

## АДАПТИВНЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР С ВЫСОКОЙ СКОРОСТЬЮ ОБРАБОТКИ СОБЫТИЙ

© 2012 г. А. А. Иванова\*, \*\*, В. И. Алейник\*\*, С. В. Иваненко\*\*, А. Н. Квашнин\*\*,  
Е. А. Пурыга\*, \*\*, А. Ф. Ровенских\*\*, Ю. С. Суляев\*\*, А. Д. Хильченко\*, \*\*

\*Новосибирский государственный технический университет

Россия, 630092, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

\*\*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию 31.03.2011 г.

Описывается адаптивный к виду сцинтиллятора скоростной  $\gamma$ -спектрометр, способный формировать в последовательности временных окон в режиме реального времени (с разрешением  $<4\%$  в диапазоне 20 кэВ–10 МэВ) энергетический спектр  $\gamma$ -квантов при интенсивности их потока до  $10^6$  событий/с. Для разделения наложенных событий и корректного формирования спектров в приборе используются процедуры оцифровки сигнала детектора 14-разрядным а.ц.п. с частотой дискретизации 64 МГц и потоковой обработки формируемых им отсчетов в режиме реального времени.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Гамма-спектроскопия является одной из наиболее информативных диагностик, используемых не только в исследовании по физике плазмы и в управляемом термоядерном синтезе, но и в ядерной физике, в геофизике, в медицине, в комплексах идентификации химического состава различных объектов. Во всех этих приложениях, особенно при исследовании процессов, протекающих в высокотемпературной плазме, особый интерес представляет информация о временной динамике энергетических спектров фотонов. Для ее получения необходима аппаратура, способная за минимальное время формировать такие спектры с достаточной для их анализа статистикой. А это возможно лишь при высокой скорости набора статистического материала и использовании в рамках этого процесса эффективных процедур разделения наложенных событий.

Традиционно, благодаря высокой интегральной и дифференциальной линейности, в  $\gamma$ -спектроскопии используются анализаторы интегрирующего типа. В таких приборах сигнал детектора (сцинтиллятор + ф.э.у.) интегрируется в аналоговой форме в интервале, большем характерной постоянной времени спада вспышки сцинтиллятора. Затем полученные результаты оцифровываются а.ц.п. и передаются в узел цифровой обработки, где в блоке автоинкрементного запоминающего устройства (а.з.у.) формируется энергетический спектр [1]. Среди достоинств этих спектрометров можно отметить хорошее энергетическое разрешение и широкий динамический диапазон для сигналов с большой постоянной времени спада и низкой частотой следования. Недостатки опреде-

ляются характеристиками узла интегрирования, которому свойственны:

- большое мертвое время, связанное с операцией сброса заряда, накопленного от предыдущего события на интегрирующей емкости;
- амплитудная ошибка, обусловленная напряжением сдвига нуля интегратора;
- низкая термостабильность, связанная в основном с интегрирующей емкостью;
- ухудшение энергетического разрешения с течением временем из-за старения элементов интегратора;
- низкое энергетическое разрешение для широкополосных сигналов, определяемое частотной погрешностью операционных схем.

Используемые для устранения этих недостатков решения, как правило, не дают полноценного результата. Например, с помощью вспомогательных аналоговых фильтров, преобразующих форму сигналов детектора, можно уменьшить длительность последних и увеличить тем самым пропускную способность регистрирующего тракта. Эти фильтры позволяют несколько снизить уровень шумов и стабилизировать положение нулевой линии. Однако с уменьшением характерной длительности сигнала существенно возрастают требования к частотным характеристикам основного звена спектрометра – интегратора. Недостатком этого решения является также то, что применение формирующих аналоговых фильтров не допускает замену типа сцинтиллятора без изменения параметров тракта регистрации.

Устранить указанные недостатки можно при переходе к схеме измерительного тракта, в кото-

рой сигнал детектора оцифровывается а.ц.п. повышенной разрядности с высокой частотой дискретизации. Для повышения скорости счета событий в таком спектрометре необходимы эффективные процедуры цифровой обработки отсчетов а.ц.п., направленные на разделение наложенных событий. Наиболее простым и наглядным является метод, основанный на формировании из исходного сигнала детектора, представленного последовательностью отсчетов а.ц.п., короткого импульса гауссовой формы с амплитудой, пропорциональной энергии  $\gamma$ -кванта [2, 3]. Процедура формирования такого импульса сводится к построению цифрового фильтра с необходимой импульсной характеристикой.

## 2. МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ НАЛОЖЕННЫХ СОБЫТИЙ

При проектировании формирующего фильтра использованы прямое и обратное преобразования Фурье. Формирующий фильтр преобразует сигнал детектора  $u(t)$  в короткий и удобный для измерения амплитудных значений сигнал  $g(t)$  гауссовой формы с помощью процедуры свертки

$$g(t) = h(t)u(t) \quad (1)$$

импульсной характеристики фильтра  $h(t)$  с сигналом детектора. Поскольку в спектральном представлении процедура свертки замещается произведением спектральных образов

$$G(f) = H(f)U(f),$$

спектральная характеристика формирующего фильтра определяется в виде

$$H(f) = G(f)/U(f).$$

Импульсная же характеристика фильтра находится с помощью обратного преобразования Фурье  $H(f) \leftrightarrow h(t)$ .

Возможность реализации  $h(t)$  определяется устойчивостью решения уравнения (1) и зависит от частотных характеристик сигналов  $u(t)$  и  $g(t)$ . К числу обязательных условий для корректной реализации  $h(t)$  следует отнести: 1) отсутствие полюсов в функции  $U(f)$  для исключения деления на нуль, 2) более быстрый спад  $G(f)$  по сравнению с  $U(f)$ .

В качестве  $g(t)$  целесообразно выбрать функцию Гаусса такой полуширины, спектр которой в своей значимой части соизмерим со спектром сигнала  $U(f)$ . Очевидно, что чем меньше полуширина  $g(t)$ , тем лучше будет выполняться процедура сжатия сигнала и, соответственно, процедура разделения наложенных событий. Однако при чрезмерном сжатии  $g(t)$  функция  $h(t)$  будет осуществлять значительный подъем в.ч.-составляющих сигнала детектора  $u(t)$ , что приведет к падению соотношения сигнал/шум. С учетом фактора причинности выходной сигнал формирующего фильтра должен появляться за пределами фронта сигнала  $u(t)$ , а его экстремум — за пределами экс-

тремума сигнала детектора. В силу же линейности формирующего фильтра и реализации им принципа суперпозиции входных сигналов этот фильтр в любой текущей временной точке реагирует на сумму всех предыдущих сигналов детектора. Поэтому если импульсная характеристика фильтра рассчитана так, что его отклик на единичный сигнал детектора за короткое время точно выходит на нулевую линию, то это свойство сохранится независимо от того, какие сигналы поступили на его вход — одиночные или наложенные.

## 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАЗДЕЛЕНИЯ НАЛОЖЕННЫХ СОБЫТИЙ

Для проверки процедуры разделения наложенных событий с помощью формирующего фильтра проведено ее численное моделирование в среде MathCAD с использованием модели, в рамках которой сигнал детектора описывается двумя экспонентами

$$u(t) = A \left( e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right),$$

где  $A$  — амплитуда сигнала,  $\tau_1, \tau_2$  — постоянные времени спада и фронта соответственно (рис. 1а).

Желаемый отклик фильтра представлен импульсом Гаусса с на порядок меньшей характерной длительностью по сравнению с постоянной спада сигнала детектора и с амплитудой, пропорциональной амплитуде этого сигнала

$$g(t) = A e^{-\frac{(t-b)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $A$  — амплитуда сигнала,  $b$  — задержка отклика фильтра относительно входного сигнала,  $\sigma$  — длительность результирующего сигнала.

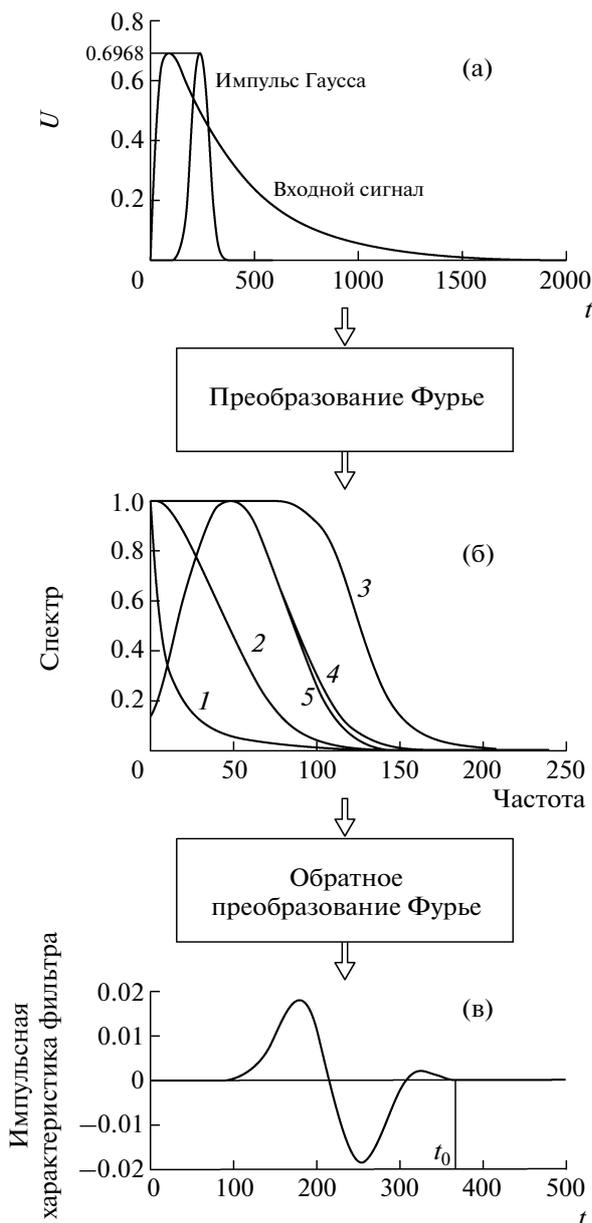
Значимая часть спектральной характеристики фильтра выделялась ее умножением на весовую функцию

$$P(f) = (1 + f^c/k)^{-1},$$

где  $k$  — коэффициент, определяющий полосу пропускания весовой функции,  $c$  — коэффициент, определяющий крутизну спада весовой функции, с хорошей точностью равную 1 в пределах значимой части отношения  $G(f)/U(f)$  и спадающую к нулю за его границами.

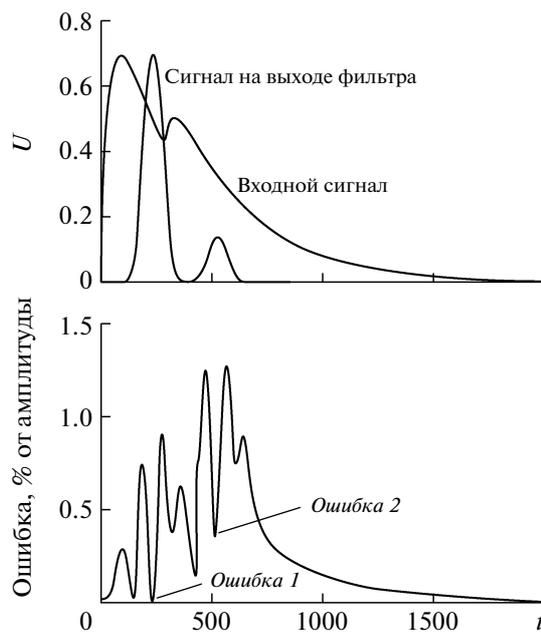
Эта функция используется для подавления в.ч.-шумов входного сигнала. Результирующее спектральное представление  $H(f)$  имеет вид, показанный на рис. 1б, а характер поведения импульсной характеристики формирующего фильтра  $h(t)$ , вычисленный с помощью обратного преобразования Фурье, приведен на рис. 1в.

Видно, что результирующая импульсная характеристика фильтра является конечной, достаточно быстро затухает и может быть ограничена



**Рис. 1.** Методика расчета импульсной характеристики фильтра. 1 – спектр входного сигнала, 2 – спектр выходного сигнала, 3 – а.ч.х. фильтра нижних частот, 4 – результат деления спектра выходного сигнала на спектр входного сигнала ( $2/1$ ), 5 – результат умножения а.ч.х. фильтра нижних частот на результат деления спектра выходного сигнала на спектр входного сигнала ( $4 \times 3$ ).

до  $t_0$  отсчетов по времени. Такой фильтр может быть реализован и аналоговым способом, но подстройка его характеристики под параметры сигнала детектора будет достаточно трудоемкой. Лучшими возможностями в этом отношении обладает цифровой фильтр (погрешность его работы оценивалась в рамках численного моделирования



**Рис. 2.** Результаты численного моделирования. Ошибка 1 = 0.0012%, Ошибка 2 = 0.04% – погрешности восстановления сигнала в области 1-го и 2-го максимумов.

операции свертки его импульсной характеристики с сигналом детектора  $u(t)$ ).

Поскольку амплитуда выходного импульса фильтра пропорциональна энергии  $\gamma$ -кванта, то наиболее значимой для спектрометрических приложений является погрешность преобразования фильтра в окрестности максимума сигнала детектора. Компенсация погрешностей, возникающих за счет усечения спектров и ограничения массива точек, описывающих с помощью соответствующих коэффициентов импульсную характеристику фильтра, проводилась коррекцией значений последних членов этого массива, а изменением значения первых из них настраивалось точное соотношение 1 : 1 амплитуд входного и выходного сигналов.

Моделирование в среде MathCAD (рис. 2) показало возможность реализации тракта регистрации с блоком разделения наложенных событий, основанным на методе формирования короткого выходного импульса Гаусса с амплитудой, пропорциональной энергии  $\gamma$ -кванта. Что, собственно, и позволило остановиться на схеме построения тракта регистрации спектрометра, в которой поток  $\gamma$ -квантов фиксируется сцинтилляционным детектором (сцинтиллятор + ф.э.у.), сигнал детектора оцифровывается быстродействующим а.ц.п., а последовательность отсчетов последнего проходит через цифровой формирующий фильтр. На выходе фильтра одиночные и наложенные события преобразуются в короткие импульсы гаус-

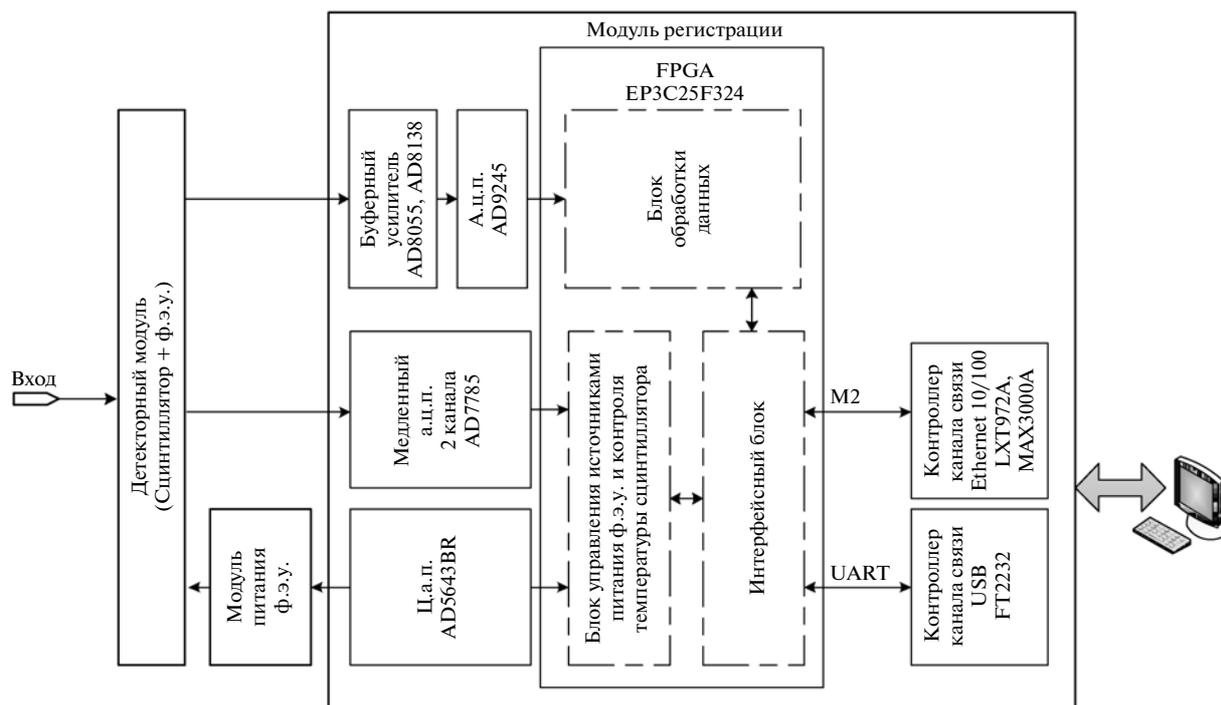


Рис. 3. Функциональная схема адаптивного высокоскоростного  $\gamma$ -спектрометра.

совой формы, амплитудный спектр которых соответствует энергетическому спектру исходного потока  $\gamma$ -квантов.

#### 4. АДАПТИВНЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР

Функциональная схема быстродействующего, адаптивного к типу детектора  $\gamma$ -спектрометра, использующего описанную выше методику цифровой обработки сигналов, приведена на рис. 3.

В этом приборе  $\gamma$ -кванты регистрируются детектором, в котором в зависимости от приложения в качестве сцинтиллятора используются кристаллы NaI(Tl) или BGO с характерными постоянными времени высвечивания  $\sim 230$  и  $\sim 300$  нс, соответственно. Энергетическое разрешение сцинтилляторов на линии  $^{137}\text{Cs}$  (662 кэВ) составляет  $\sim 8.5\%$  для NaI(Tl) и  $\sim 10\%$  для BGO. Кристаллы BGO используются, когда необходимо хорошее энергетическое разрешение ( $\sim 3\%$ ) в высокоэнергичной области спектра фотонов (8–10 МэВ). В качестве фотоприемников в детекторах применены ф.э.у. Photonis XR3312B и Hamamatsu R6231. В детекторный модуль для контроля температуры сцинтиллятора встроен датчик на основе платинового сопротивления.

Помимо детектора, значимым элементом спектрометра является модуль питания с вспомогательными элементами управления и контроля. Его функциональная схема приведена на рис. 4.

Первичным элементом данного источника является AC–DC-конвертор (КАМ1512), преобразующий напряжение сети (220 В) в постоянное (+12 В). Для работы спектрометра с максимальным энергетическим разрешением стабильность напряжений питания динодов ф.э.у. должна быть  $\geq 0.1\%$ , в том числе и в режиме большой загрузки детектора ( $\sim 10^6$  событий/с). Эту задачу решает двухканальный формирователь напряжений питания, построенный на основе управляемых DC–DC-преобразователей MHV12-1,5K1300N и C05N, имеющих линейную зависимость выходного напряжения от опорного. Для динодов с наибольшим токопотреблением применена схема активной стабилизации напряжений (транзисторы  $T_1$  и  $T_2$ ). Перестройка каналов источника питания ф.э.у. производится одновременно. Выходное напряжение высоковольтного канала (MHV12-1,5K1300N) перестраивается в диапазоне  $-700 \dots -1400$  В, вспомогательного  $-150 \dots -300$  В. Управляющий сигнал, выполняющий функции опорного для DC–DC-преобразователей, формируется 16-разрядным ц.а.п. AD5543BR, размещенным на плате модуля регистрации и обработки данных. Принцип программного управления выходными напряжениями источников питания ф.э.у., реализованный с помощью данного ц.а.п., принципиально важен для рассматриваемого прибора. Он позволяет, учитывая сильную зависимость коэффициента усиления ф.э.у. от напряжений питания его динодной системы, оператив-

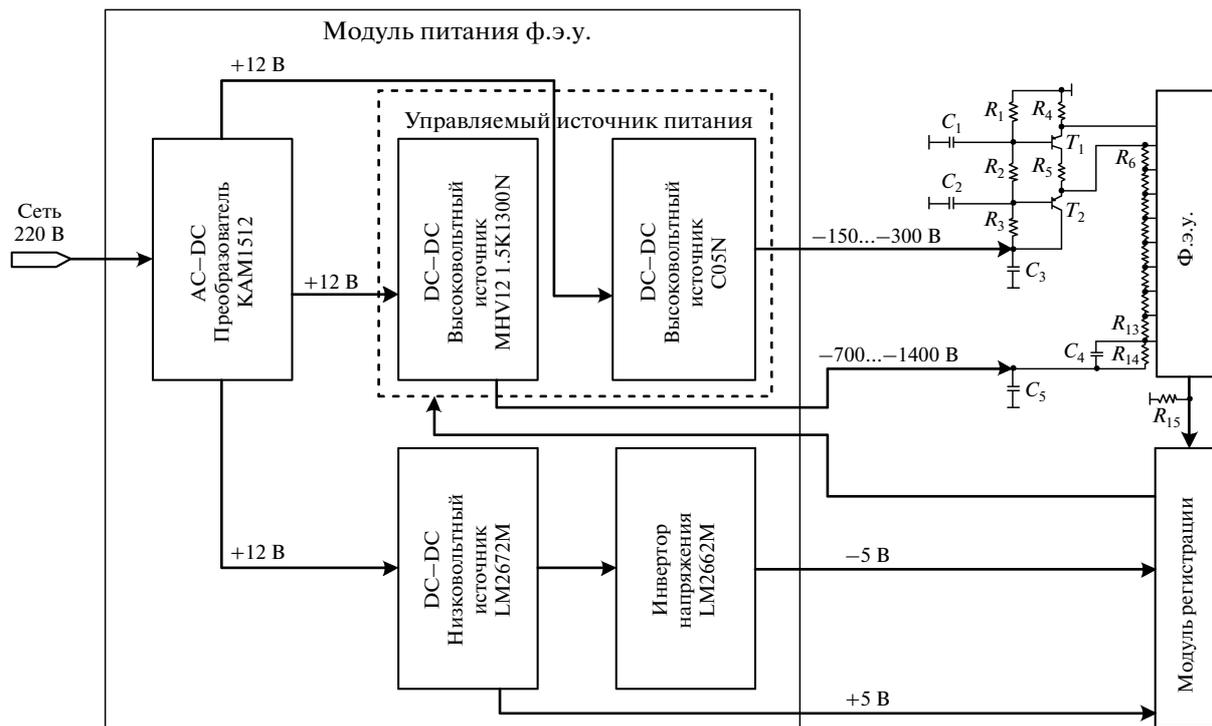


Рис. 4. Функциональная схема модуля питания ф.э.у.

но перестраивать энергетическую шкалу спектрометра.

Вспомогательные каналы источника, построенные на основе стабилизатора LM2672M и инвертора напряжения LM2662M, формируют набор напряжений, используемых для питания основного элемента спектрометра, – модуля регистрации и обработки данных.

Тракт аналого-цифрового преобразования этого модуля построен на основе 14-разрядного а.ц.п. AD9245 с максимальным значением частоты дискретизации 64 МГц. Выбор столь высокой разрядности а.ц.п. обусловлен широким энергетическим спектром регистрируемых спектрометром  $\gamma$ -квантов (20 кэВ–10 МэВ). Указанное выше значение частоты дискретизации а.ц.п. соответствует постоянным времени выходных сигналов детекторов на основе кристаллов NaI(Tl) и BGO. Задачу согласования амплитудного динамического диапазона а.ц.п. с амплитудными параметрами сигналов детектора решает вспомогательный буферный усилитель, построенный на основе широкополосных операционных усилителей AD8055 и AD8138.

Ключевым элементом модуля регистрации и обработки данных является цифровой узел, построенный на основе FPGA (Field Programmable Gate Array – конфигурируемая пользователем логическая матрица) EP3C25F324 семейства Cyclone III. В его состав входят следующие базовые блоки:

- обработки данных;
- управления источниками питания ф.э.у. и контроля температуры сцинтиллятора;
- сопряжения с вычислительной техникой (интерфейсный блок).

На рис. 5 представлена функциональная схема блока обработки данных. В нем отсчеты а.ц.п. поступают сначала на рекурсивный фильтр первого порядка

$$y[n] = a_0x[n] + b_1y[n - 1]$$

с коэффициентами  $a_0 = 0.5$ ,  $b_1 = 0.5$ , подавляющий в.ч.-шумовые компоненты сигнала детектора. Затем этот сигнал в виде последовательности уже очищенных от шумов отчетов а.ц.п. поступает на вход формирующего фильтра, выполняющего процедуру дискретной свертки

$$g_k = \sum_{n=-1}^N h_n u_{k-n}$$

выборочных значений сигнала детектора  $u_{k-n}$  с импульсной характеристикой фильтра, представленной массивом из  $N$  коэффициентов  $h_n$ .

В качестве примера на рис. 6 в графическом виде приведена импульсная характеристика формирующего фильтра для сцинтиллятора NaI(Tl), представленная 20 коэффициентами ( $N = 20$ ). Она получена в результате численной обработки по описанной выше методике сигнала детектора,

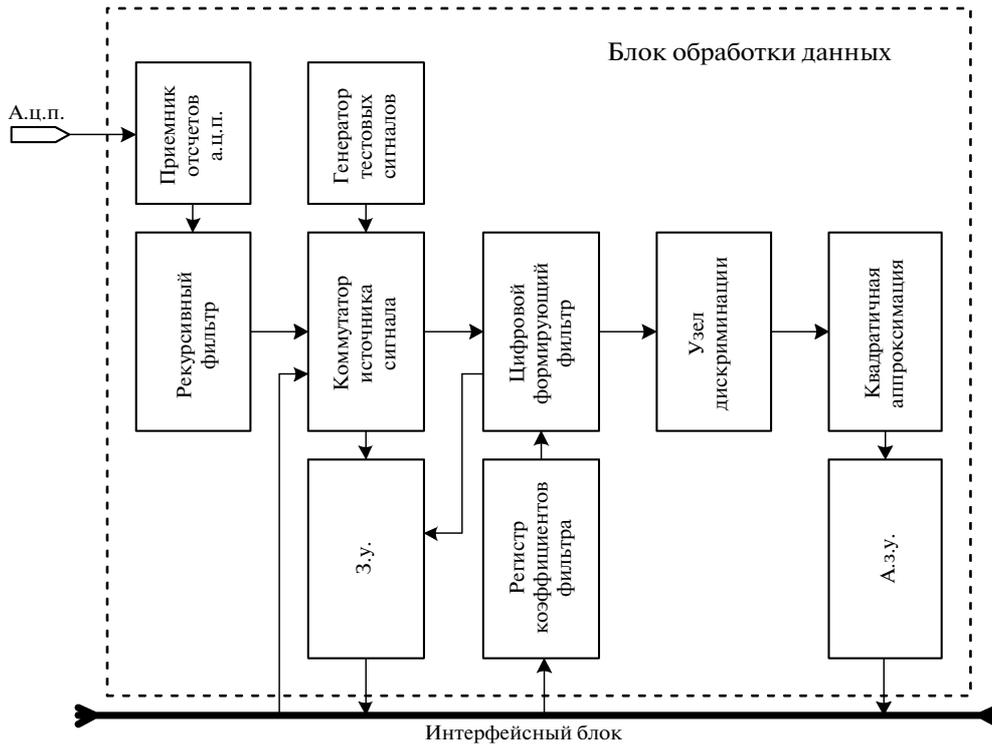


Рис. 5. Функциональная схема блока обработки данных.

оцифрованного с частотой дискретизации 64 МГц 14-разрядным а.ц.п.

Сигналы с выхода формирующего фильтра поступают на узел дискриминации, где выделяются импульсы с амплитудой, превышающей пороговый уровень, соответствующий минимальной энергии фиксируемых спектрометром  $\gamma$ -квантов. Так как сигнал на выходе фильтра монотонный, выделить область максимума его амплитуды можно по трем последовательным отсчетам —  $y_1, y_2, y_3$ . Если вы-

полняется условие:  $y_1 < y_2 > y_3$ , то отсчет, соответствующий  $y_2$ , близок к максимуму сигнала. С пороговым уровнем, задаваемым программно и хранящимся в виде двоичного числа в соответствующем регистре управления спектрометра, сравнивается именно это, близкое к максимальному значению выходного сигнала фильтра. Помимо низкоэнергичного фона, дискриминатор отбраковывает сигналы с амплитудой, выходящей за пределы шкалы преобразования а.ц.п. Это действие направлено на исключение сигналов от фотонов с энергией, выходящей за пределы энергетической шкалы спектрометра (космические факторы, паразитный высокоэнергичный фон). При появлении таких сигналов а.ц.п. формирует флаг перегрузки, блокирующий работу узла дискриминации в интервале порядка нескольких постоянных времени спада сигнала детектора ( $\sim 1$  мкс).

Полезные события, выделенные дискриминатором, обрабатываются блоком квадратичной аппроксимации отсчетов. Он ориентирован на вычисление истинного значения максимума выходного сигнала формирующего фильтра, которое может не соответствовать точке отсчета. Появляющуюся без выполнения этой процедуры погрешность в определении максимума сигнала легко оценить, предположив, что гауссоида с параметрами, заложенными в расчет импульсной характеристики фильтра, оцифровывается с частотой дискретизации 64 МГц идеальным а.ц.п.

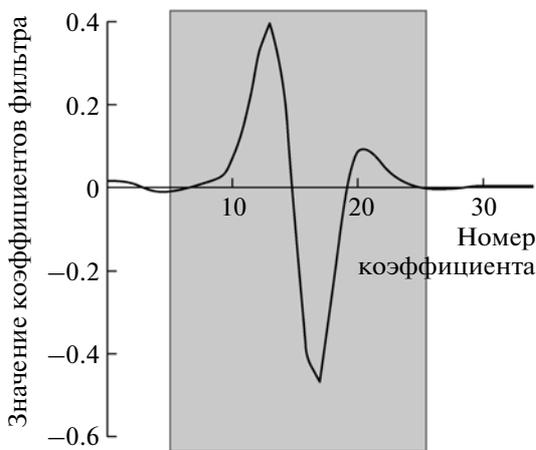


Рис. 6. Импульсная характеристика формирующего фильтра для кристалла NaI(Tl).

При наихудшем варианте распределения отсчетов ошибка в максимуме сигнала составит ~3%, что соизмеримо с энергетическим разрешением сцинтиллятора. Блок квадратичной аппроксимации уменьшает эту погрешность почти на два порядка. Поскольку гауссоиду в области максимума можно аппроксимировать параболой, то ее истинное амплитудное значение можно определить по трем последовательным и близким к максимальному отсчетам, воспользовавшись известной формулой

$$y_{\max} = y_2 + \frac{(y_3 - y_1)^2}{8((y_2 - y_1) + (y_2 - y_3))}.$$

Выделенные таким образом значения максимума сигналов поступают на блок а.з.у., фиксирующий в табличном виде энергетический спектр потока фотонов, зарегистрированных спектрометром. В а.з.у. накапливается массив чисел с порядковыми номерами, каждый из которых соответствует конкретной амплитуде (энергии)  $\gamma$ -квантов, а значение — количеству зафиксированных событий с данной энергией. А.з.у. построено на основе 32-разрядных блоков RAM (Random Access Memory — память с произвольным доступом) FPGA емкостью 4096 слов. Перед рабочим циклом в ячейки RAM записываются нули. Во время набора статистики максимальное значение амплитуды сигнала, выделенное описанными ранее блоками, используется в качестве указателя адреса текущей ячейки RAM. В процессе обработки каждого события содержимое ячейки, адрес которой соответствует энергии  $\gamma$ -кванта, считывается, инкрементируется и записывается обратно. Таким образом, в рамках этой процедуры на временном интервале, длительность которого задается программно, в а.з.у. формируется энергетический спектр зафиксированных спектрометром  $\gamma$ -квантов.

Для передачи накопленного в а.з.у. информационного массива вычислительной технике с целью его дальнейшей обработки, загрузки в блок обработки данных спектрометра массивов управляющих констант, контроля температуры сцинтиллятора и текущих значений выходных напряжений источников питания ф.э.у. используются контроллеры унифицированных каналов связи USB или Ethernet-10/100. Канал связи USB ориентирован на поддержку работы спектрометра в лабораторных условиях. Он обеспечивает высокую скорость информационного и командного обмена на относительно небольших расстояниях. Канал Ethernet-10/100 применяется в качестве средства сопряжения спектрометра с вычислительной техникой на крупных экспериментальных комплексах, характеризующихся распределенной архитектурой систем регистрации и сбора данных. Контроллеры указанных каналов связи, помимо командного и информационного обмена с вычислительной техникой, поддерживают очень

эффективные с эксплуатационной точки зрения процедуры удаленной модификации структуры и логики работы цифрового узла  $\gamma$ -спектрометра с помощью операции загрузки по сети конфигурационного файла FPGA. Эта операция позволяет при необходимости изменить логику работы модуля регистрации и обработки данных спектрометра, включить в его состав новые функциональные блоки, необходимые для конкретного приложения.

Приемо-передающие узлы контроллеров каналов связи USB и Ethernet спектрометра построены на основе специализированных интегральных схем FT2232 и LXT972A. Вспомогательная программируемая матрица семейства MAX3000A предназначена для поддержки процедуры загрузки по каналу связи Ethernet конфигурационного файла FPGA. В процессе работы спектрометра в штатном режиме она выполняет функции обычного ретранслятора информационных и командных посылок. Контроллер Ethernet-10/100 поддерживает информационный и командный обмен с вычислительной техникой “сырыми” пакетами формата IEEE 802.3 в режиме “запрос—ответ”.

Помимо описанных выше блоков, в состав модуля регистрации и обработки данных спектрометра входит ряд вспомогательных элементов, существенно расширяющих его функциональные возможности. К их числу относятся:

- набор управляющих регистров, задающих текущий режим работы спектрометра, его энергетическую шкалу, длительность интервала набора статистики, уровни дискриминации, импульсную характеристику формирующего фильтра;
- двухканальный цифровой осциллограф;
- счетчики общего количества событий, событий, отброшенных в узле дискриминации, а также наложенных событий, не разделенных формирующим фильтром с достаточной точностью;
- 20-разрядный а.ц.п., фиксирующий с дискретностью 1 с текущие значения температуры сцинтиллятора и выходного напряжения источника питания ф.э.у.;
- вспомогательное RAM управляющих констант и узел коррекции амплитудного значения сигнала детектора в зависимости от текущих значений температуры сцинтиллятора;
- ц.а.п. управления источниками питания ф.э.у.;
- генератор тестовых сигналов, используемый при проверке и настройке основных узлов спектрометра.

Назначение управляющих регистров понятно из контекста. Цифровой же осциллограф, включающий в свой состав базовый а.ц.п. спектрометра и двухканальный буфер данных на основе RAM с соответствующей схемой управления, предназначен для фиксации формы выходных сигналов детектора и формирующего фильтра.

Именно эта опция позволяет относительно простыми средствами адаптировать характеристики тракта обработки данных спектрометра к параметрам используемого совместно с ним детектора. Выполняется эта процедура следующим образом. Сначала форма выходного сигнала детектора фиксируется в виде последовательности отсчетов а.ц.п. в RAM цифрового осциллографа. Затем накопленный массив данных передается по системе связи в компьютер, где по описанной ранее методике вычисляются коэффициенты, задающие необходимую для данного детектора импульсную характеристику формирующего фильтра. На заключительном этапе массив этих коэффициентов загружается в соответствующие управляющие регистры спектрометра, и производится инициация его рабочего цикла. В рамках этого цикла цифровым осциллографом фиксируется форма сигнала детектора и форма сигнала-отклика формирующего фильтра. Затем полученные массивы данных передаются по каналу связи в компьютер для проверки корректности работы формирующего фильтра. При необходимости цикл формирования массива коэффициентов данного фильтра или оптимизации численных значений этих коэффициентов может быть повторен.

Вспомогательный 20-разрядный  $\Sigma$ - $\Delta$ -а.ц.п. AD7785 выполняет в спектрометре контрольные функции. Он, как указывалось ранее, фиксирует с заданной периодичностью текущие значения выходного напряжения источника питания ф.э.у. и температуры сцинтиллятора с погрешностью  $<0.01\%$ , которые затем в качестве контрольных констант передаются в компьютер.

Результаты измерения температуры сцинтиллятора используются также во вспомогательном, но очень важном с прикладной точки зрения элементе спектрометра — узле коррекции амплитудных значений сигнала детектора. Этот узел включается между рекурсивным и корректирующим фильтрами и призван устранять характерную для многих сцинтилляторов зависимость интенсивности формируемого ими отклика на  $\gamma$ -квант от температуры. Корректор содержит RAM с таблицей коэффициентов, задающих масштаб поправки в зависимости от температуры, и умножитель с плавающей запятой, корректирующий поступающие на него отсчеты а.ц.п. по амплитуде в соответствии с текущим значением поправочного коэффициента. Поскольку результаты измерения температуры сцинтиллятора а.ц.п. AD7785 используются в качестве адреса-указателя ячейки RAM, процедура коррекции амплитудных значений сигнала детектора выполняется во время работы спектрометра в режиме набора статистики автоматически. RAM корректирующих коэффициентов доступно для операций записи со стороны канала связи. Это обстоятельство позволяет удаленно менять значения поправочных коэффици-

ентов. Например, при изменении типа детектора, используемого совместно со спектрометром.

Ц.а.п., входящий в состав модуля регистрации и обработки данных спектрометра, как это уже отмечалось выше, предназначен для формирования опорного напряжения, управляющего источниками питания ф.э.у. Он используется для перестройки энергетической шкалы спектрометра, позволяя при высоких значениях напряжения на ф.э.у. ( $-1400$  В) существенно улучшить его энергетическое разрешение. В качестве примера на рис. 7а, б приведены спектры, характерные для радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  (663 кэВ) и  $^{60}\text{Co}$  (1.17 и 1.33 МэВ) (рис. 7а), а также  $^{133}\text{Ba}$  (32, 81, 384 кэВ) (рис. 7б), полученный во время тестовых лабораторных испытаний спектрометра при разных значениях напряжения питания ф.э.у. (со шкалой, настроенной на диапазон 50 кэВ–1.5 МэВ и 25 кэВ–0.5 МэВ, соответственно).

Генератор тестовых сигналов, входящий в состав модуля регистрации и обработки данных, используется на этапах поверки и настройки основных узлов спектрометра.

Работа  $\gamma$ -спектрометра апробирована в эксперименте по обнаружению азотсодержащих примесей на тандем-ускорителе ВИТА в ИЯФ СО РАН [4, 5]. Метод идентификации азотсодержащих примесей заключается в следующем: пучок протонов (энергия  $\sim 1.75$  МэВ, ток на мишень до 3 мА) поглощается на мишени  $^{13}\text{C}$ ; в результате ядерных реакций образуется  $^{14}\text{N}$  с испусканием  $\gamma$ -кванта; исследуемый объект облучается  $\gamma$ -квантами, набирается спектр прошедших  $\gamma$ -квантов. По соотношению в результирующем энергетическом спектре интенсивностей резонансной (9.17 МэВ) и нерезонансной (8.06 МэВ) линий поглощения в азоте выносится решение о содержании азота в исследуемом объекте. На рис. 8 приведен энергетический спектр прошедших через исследуемый объект  $\gamma$ -квантов.

Большая величина шумов обусловлена малым количеством набранных событий. Несмотря на это, на графике видно, что энергетические пики 8.06 и 9.17 МэВ разделяются, и их амплитуды определяются с достаточной точностью.

## 5. БАЗОВОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для сопряжения  $\gamma$ -спектрометра с вычислительной машиной по унифицированным каналам связи USB/Ethernet-10/100 на языке Borland C++ в среде Builder 6 создано прикладное программное обеспечение (п.п.о.), работающее под управлением операционной системы семейства Windows. Это п.п.о. поддерживает исполнение следующих процедур:

- **загрузки:**

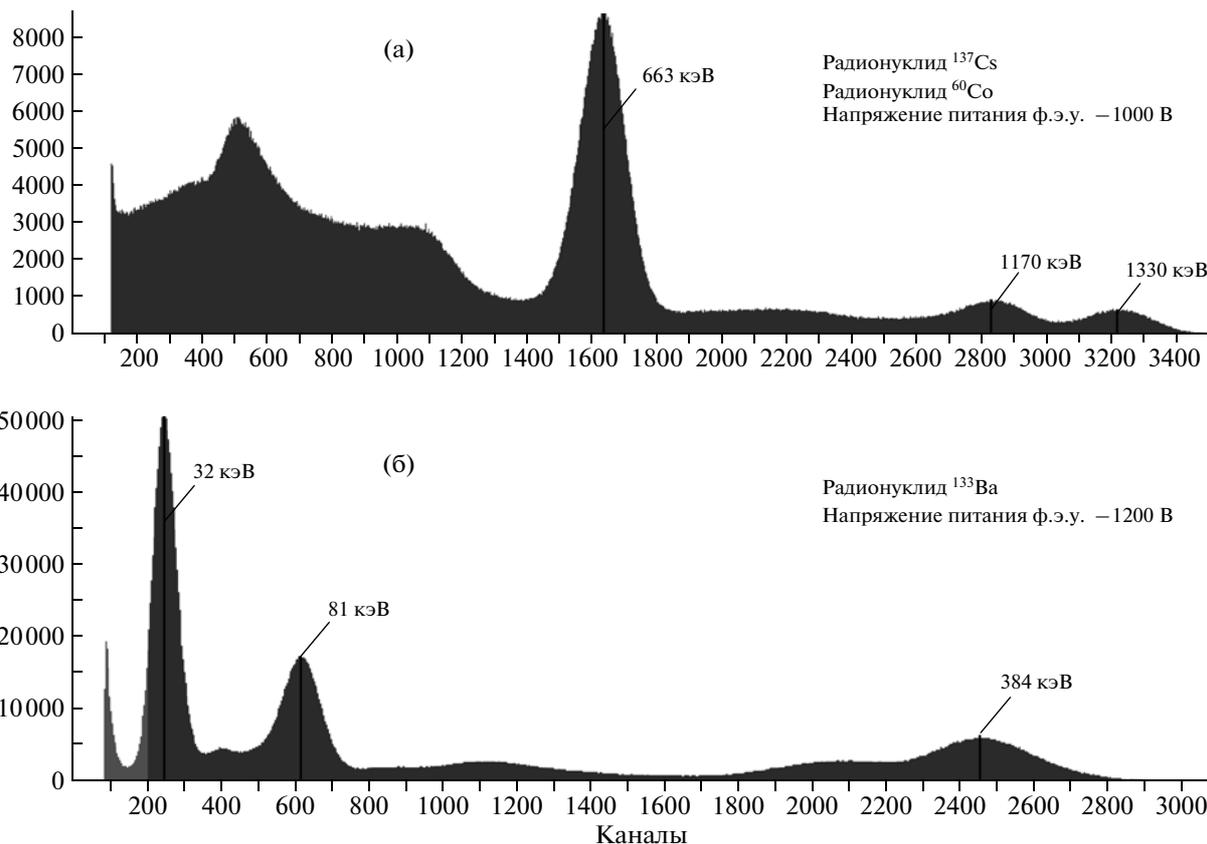


Рис. 7. Энергетические спектры  $\gamma$ -квантов, излучаемых изотопами: а —  $^{137}\text{Cs}$  (663 кэВ) и  $^{60}\text{Co}$  (1.17 и 1.33 МэВ); б —  $^{133}\text{Ba}$  (32, 81, 384 кэВ).

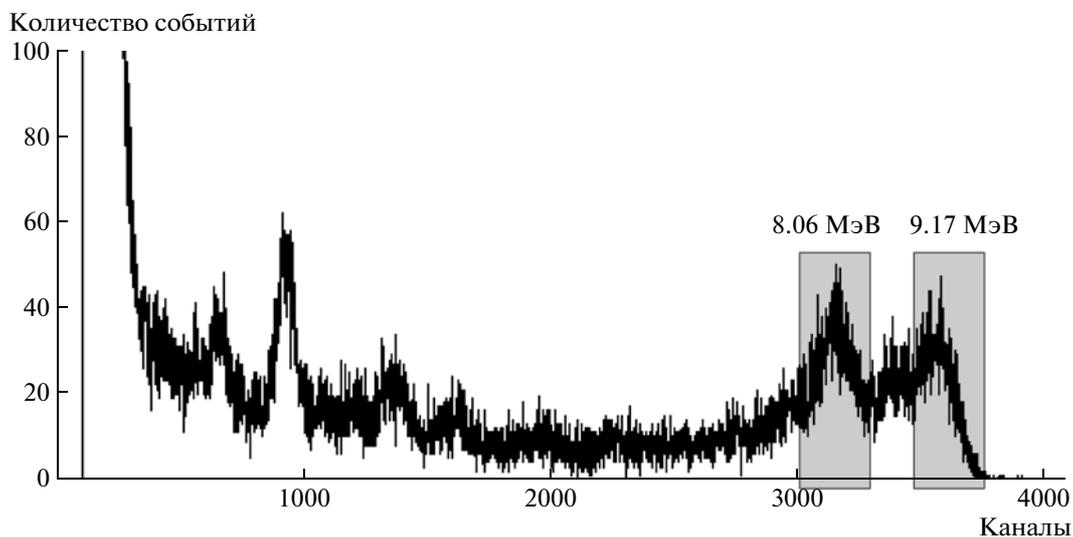


Рис. 8. Результаты экспериментальной проверки  $\gamma$ -спектрометра на тандем-ускорителе ВИТА (ИЯФ СО РАН).

- конфигурационного файла в FPGA спектрометра;
- таблицы коэффициентов в регистры формирующего фильтра;
- в регистры управления — констант, задающих текущее значение напряжения питания ф.э.у.,

порог регистрации  $\gamma$ -квантов, а также режим работы  $\gamma$ -спектрометра;

• чтения из внутренних блоков памяти регистратора и отображения на консоли оператора;

- энергетического спектра;

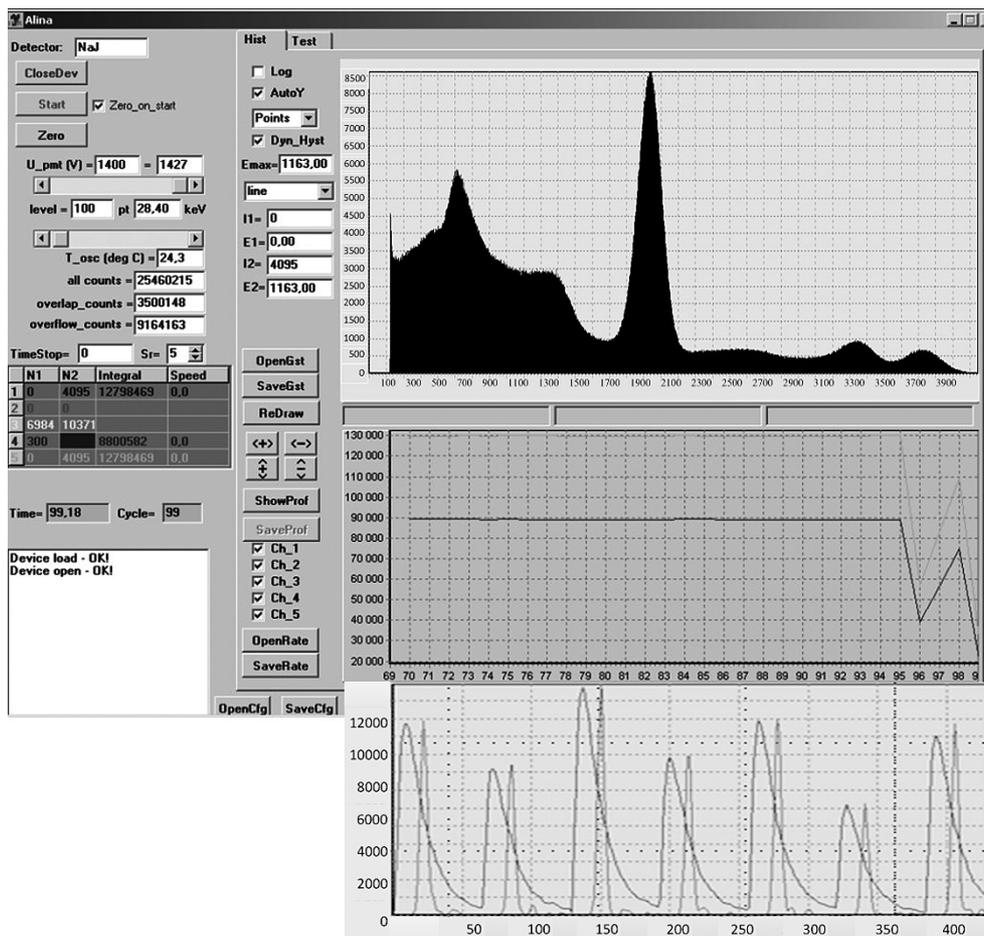


Рис. 9. Панель оператора.

- профиля сигнала в контрольных точках;
- **чтения из управляющих регистров** и отображения в соответствующих окнах консоли:
  - текущих значений температуры сцинтиллятора;
  - общего количества событий, вызвавших перегрузку измерительного тракта и необработанных  $\gamma$ -спектрометром;
  - **выделения энергетических окон** и отображения характерных для них текущих значений скорости набора статистики на консоли;
  - **сохранения информации** на жестком диске консольного компьютера в виде текстового файла, содержащего энергетический спектр  $\gamma$ -квантов за интервал набора статистики.

Панели оператора для работы с интерфейсами USB и Ethernet-100 выглядят одинаково (рис. 9).

В верхнем графическом окне панели отображается накопленный энергетический спектр. В ее левом управляющем поле задаются текущие значения напряжения питания ф.э.у., длительность интервала набора статистики, границы энергетических зон и другие параметры, определяющие

режим работы спектрометра. Под окном отображения спектра выводятся графики скорости счета событий для каждой энергетической зоны или осциллограммы сигналов на входе и на выходе формирующего фильтра.

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Экспериментальная проверка показала, что реализация в  $\gamma$ -спектрометре процедур разделения наложенных событий цифровым методом позволила при сохранении аппаратного энергетического разрешения  $\sim 4\%$  в диапазоне 20 кэВ–10 МэВ в десятки раз повысить скорость счета (расчетная скорость счета  $\gamma$ -спектрометра до  $10^6$  событий/с). Положительные результаты, полученные при тестовой проверке описанного  $\gamma$ -спектрометра на различных стендах, позволяют сделать вывод о перспективности использованного подхода. В настоящее время на его основе разрабатывается следующая версия этого прибора, характеризующаяся при том же энергетическом разрешении в 4–5 раз более высокой скоростью счета.

Данная работа поддержана грантами аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 гг.)” АВЦП 2.1.1/3465 и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе “У.М.Н.И.К.” в 2010 г.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить А.В. Бурдакова, Д.Н. Григорьеву, А.С. Кузнецову за полезные обсуждения и интерес к данной работе, Г.И. Вьюгова за практическую помощь при изготовлении и настройке модулей  $\gamma$ -спектрометра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Винокуров А.А., Серебрянский В.В., Ильин И.В. и др.* Применение новых технологий в аппаратуре спектрометрического каротажа. Сервисная компания “Тюменьпромгеофизика”; [www.tpg.ru/main.php?eng=&pid=85&id=97](http://www.tpg.ru/main.php?eng=&pid=85&id=97)
2. *Steven W. Smith.* The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing. Second Edition. San Diego, California: California Technical Publishing. 1999. P. 297.
3. *Давыдов А.В.* Сигналы и линейные системы: Тематические лекции. Екатеринбург: УГГУ, ИГиГ, каф. геоинформатики. Фонд электронных документов, 2006. Гл. 11. С. 6–9;
4. <http://prodav.narod.ru/signals/index.html>
5. *Вострецов А.Г., Бурдаков А.В., Радченко С.Е. и др.* // Автометрия. 2010. Т. 46. № 3. С. 22.
6. *Димов Г.И., Бельченко Ю.И., Крайнов Г.С. и др.* // Атомная энергия. Февраль 2003. Т. 94. Вып. 2. С. 155.