

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.396.9

### КАНАЛ РЕГИСТРАЦИИ КООРДИНАТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПЛОТНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКЕ\*

В. М. Аульченко<sup>1,2</sup>, Д. Н. Григорьев<sup>1,2,3</sup>, В. В. Жуланов<sup>1,2</sup>,  
В. Д. Кутовенко<sup>1</sup>, А. А. Тальшев<sup>1,2</sup>, В. М. Титов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

E-mail: aulchenko@inp.nsk.su

Описаны структура, алгоритм функционирования и схемные решения канала регистрации многоканального координатного рентгеновского детектора с микросекундным временным разрешением для исследования динамики распределения плотности в объектах при импульсной нагрузке. Предложен способ быстрого автоматического регулирования чувствительности канала в реальном времени.

*Ключевые слова:* сцинтилляторы, рентгенография, усилители сигналов.

DOI: 10.15372/AUT20160115

**Введение.** Исследования структуры материалов при импульсных механических воздействиях, как правило, основаны на измерении двумерного распределения плотности образцов в зависимости от времени. Выбор способа измерения распределения плотности обусловлен многими факторами, основные из которых — размер и средняя плотность образца, скорость развития процесса, а также требуемые точности измерения по координате и времени. В подавляющем большинстве случаев необходимо также свести к минимуму влияние инструментария измерения на процессы в исследуемом объекте.

Эффективным методом определения плотности объектов, наиболее полно удовлетворяющим изложенным выше критериям, является проекционная рентгенография, которая, как известно, основана на способности рентгеновских и гамма-лучей проходить через оптически непрозрачное вещество и зависимости степени ослабления их интенсивности от плотности вещества [1].

Требуемая энергия гамма-квантов определяется плотностью и размером объектов и может достигать нескольких мегаэлектронвольт. Генерировать излучение до 500 кэВ возможно с помощью импульсных рентгеновских трубок. Для получения более высокой энергии используются ускорители электронов с конверторами, играющими ту же роль, что и анод в рентгеновской трубке.

В случае импульсных нагрузок длительность одного измерения должна быть существенно короче характерного времени развития процессов в объекте, иначе будет регистрироваться некое усреднённое значение параметров. В то же время за одно измерение в каж-

\*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

дом измерительном канале необходимо регистрировать сигнал от большого числа квантов, чтобы ошибка из-за статистики фотонов на малых сигналах не искажала результаты измерений. В этой связи предпочтительно использовать импульсные источники излучения. Здесь уместно подчеркнуть, что речь идёт не о регистрации и подсчёте числа отдельных фотонов, а о регистрации суммарного сигнала от большого числа фотонов.

Для регистрации прошедшего через образец излучения применяются различные детекторы. Их выбор зависит от многих факторов, в том числе от энергии излучения. В частности, для энергий в несколько мегаэлектронвольт широко используют сцинтилляционные неорганические кристаллы. Выделенная в кристалле энергия излучения преобразуется в энергию световой вспышки и далее — в электрический сигнал с помощью различных фотоприёмников, например полупроводниковых фотодиодов (ФД). В этом случае информация о выделенной в кристалле энергии содержится в интеграле тока (заряде), генерируемого ФД. Конструкция из сцинтиллятора и фотодиода образует автономную регистрирующую ячейку. Из таких ячеек складывается двумерная матрица детектора требуемых размеров; размер ячейки определяет координатное разрешение детектора.

Кроме эффективности регистрации выбор материала сцинтиллятора зависит также от его времени высвечивания, ограничивающего минимально возможный временной интервал между измерениями. Сцинтилляционный кристалл ортогерманата висмута (BGO) по быстродействию удовлетворяет большинству задач. Его важным преимуществом является чисто экспоненциальный спад сигнала и отсутствие компонент с большими временами высвечивания, характерных, например, для кристаллов йодистого натрия (NaI) и йодистого цезия (CsI). Линейность комбинации кристалл BGO + PIN-фотодиод в широком диапазоне сигналов была продемонстрирована в одном из экспериментов в ЦЕРН [2].

Разработка детектора на основе кристалла BGO — актуальная задача, решение которой важно для измерения плотности материала в условиях импульсных нагрузок и широкого диапазона входных сигналов. Предлагаемая работа является частью программы, выполняемой в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН, по развитию калориметрических методов, их использованию в экспериментальной физике [3] и прикладных исследованиях.

**Постановка задачи.** Электронный канал регистрации разработанного в ИЯФ СО РАН многоканального координатного рентгеновского детектора для исследования динамики плотности объектов при импульсной нагрузке соответствует следующим условиям:

— входным сигналом является импульс тока с ФД, возникающий в результате засветки кристалла BGO импульсным потоком гамма-квантов интенсивностью  $N_g$  (квант/с) и длительностью  $t_{\text{имп}} = 250$  нс; постоянная времени высвечивания сцинтиллятора  $\tau_{\text{сц}} \approx 300$  нс (рис. 1);

— импульсы засветки следуют с интервалом 2 мкс;

— коэффициент конверсии  $K_{\text{кон}}$  конструкции сцинтиллятор + ФД при оптимальной обработке сцинтиллятора и с учётом способа его соединения с фотодиодом составляет  $\sim 10^3$  фотоэлектронов на 1 МэВ выделенной в кристалле энергии;

— диапазон рабочих сигналов от  $2 \cdot 10^6$  до  $7 \cdot 10^9$  электронов (от  $10^3$  до  $3,5 \cdot 10^2$  фотонов);

— приведённый ко входу шум электронного тракта не превышает статистическую ошибку на нижнем крае диапазона сигналов ( $\sigma_{\text{стат}} \sim 6 \cdot 10^4$  электронов);

— относительное отклонение от линейности во всём диапазоне входных сигналов не более 1 %;

— в течение импульса излучения  $t_{\text{имп}}$  возможна прямая конверсия квантов в фотодиоде, в результате чего возникают короткие импульсы тока большой амплитуды, которые накладываются на основной сигнал (прямая конверсия в фотодиоде означает взаимодействие квантов непосредственно с материалом фотоприёмника, в нашем случае — с кремнием без участия сцинтиллятора; ввиду низкой энергии, требуемой для образования

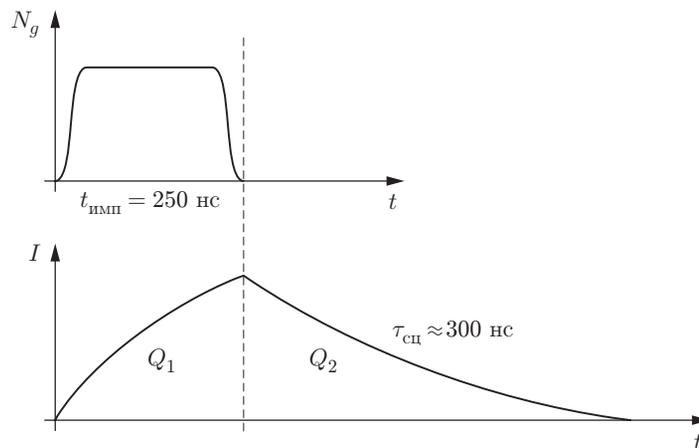


Рис. 1

электрон-дырочной пары в кремнии ( $\sim 3,5$  электронвольт), прямая конверсия всего одного кванта с энергией  $\sim 2$  МэВ создаёт заряд, на порядок превышающий статистическую ошибку на нижнем крае диапазона);

— коэффициент передачи, полоса пропускания канала регистрации, число разрядов и тактовая частота аналого-цифрового преобразования обеспечивают динамический диапазон  $3,5 \cdot 10^3$  при регистрации минимального рабочего сигнала  $2 \cdot 10^6$  фотоэлектронов в 100-м канале АЦП и возможность цифровой противошумовой обработки данных в режиме offline.

**Предложенное решение.** Способ решения поставленной задачи, реализованный в прототипе детектора, заключается в следующем.

1. Электронная часть канала регистрации состоит из фотодиода, усилителя с автоматически переключаемым коэффициентом усиления, АЦП и памяти объёмом 4 К 16-разрядных слов.

2. Прямая конверсия в фотодиоде, несмотря на низкую эффективность процесса, при большом количестве квантов создаёт серьёзную проблему, поскольку вызывает неприемлемые флуктуации основного сигнала. Одним из возможных способов решения этой проблемы, реализованным в данной работе, является использование для измерения только части сигнала после окончания импульса излучения (заряд  $Q_2$  на рис. 1). Это обстоятельство в значительной мере определило выбор в пользу неинтегрирующего варианта схемы усилителя.

3. Выходной сигнал усилителя, пропорциональный входному току, оцифровывается 14-разрядным АЦП с тактовой частотой 50 МГц. Противошумовая фильтрация осуществляется в цифровом виде в режиме offline.

*Усилитель* является основным элементом канала регистрации. Его упрощённая схема приведена на рис. 2. Усилитель состоит из входного трансимпедансного каскада (M1 — ADA4817), преобразующего импульсы тока в импульсы напряжения [4], двух каскадов (M2-1, M2-2 — LMN6655) с переключаемыми коэффициентами усиления, выходного преобразователя однополярного сигнала в парафазный (M3 — AD8132), компараторов (M4-1, M4-2, M5-1 — LT1714) и аналоговых ключей (M6 — ADG712).

Для улучшения соотношения сигнал/шум величина сопротивления обратной связи  $R_{OC}$  во входном каскаде должна быть возможно большей и ограничиваться максимальным входным сигналом и динамическим диапазоном каскада по выходу.

Сигнал тока с фотодиода от одиночного кванта имеет вид  $I_1(t) = A_1 \exp(-t/\tau_{сц})$ , где  $A_1 = C(K_{кон}/\tau_{сц})$ ,  $C$  — коэффициент, зависящий от энергии кванта, в нашем случае  $C \approx 2$ .

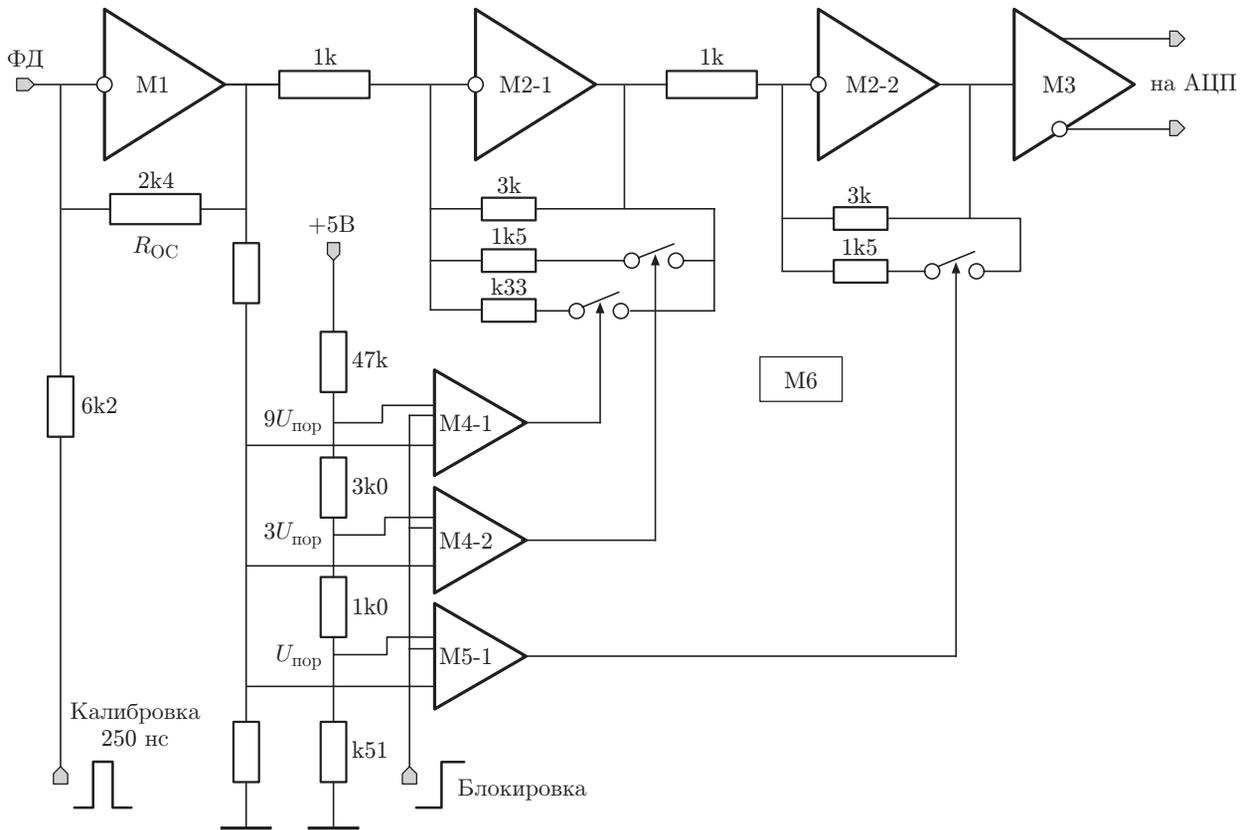


Рис. 2

В течение одного импульса излучения ( $t_{\text{имп}} = 250$  нс) в сцинтиллятор попадает  $n$  (от  $10^3$  до  $3,5 \cdot 10^6$ ) квантов, распределённых равномерно по времени. Результирующий сигнал с фотодиода имеет вид двух экспонент (см. рис. 1) с максимальным значением  $I_{\text{max}} = 0,565A_n$  при  $t = t_{\text{имп}}$ , где  $A_n = nA_1$ .

Максимальный входной сигнал ( $3,5 \cdot 10^6$  квантов) соответствует  $I_{\text{max}} \cong 2,1$  мА, минимальный сигнал ( $10^3$  квантов) —  $I_{\text{min}} \cong 0,6$  мкА.

Динамический диапазон входного каскада по выходу расширен до 5,5 В за счёт смещения потенциала выхода по постоянному току до  $-2,5$  В. В результате при  $R_{\text{OC}} = 2,4$  кОм максимальный размах сигнала на выходе каскада может достигать  $\sim 5,0$  В.

Типичный диапазон дифференциальных входных сигналов современных АЦП составляет 2 В, что соответствует при 14 разрядах цене канала  $\Delta_k \cong 125$  мкВ. Для того чтобы минимальный сигнал попадал в 100-й канал АЦП, необходимо дополнительное усиление в 9 раз. С другой стороны, чтобы максимальный сигнал не превышал 2 В, требуется ослабление минимум в 2,5, а с запасом — в 3 раза. Такое изменение коэффициента передачи в 27 раз осуществляется автоматически во втором (M2-1) и третьем (M2-2) каскадах усилителя с кратностью 3 (9, 3, 1, 1/3) с помощью аналоговых ключей в цепях обратной связи (M6 — ADG712), управляемых компараторами (M4-1, M4-2, M5-1 — LT1714).

Полоса пропускания усилителя определяется интегрирующей цепочкой на выходе преобразователя (M4) перед АЦП и установлена на уровне 17 МГц. Это соответствует длительности фронта 20 нс, что на порядок меньше фронта входного сигнала. С учётом параметров используемых микросхем и других элементов схемы расчётное значение приведённого ко входу шума (RMS) в указанной полосе частот составляет  $\sqrt{I_{\text{шум}}^2} = 22$  нА, что равняется 3,7 % от пикового значения минимального сигнала, или  $\sim 38$  квантов.

Здесь следует подчеркнуть, что, как правило, практическое значение имеет не абсолютная величина шума, а отношение величины шума к минимальному сигналу, называемое разрешением, в нашем случае это амплитудное, т. е. энергетическое, разрешение.

Уменьшение отношения шум/сигнал достигается обработкой записанных цифровых значений величины сигнала в последовательные моменты времени. В соответствии с алгоритмом оптимальной шумовой фильтрации [5, 6] вычисляется их взвешенная сумма в области существования сигнала. Для сигнала вида  $\sim \exp(-t/\tau_{\text{сц}})$  коэффициент фильтрации  $K_{\text{ф}}$  (уменьшения отношения шум/сигнал, или улучшения разрешения) определяется выражением

$$K_{\text{ф}} = \sqrt{(1 - e^{-2\Delta t/\tau_{\text{сц}}})/(1 - e^{-2m\Delta t/\tau_{\text{сц}}})}, \quad (1)$$

где  $m$  — число выборок,  $\Delta t$  — интервал между выборками.

Формула справедлива, если выборки статистически независимы, т. е. интервал  $\Delta t$  не должен быть короче длительности фронта сигнала, в нашем случае 20 нс. Вычисления для  $m = 30$ , что при тактовой частоте АЦП 50 МГц соответствует  $m\Delta t = 600$  нс =  $2\tau_{\text{сц}}$ , дают улучшение ( $K_{\text{ф}} = 0,36$ ) по сравнению с отношением шум/сигнал при измерении в точке максимума сигнала. В результате получаем расчётное амплитудное разрешение на минимальном сигнале 1,35 %, или  $\sim 14$  фотонов.

Измеренное разрешение по пиковому значению минимального сигнала составило 4,6 %, при расчётных значениях — 3,7 %. После обработки по описанному алгоритму получено

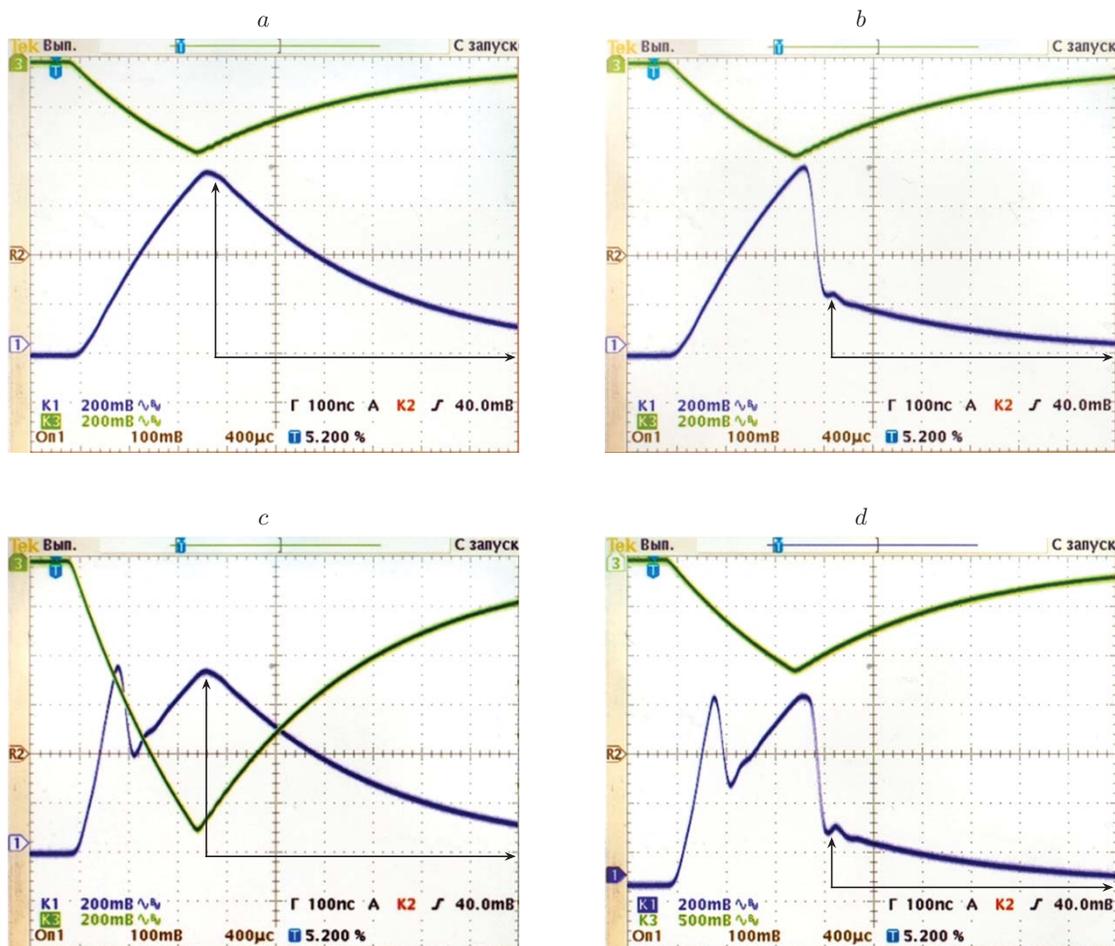


Рис. 3

разрешение 1,7 % ( $3,4 \cdot 10^4$  электронов), что несколько ниже расчётного значения, но почти в 2 раза лучше статистической ошибки.

На рис. 3 приведены осциллограммы, иллюстрирующие процесс переключения коэффициента усиления. В исходном состоянии все ключи разомкнуты и коэффициент усиления максимален. Логика управления ключами такова, что каждый из них за время импульса может сработать только 1 раз, причём на замыкание. Это позволяет минимизировать наводки, так как оба вывода ключа соединяются с низкоомным выходом соответствующего каскада усилителя.

Входной тестовый сигнал отрицательной полярности подаётся на вход усилителя через резистор 6,2 кОм; выходной сигнал — положительный. Стрелками выделены области, используемые для определения величины сигнала.

Рис. 3, *a* иллюстрирует работу канала с максимальным усилением; амплитуда сигнала с выхода первого каскада близка, но не достигла порога переключения компаратора с самым низким порогом  $U_{\text{пор}}$ . На рис. 3, *b* приведён сигнал, превысивший величину  $U_{\text{пор}}$ . Коэффициент усиления уменьшился в 3 раза. Аналогичная ситуация перед и после срабатывания второго компаратора  $3U_{\text{пор}}$  показана на рис. 3, *c* и *d* соответственно. Произошло уменьшение усиления ещё в 3 раза, до величины  $1/9$  от максимального.

Из осциллограмм видно, что каждое переключение коэффициента усиления происходит за время не более 50 нс.

*Конструкция.* Конструктивным элементом аналоговой части электроники является 8-слойная печатная плата размером  $140 \times 140$  мм, на которой размещены 16 вышеописанных каналов (по 8 каналов с каждой стороны платы). Плата снабжена двумя многоконтактными разъёмами, расположенными с противоположных торцов. Один разъём предназначен для подключения 16 сборок кристалл + ФД. Конструкция сборок и шаг установки плат выбраны так, чтобы кристаллы образовывали двумерную регулярную структуру. Вторым разъёмом используется для вывода 16 парафазных сигналов на плату АЦП, подвода питания и управляющих сигналов.

*Алгоритм функционирования.* В исходном состоянии сигналы с выхода усилительной секции каждого канала непрерывно оцифровываются с тактовой частотой 50 МГц; цифровые данные записываются в кольцевой буфер.

После прихода внешнего импульса синхронизации Строб (рис. 4), опережающего импульс излучения на несколько микросекунд, отсчитывается заранее установленное количество тактов АЦП и запись в память останавливается. Во время этого процесса сигналом Блокировка, вырабатываемым таймером схемы управления и синхронизованным с концом импульса излучения, фиксируется состояние компараторов, а следовательно, значение коэффициентов усиления в каждом канале.

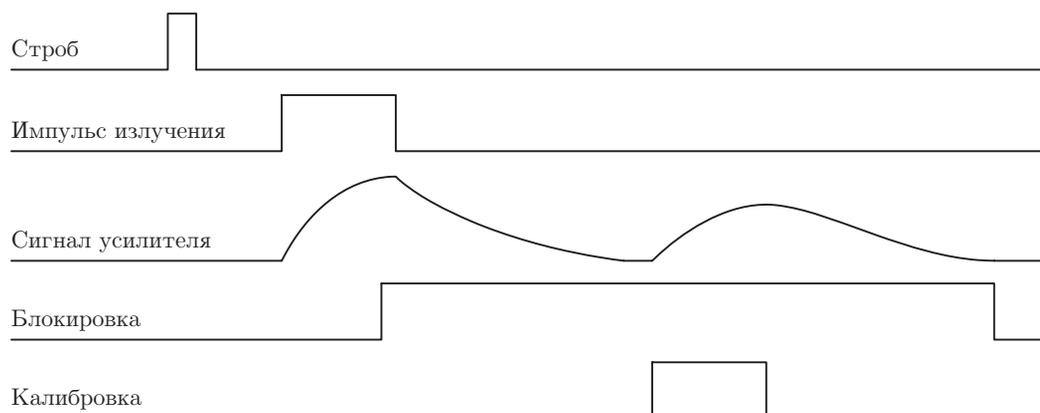


Рис. 4

Зафиксированные значения коэффициентов усиления определяются по величине отклика на стандартный тестовый сигнал Калибровка, который подаётся на вход каждого канала в промежутке между импульсами излучения. После оцифровки отклика блокировка компараторов снимается.

**Заключение.** Изготовлена и протестирована электроника канала регистрации рентгеновского координатного детектора. Работу в условиях импульсных нагрузок и широкого диапазона входных сигналов в канале регистрации обеспечивает усилитель с установленным автоматически в реальном времени коэффициентом усиления. Для измерения величины сигнала используется его часть после окончания излучения, обусловленная высвечиванием сцинтиллятора. Такой подход позволяет устранить влияние на измерения помех, связанных с импульсным характером излучения, и некоторых других побочных эффектов, например прямой конверсии квантов в фотоприёмнике. Для минимизации наводок от срабатывания аналоговых ключей, управляющих усилением, каждый из них за время излучения должен работать только на замыкание. Конструктивным элементом электроники является 16-канальный автономный модуль, позволяющий легко наращивать число каналов регистрации детектора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н.** Ударные и детонационные волны. М.: Физматлит, 2004. 376 с.
2. **Sumner R.** The L3 BGO electromagnetic calorimeter // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 1988. **A265**. P. 252–257.
3. **Аульченко В. М., Жилич В. Н., Жуланов В. В. и др.** Структура и алгоритм функционирования аппаратуры многоканального кристаллического калориметра для работы при больших нагрузках // Автометрия. 2015. **51**, № 1. С. 39–47.
4. **Серегин Б. А.** Обратная связь в усилителях. М.: Радио и связь, 1983. 96 с.
5. **Сергиенко А. Б.** Цифровая обработка сигналов. С.-Пб.: Питер, 2003. 603 с.
6. **Колос М. В., Колос И. В.** Методы линейной оптимальной фильтрации. М.: Изд-во МГУ, 2000. 102 с.

*Поступила в редакцию 10 марта 2015 г.*

---