

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ  
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 681.513.2

USB-АНАЛИЗАТОР ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИИ  
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

© 2021 г. А. Ф. Небесный<sup>а</sup>, И. В. Нам<sup>а</sup>, С. А. Раджапов<sup>б</sup>, Ю. С. Пиндюрин<sup>б</sup>

Поступила в редакцию 23.09.2020 г.  
После доработки 02.11.2020 г.  
Принята к публикации 06.11.2020 г.

DOI: 10.31857/S003281622102018X

На базе микроконтроллера (м.к.) C8051F060 фирмы SiLabs [1] с подключением к персональному компьютеру (п.к.) через порт USB нами разработан и изготовлен двухканальный импульсный анализатор энергетических спектров для регистрации энергии частиц ионизирующего излучения [2, 3]. На его базе может быть собран энергетический спектрометр источников ионизирующего излучения (и.и.и.). Это позволяет проводить регистрацию энергетических спектров с их отображением на экране монитора п.к. в реальном масштабе времени, а также осуществлять накопление информации в виде графиков и таблиц. При построении спектрометра с соответствующим спектрометрическим трактом могут использоваться детекторы различных типов: сцинтилляционные, полупроводниковые, ионизационные камеры, пропорциональные счетчики и др.

Принципиальная схема анализатора представлена на рис. 1, где имеются аналоговая и цифровая части.

Аналоговая часть имеет два канала. Каждый канал содержит согласующий масштабирующий усилитель на операционном усилителе (о.у.)  $DA_3$  [4] и устройство выборки хранения (у.в.х.) на пиковом детекторе (п.д.) с функцией преобразования вида  $y = ax$  [5, 6]. Накопительная емкость каждого п.д. подключена к схеме через полевые ключи на  $DD_1$  [7].

Импульсный сигнал положительной полярности амплитудой до 5 В подается на входы  $A$  и/или  $B$ . Усилитель на о.у.  $DA_3$  обеспечивает согласование уровней благодаря цифровому потенциометру на  $DD_2$ . Это позволяет один раз перед запланированной серией экспериментов проводить калибровку анализатора для приведения регистрируемой амплитуды импульса в соответствие с энергией частицы. Для проведения калибровки используется об-

разцовый и.и.и., характеристики энергии частиц которого известны, и соответственно известен энергетический спектр. Таким образом, спектр может быть преобразован в энергетический спектр.

Микросхема  $DD_2$  содержит два цифровых линейных потенциометра на 256 значений [8], один из которых трехконтактный, а другой двухконтактный. Узел  $Вход+A$  на  $DA_{3-1}$  позволяет программно от п.к. регулировать амплитуду сигнала за счет изменения коэффициента усиления  $K_y$ , а узел  $Вход+B$  на  $DA_{3-2}$  позволяет снижать амплитуду. Это регулирование осуществляется оператором в программе на п.к., а уже по сигналам от п.к. через  $DD_3$  на  $DD_2$  по трехпроводному интерфейсу устанавливается значение сопротивления  $R$  (в  $DD_2$ ), удовлетворяющего требуемым критериям. Полученные значения  $R$  для  $DD_2$  запоминаются в программе и могут быть изменены в последующем при необходимости корректировки.

В начальный момент времени сигналом от м.к. на нормально-разомкнутый ключ  $DD_1$ , с его замыканием и последующим размыканием, осуществляется сброс накопительной емкости п.д., и у.в.х. готово к работе. С выхода  $DA_3$  сигнал поступает на вход у.в.х. ( $DA_1$ ,  $DA_2$  и  $DD_1$ ) и одновременно на вход одного из компараторов м.к.  $DD_3$ . У.в.х. — это классический вариант п.д. [5], дополненный ключами на  $DD_1$ , управляемых от м.к.

Амплитудное значение импульса через нормально-замкнутый ключ  $DD_1$  заряжает емкость п.д. В то же время сигнал, поступивший на вход компаратора, запускает работу аналого-цифрового преобразователя (а.ц.п.), если его амплитуда превышает пороговое значение компаратора, установленное оператором в программе на п.к. Уровень срабатывания компаратора определяется напряжением цифроаналогового преобразователя (ц.а.п.), подаваемым на другой вход компаратора, что и определяет порог анализатора для отсежки шумов в области низких энергий.

<sup>а</sup>Институт ядерной физики АН РУз, Ташкент, Узбекистан.

<sup>б</sup>Физико-технический институт, НПО «Физика-Солнце» АН РУз, Ташкент, Узбекистан.

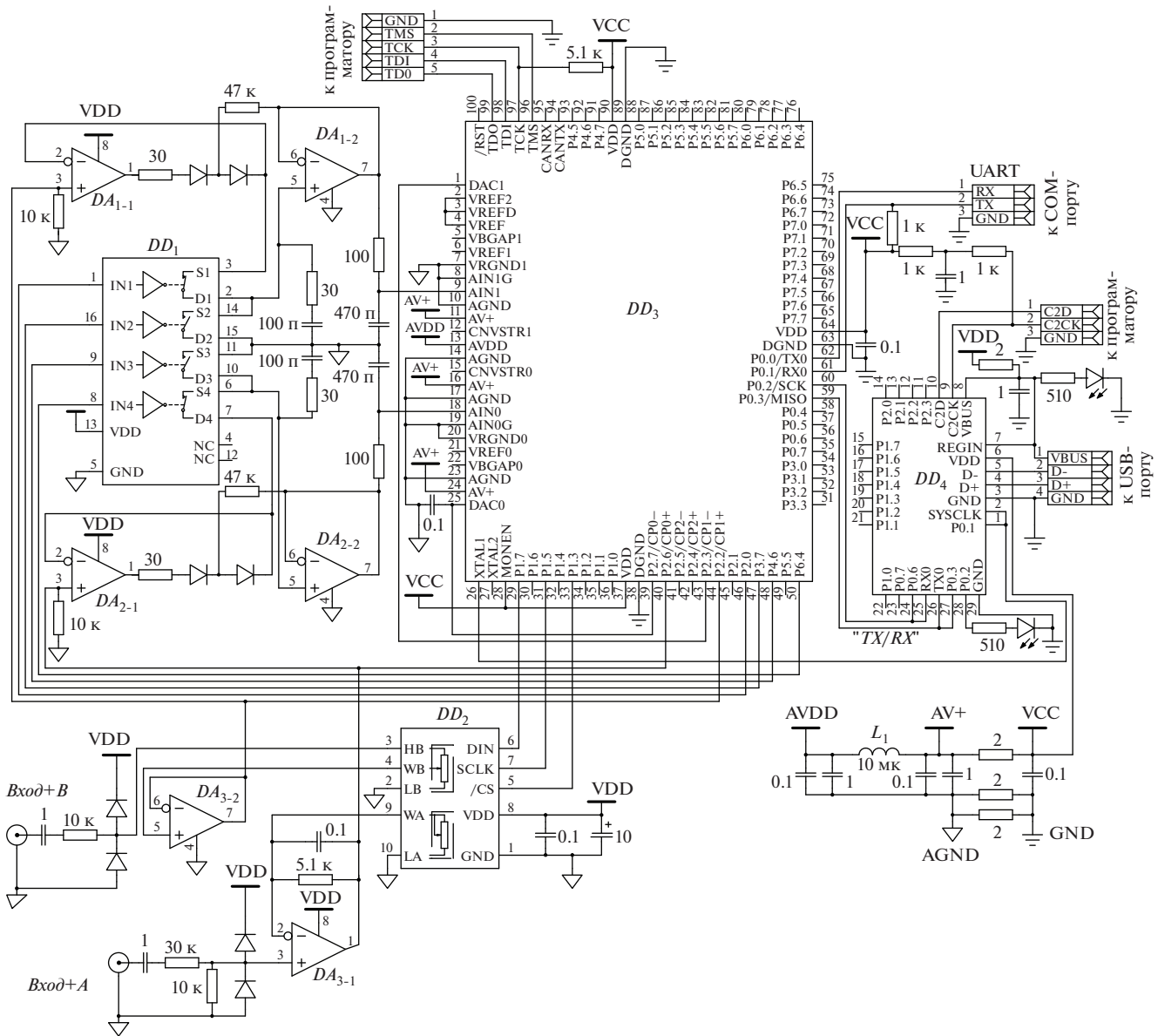


Рис. 1. Принципиальная схема анализатора.  $DA_1$ – $DA_3$  – AD8616;  $DD_1$  – ADG713,  $DD_2$  – MAX5403,  $DD_3$  – C8051F060,  $DD_4$  – C8051F327; диоды – 1N4148.

Таким образом, по сигналу компаратора в а.ц.п. м.к. начинается оцифровка амплитуды импульса, поступившего с выхода у.в.х. По окончании работы а.ц.п. оцифрованное значение поступает на выход м.к., а на  $DD_1$  поступают сигналы, по которым нормально-замкнутый ключ размыкается, а нормально-разомкнутый ключ – замыкается, в результате чего емкость п.д. разряжается. Затем сигналами от м.к. ключи  $DD_1$  приводятся в исходное состояние, и у.в.х. готово к приему следующего сигнала.

Цифровая часть:  $DD_3$  – основной м.к. C8051F060, а  $DD_4$  – вспомогательный м.к. C8051F327, который выполняет преобразование протокола UART в USB и обратно для связи с п.к. и управления от него.

Встроенный в  $DD_4$  преобразователь напряжения обеспечивает питание обоих м.к. напряжением 3.3 В от 5 В USB.

При реализации анализатора использованы встроенные в м.к.  $DD_3$  два компаратора, два ц.а.п., два а.ц.п. с разрядностью 16 бит и временем преобразования 1 мкс.

Конструктивно модуль анализатора представляет собой плату размером 60 × 70 мм. Пассивные элементы – SMD-типа, формата 0805. Питание 5 В осуществляется от USB-порта п.к. На принципиальной схеме не показаны элементы фильтрации по питанию, которые выполнены, как правило, в виде пары емкостей номиналами 0.1 и

1 мкФ или 0.1 и 10 мкФ, где 10 мкФ – танталовая емкость.

Режимы работы анализатора задает оператор в программе хост-компьютера.

**Основные технические характеристики анализатора.** Полярность входных аналоговых сигналов – положительная, диапазон входных аналоговых сигналов 0–5 В, длительность фронта аналогового сигнала  $\geq 0.04$  мкс; число каналов преобразования анализатора – 1024, 2048, 4096, время преобразования 1 мкс; интегральная нелинейность (вся шкала)  $\leq 0.1\%$ , дифференциальная нелинейность  $\leq 1\%$ ; ширина генераторного пика на полувысоте –  $\leq 1$  канал; время установления рабочего режима  $\leq 10$  мин; тип логического сигнала – TTL-совместимый.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты измерений спектра  $\alpha$ -излучения, измеренного по классической схеме энергетического спектрометра: и.и.и., полупроводниковый детектор, зарядочувствительный усилитель (з.ч.у.), спектрометрический усилитель и наш USB-анализатор, сопряженный с п.к. Данная схема спектрометра предназначена для тестирования в вакууме полупроводниковых детекторов с регистрацией энергетических спектров от образцового источника  $\alpha$ -излучения  $^{226}\text{Ra}$ .

Тестировался Si полупроводниковый детектор ионизирующего излучения в вакууммированной камере при комнатной температуре (размеры детектора:  $d = 20$  мм,  $h = 1$  мм) с входным з.ч.у. (з.ч.у. типовой на полевом транзисторе с  $p-n$ -переходом, например КП-303), а также спектрометрический усилитель с варьруемыми динамическими параметрами и системой предварительной аналоговой обработки БУС2-47 стандарта “Вектор”.

Далее сигнал поступал на наш анализатор спектров на базе м.к. С8051F060, сопряженный с С8051F327 для связи с п.к. по USB, и затем на п.к. с ОС Windows-XP. На входе схемы  $DA_{3-1}$  (рис. 1) показан делитель на резисторах с соотношением 1:3, так как источником сигнала нами использовался спектрометрический тракт с питанием  $\pm 15$  В. Как видно из графика, энергетический спектр  $^{226}\text{Ra}$  соответствует литературным данным [9].

Таким образом, реализованный на м.к. С8051F060 анализатор импульсов содержит все необходимые устройства [2, 3]. Высокое быстродействие анализатора в сочетании с хорошими точностными параметрами делают его универсальным прибором, который может успешно использоваться в службах радиационного контроля предприятий различного профиля, в системах экологического мониторинга, в научных исследованиях. Анализатор обеспечивает: задание режимов работы с п.к., визуальный контроль накопления данных в виде графика на экране монитора п.к., накопление и обработку амплитудных распределений с сохранением в виде таблиц. Из-

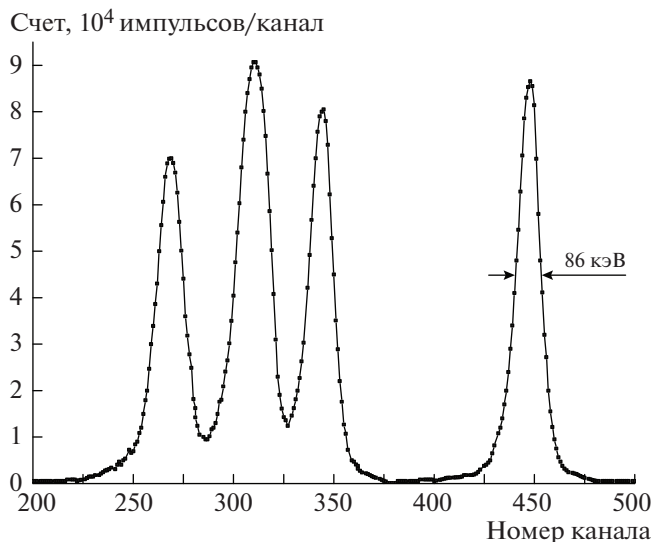


Рис. 2. Энергетический спектр  $\alpha$ -частиц  $^{226}\text{Ra}$  ( $E_{\alpha} = 7.65$  МэВ).

меренные спектры сохраняются в формате \*.txt и могут быть обработаны в любом графическом редакторе типа Exel, Origin или др. Программное обеспечение работает в среде Windows-XP и выше.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/C8051F06x.pdf>
2. *Небесный А.Ф., Нам И.В., Раджапов С.А., Пиндюрин Ю.С.* // II Международный научный форум “Ядерная наука и технологии”. 24–27 июня 2019 года. Алматы, Республика Казахстан. Сборник тезисов. 2019. С. 161.
3. *Nebesniy A.F., Nam I.V., Radjapov S.A., Pindurin Yu.S.* // IX International Conference “Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies”. 24–27 September 2019. Tashkent, Uzbekistan. Book of abstracts. 2019. P. 178.
4. [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8615\\_8616\\_8618.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8615_8616_8618.pdf)
5. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. М.: Бином, 2014.
6. *Небесный А.Ф., Ашууров М.Х., Нам И.В., Нуритдинов И.* // ПТЭ. 2018. № 3. С. 156. <https://doi.org/10.7868/S0032816218030138>
7. [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG711\\_712\\_713.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG711_712_713.pdf)
8. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX5403-MAX5405.pdf>
9. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/practicum/alpha/pages/task.htm>

Адрес для справок: Узбекистан, 100214, Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики АН РУз. E-mail: nanatoly@yandex.ru