 2. Данные этой таблицы также показаны графически на рис. 6.

Результаты определения энергетического разрешения для разных расстояний источник–детектор, полученные каждым МСА, приведены в табл. 3.

Формы спектров, отображаемых в реальном и виртуальном МСА, сравнивались между собой в дополнение к результатам, приведенным в таблицах. Формы спектров  $\gamma$ -излучения, отображаемых одновременно в обоих МСА, для расстояний источник–детектор 1 и 4 см, приведены на рис. 7 и 8 соответственно. В реальном МСА максимум фотопика оказывается в 64-м канале при расстоянии источник–детектор 1 см и смещается к 66-му каналу при расстоянии 4 см. В виртуальном МСА максимумы фотопиков, полученных для тех же расстояний, оставались постоянными (68-й канал).



**Рис. 7.** Гамма-спектры, полученные реальным (а) и виртуальным МСА (б) при расстоянии источник–детектор 1 см.

**Таблица 3.** Энергетическое разрешение, измеренное каждым МСА

<i>d</i> , см	Энергетическое разрешение, %	
	Реальный МСА	Виртуальный МСА
1	14.06	13.24
2	13.85	11.76
3	12.12	11.76
4	12.12	10.29

Спектры могут быть представлены обоими МСА также и в логарифмической шкале. В виртуальном МСА при этом использовалась функция “Logarithm Base 10”. Для примера на рис. 9 приведены в сравнении спектры в логарифмической шкале для обоих МСА при расстоянии 4 см.

На рис. 10 для сравнения показаны спектры при минимальном (1 см) и максимальном (4 см) расстояниях источник–детектор для обоих МСА.

Также был написан код для сравнения четырех спектров, соответствующих разным расстояниям от источника до детектора, в виртуальном МСА. Эти спектры показаны на рис. 11. Это сравнение можно провести только для виртуального МСА, поскольку для реального МСА доступно сравнение только двух спектров. В этом преимущество виртуального МСА перед реальным.

Кроме того, виртуальный МСА позволяет выводить на экран сами сигналы. В этом режиме виртуальный МСА выполняет функции виртуального осциллографа. Рис. 12 показывает вид экрана виртуального осциллографа.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

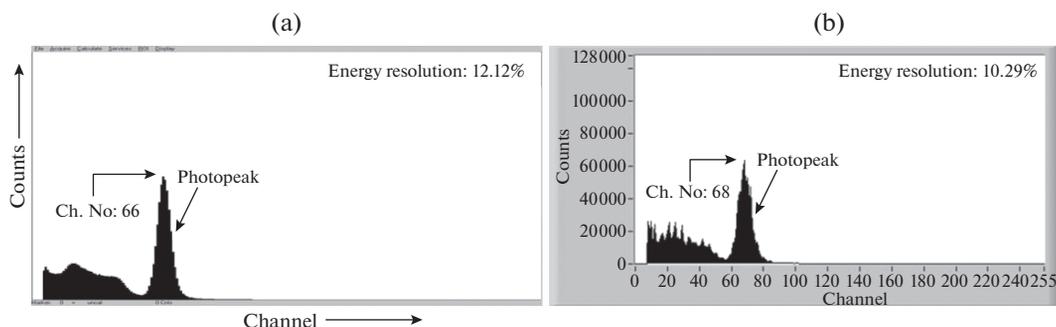
Целью данного исследования была разработка виртуального МСА с помощью программного обеспечения LabVIEW для получения спектра

$\gamma$ -излучения и определения таких параметров, как общее число сосчитанных импульсов, живое и мертвое время и энергетическое разрешение. Спектр отображался в реальном и виртуальном МСА с помощью экспериментальной установки, блок-схема которой представлена на рис. 4. Результаты, полученные с виртуальным и реальным МСА, для различных расстояний от источника до детектора сравнивались между собой. Кроме того, было исследовано, совместимы ли друг с другом формы спектров от обоих МСА.

Если расстояние от источника до детектора увеличивается, количество частиц, попадающих в сцинтилляционный детектор, и, следовательно, общее число импульсов в спектрах уменьшается, согласно данным табл. 1 и рис. 5. Кроме того, уменьшается и число импульсов в фотопике, как видно из табл. 2 и рис. 6. Видно, что живое время увеличилось, а доля мертвого времени уменьшилась с увеличением расстояния. Это означает, что мертвое время уменьшается с уменьшением частоты сигналов.

Энергетическое разрешение, полученное виртуальным МСА, как правило, меньше, чем в случае реального, как видно из табл. 3. Искажения или шум, которые всегда присутствуют в любой цепи, легко изменяют информацию в аналоговом сигнале, но гораздо слабее влияют на состояние логического сигнала [4]. Преимущество виртуального МСА состоит в том, что данные собираются с помощью дигитайзера с высокой частотой дискретизации.

Согласно рис. 7 и 8, формы спектров, отображаемых в обоих МСА, хорошо совместимы друг с другом. Поскольку значения амплитуд сигналов определялись программной функцией в виртуальном МСА, спектры, отображаемые в обоих МСА, не были полностью одинаковыми. Поскольку у нас нет никакой информации о программных функциях, используемых в реальном МСА (это конфиденциальная коммерческая информация), мы не можем комментировать различия в числах, приведенных в таблицах, для обоих МСА.

**Рис. 8.** Гамма-спектры, полученные реальным (а) и виртуальным МСА (б) при расстоянии источник–детектор 4 см.

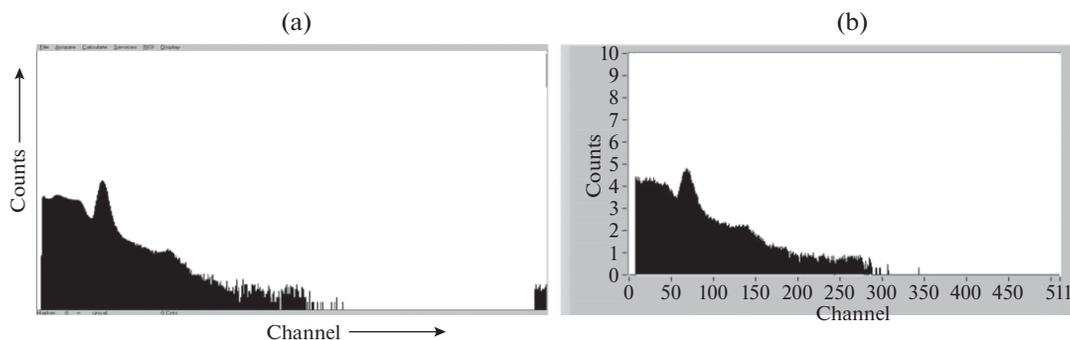


Рис. 9. Спектры в логарифмической шкале, представленные в реальном (а) и виртуальном МСА (б) при расстоянии источник–детектор 4 см.

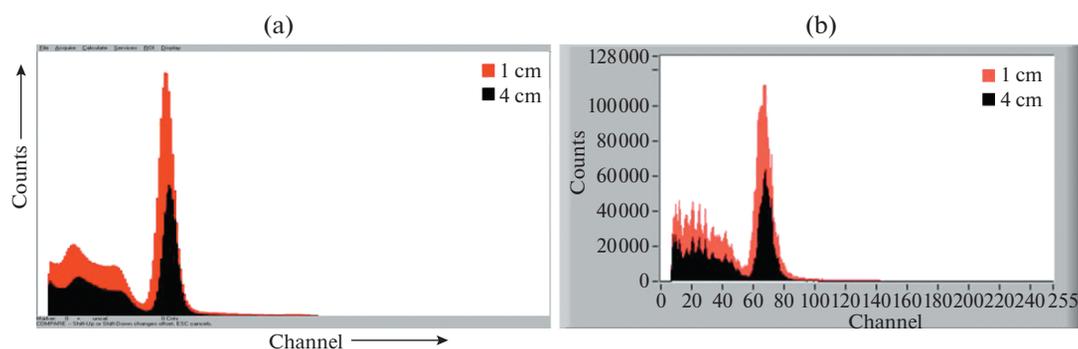


Рис. 10. Спектры при минимальном (1 см) и максимальном (4 см) расстояниях источник–детектор для реального (а) и виртуального (б) МСА.

Измерения показали, что для реального и виртуального МСА формы спектров в логарифмической шкале близко совпадают (рис. 9). Виртуальный МСА также позволяет проводить сравнение спектров (рис. 10). Рис. 11 показывает, что в разработанном виртуальном МСА можно сравнивать четыре спектра, соответствующие разным расстояниям от источника до детектора. Одно из преимуществ разработанного МСА заключается в том, что количество сравниваемых спектров можно увеличивать.

Рисунок 12 демонстрирует, что можно отображать сигналы в виртуальном приборе без необходимости использования реального осциллографа. Эта особенность виртуального инструмента создает определенное преимущество.

Ранее, в работе Tektas and Celiktas [17], сигналы, поступающие от генератора импульсов, накапливались в виртуальном и реальном МСА и полученные результаты сравнивались. В отличие от этой работы, разработанный нами виртуальный МСА был усовершенствован и применен к сцинтилляционному  $\gamma$ -спектрометру. В представленной работе была проверена его работоспособность.

Представленный в данной работе виртуальный МСА был разработан с помощью программного обеспечения LabVIEW для отображения спектров  $\gamma$ -излучения. Экспериментальные результаты показали, что разработанный виртуальный МСА хорошо совместим с реальным МСА и может быть использован для сбора данных для детектирования радиации.

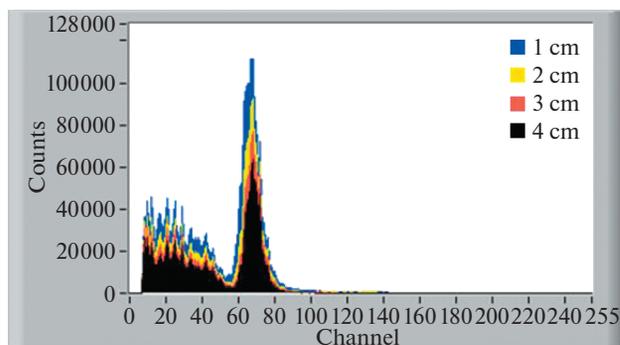


Рис. 11. Сравнение четырех спектров в виртуальном МСА.

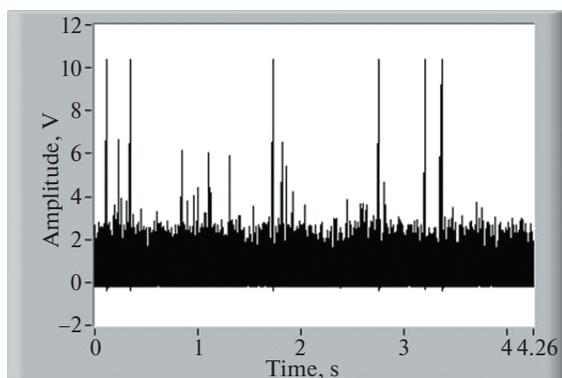


Рис. 12. Экран виртуального осциллографа.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана программа для создания виртуального МСА. Программа была использована в работе  $\gamma$ -спектрометра. Производительность виртуального МСА проверялась путем сравнения его с реальным МСА. По результатам был сделан вывод, что виртуальный МСА можно использовать в спектрометрах для регистрации излучения, как и реальный. Виртуальный МСА также может использоваться в  $\alpha$ -,  $\beta$ - и других спектрометрах в дополнение к  $\gamma$ -спектрометру. Преимущество виртуального МСА заключается в расширении дополнительных возможностей.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

This work was supported by Scientific Research Foundation of Ege University under project No. 14 FEN 052.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsoulfanidis, N., *Measurement and Detection of Radiation*, Second Edition, London: Taylor & Francis, 1995.
2. ORTEC, "Experiment 3 Gamma-Ray Spectroscopy Using NaI(Tl)", <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/third-edition-experiments/3-gamma-ray-spectroscopy-using-nai-tl.pdf?la=en&revision=001dbc1d-9559-49c0-b57d567e28d1b96&hash=456F5A2870DAF80E84F5DB62FF94664B>, Accessed March 8, 2022.
3. ORTEC, "113 Scintillation Preamplifier", <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/brochures/1/113.pdf?la=en&revision=b4309668-2eba-4d6d-8a56-0b62b1ce5ce3>, Accessed March 8, 2022.
4. Leo, W.R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Berlin: Springer-Verlag, 1987.
5. EG & G ORTEC, MAESTRO™ for Windows, Software User's Manual, Software Version 3.2.
6. Gilmore, G., *Practical Gamma-ray Spectrometry*, Second Edition, England: John Wiley & Sons Ltd., 2008.
7. Xdevs, "Keysight Technologies, Oscilloscope Waveform Update Rate Determines Probability of Capturing Elusive Events", [https://xdevs.com/doc/HP\\_Agilent\\_Keysight/5989-7885EN%20English%20%202014-08-02%20%20PDF%202.87%20MB%20c20140903%20%5B12%5D.pdf](https://xdevs.com/doc/HP_Agilent_Keysight/5989-7885EN%20English%20%202014-08-02%20%20PDF%202.87%20MB%20c20140903%20%5B12%5D.pdf), Accessed March 8, 2022.
8. Sumathi, S., Surekha, P., *LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems*, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
9. Jerome, J., *Virtual Instrumentation Using LabVIEW*, New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010.
10. NI, "Virtual Instrumentation", <https://www.ni.com/en-tr/innovations/white-papers/06/virtual-instrumentation.html>, Accessed March 8, 2022.
11. NI, "LabVIEW User Manual", <https://www.ni.com/pdf/manuals/320999c.pdf>, Accessed March 8, 2022.
12. Bitter, R., Mohiuddin, T., Nawrocki, M., *LabVIEW Advanced Programming Techniques*, Second Edition, Boca Raton: CRC Press, 2007.
13. Jana, A., Singh, S.K., Gupta, A., Das, S., Basu, K., Samanta, S., Raut, R., Ghugre, S.S., Sinha, A.K., *Pramana-J. Phys.*, 2020, vol. 94, p. 1, <https://doi.org/10.1007/s12043-019-1880-6>
14. Hung, D.T., Hiep, C.V., Khang, P.D., Hai, N.X., Anh, N.N., Tan, T.D., Chien, D.K., Dien, N.N., Anh, N.T., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, vol. 67, no. 10, p. 2224, <https://doi.org/10.1109/TNS.2020.3019587>
15. Gol, M.G., Khakzad, M., Jamily, S., Ghal-Eh, N., *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2020, vol. 957, p. 1, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163401>
16. Kasani, H., Ashrafi, S., Ghal-Eh, N., *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, vol. 184, p. 1, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109438>
17. Tektas, G., Celiktas, C., *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 2021, vol. 9, no. 2, p. 220, <https://doi.org/10.29109/gujsc.884948>
18. Ermis, E.E., Tektas, G., Pilicer, E., Celiktas, C., Pecousek, J., *Turkish Journal of Physics*, 2014, vol. 38, p. 203, <https://doi.org/10.3906/fiz-1401-10>
19. NI, USB-5133 Oscilloscope Device, <https://www.ni.com/en-tr/support/model.usb-5133.html>, Accessed March 8, 2022.