

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ АНАЛОГОВОЙ ФРОНТЭНД МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ ГАММА-ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ SiPM

© 2020 г. А. Ш. Шерги<sup>1,\*</sup>, О. В. Бычкова<sup>1</sup>, Е. В. Попова<sup>1</sup>, А. А. Стифуткин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

\*e-mail: cherguicherif@hotmail.com

Поступила в редакцию 17.07.2020 г.

После доработки 06.10.2020 г.

Принята к публикации 12.10.2020 г.

Проведены испытания разработанного в НИЯУ МИФИ прототипа специализированной многоканальной микросхемы, предназначенной для использования в качестве фронтэнда в детекторных системах на основе “медленных” сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl) или CsI(Tl) и кремниевых фотоумножителей (SiPM). Для проведения измерений использовались специально разработанные тестовая плата и пакет программного обеспечения в среде LABVIEW. Детекторная часть состояла из кристалла NaI(Tl) и матрицы SiPM PM6600 (КЕТЕК) в качестве фотоприемника. Энергетическое разрешение системы при регистрации гамма-квантов с энергией 59.5 кэВ составило  $16.9 \pm 0.9\%$  ПШПВ. Для сравнения те же измерения были проведены с использованием аналоговой части многоканальной микросхемы MAROC3, для которой разрешение на этой энергии составило  $27.7 \pm 0.9\%$ .

*Ключевые слова:* SiPM, ФЭУ, MAROC, LABVIEW, МР-томография

**DOI:** 10.1134/S2304487X20040094

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Российская отечественная ядерная медицина страдает от дефицита современного оборудования для диагностики. Почти все это оборудование было импортировано. Большинство установок эксплуатируется более 10 лет и теперь нуждается либо в модернизации, либо в полной замене. При этом для новых систем желательно совмещение функций – например, гамма-камеры и МР-томографа – в одной установке.

Однако при разработке новых, более универсальных систем, возникают проблемы совместимости. Дело в том, что полноразмерные гамма-камеры (full-body gamma-camera) предыдущего поколения, широко использующиеся в радиологических отделениях больниц по всему миру [1], традиционно построены на основе монолитных кристаллов NaI(Tl) большого размера и вакуумных фотоумножителей (ФЭУ), при этом количество ФЭУ достигает порядка 100 штук. Поскольку использование ФЭУ в магнитных полях невозможно, то, для современных многофункциональных медицинских установок с сильными магнитными полями (МР-томография), необходимо применение других фотоприемников, нечувствительных к нему, например, кремниевых фотоумножителей (SiPM) [2]. SiPM не уступают ФЭУ по коэффициенту усиления, имеют более высокую эффективность регистрации, низкое напря-

жение питания (25–50 В), компактные размеры, а также гораздо менее хрупки.

SiPM совместно со сцинтилляционными кристаллами может быть использован для компактных и надежных гамма-спектрометров и является очень привлекательным выбором для создания многоканальных высоко-гранулярных систем, особенно в области ядерной медицины.

При этом, следует учитывать, что повышение гранулярности систем, особенно большого размера, приводит к резкому увеличению необходимого числа каналов сопутствующей электроники и требует применения многоканальных микросхем для сохранения разумных размеров и уровней энергопотребления.

К настоящему времени разработано и используется большое количество многоканальных микросхем для разных областей применения, с количеством каналов от 8-ми до 128-ми и функциональными возможностями от чисто аналогового фронтэнда до систем на кристалле, включающих в себя аналоговую и цифровую части для спектрометрических и временных измерений и быстрыми цифровыми интерфейсами для вывода информации. Однако, большая часть таких микросхем разработана для специальных целей (например, детекторы в области физики высоких энергий или ядерной физики) и трудно применима в других областях.

Среди коммерчески доступных многоканальных микросхем более или менее широкого применения, специально оптимизированных для работы совместно с SiPM или, которые можно использовать для этих целей, можно назвать (не претендуя на полноту), такие как Citiroc 1A [3], Petiroc 2A [4], Triroc 1A [5], Maroc 3A [6], Catiroc 1 [7] фирмы WeeRoc; TOFPET2 [8] фирмы PETselectronics; VA32HDR14-3 [9], IDE3160-2 [10], IDE3380 SIPHRA [11], VATA64HDR16-2 [12] фирмы Integrated Detector Electronics AS (IDEAS). Однако, перечисленные выше микросхемы ориентированы на работу с быстрыми сцинтилляторами, такими как LYSO, LSO или LaBr<sub>3</sub>:Ce. Эти микросхемы, как правило, имеют времена интегрирования входного сигнала от 100 до 300 нс, что для систем, основанных на кристаллах NaI(Tl), CsI(Tl) или BGO, приводит к потере энергетического разрешения из-за неполного сбора количества высвечиваемых фотонов. Исключение составляют недавно появившиеся микросхемы Triroc 1A и IDE3380 SIPHRA, имеющие времена интегрирования соответственно до 1.28 мкс и 1.6 мкс.

В НИЯУ МИФИ в рамках Мегагранта разработан прототип отечественной многоканальной микросхемы для считывания сигналов с SiPM, ориентированной на системы ядерной медицины (гамма-камеры), в которых используются сцинтилляционные кристаллы NaI(Tl) или CsI(Tl), с целью обеспечить задел для создания многоканальной электроники для применения с этими “медленными” (времена высвечивания порядка микросекунд) сцинтилляторами [13].

Исходя из характеристик современных гамма-камер, к разрабатываемой микросхеме были сформулированы следующие требования:

- время интегрирования заряда достаточное для сбора 96% фотонов, испускаемых сцинтилляторами NaI(Tl) и CsI(Tl);
- линейность отклика для системы сцинтиллятор–SiPM–микросхема в диапазоне энергий гамма-квантов 59.6–511 кэВ;
- обеспечение получения одноэлектронного разрешения сигналов от SiPM для проведения калибровки регистрируемых от гамма-квантов сигналов в зависимости от количества сработавших ячеек;
- обеспечение асинхронной работы по появлению сигнала от гамма-квантов (режим “самотриггера”).

Прототип микросхемы был изготовлен на XFAB Foundry [14] с использованием технологии XN035.

В дальнейшем мы будем называть эту микросхему SLOSIC (SLOWSignalIC).

В данной работе проводится проверка функционирования SLOSIC совместно с модулем гамма-детектора на основе сцинтиллятора NaI(Tl) и SiPM при регистрации гамма-квантов. Измеренное энергетическое разрешение сравнивается с разрешением, полученным при использовании коммерчески доступной микросхемы MAROC3, уже применявшейся в макете гамма-камеры [15].

## 2. ОПИСАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ SLOSIC И ТЕСТОВОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1. Архитектура SLOSIC

Состав и функциональное назначение основных блоков разработанной микросхемы показаны на структурно-функциональной схеме (рис. 1). SLOSIC включает три одинаковых канала  $A_1 - A_3$ , каждый из которых содержит предварительный усилитель с токовым входом, управляемый кодом усилитель тока, интегратор с возможностью выбора одной из двух постоянных времени интегрирования (750 нс и 3 мкс) и включенную с интегратором в общую петлю отрицательной обратной связи схему стабилизации базовой линии.

Обобщенная функциональная схема одного канала SLOSIC показана на рис. 2. Каждый канал содержит два программируемых усилителя, состоящих из цифрового потенциометра и усилителя с фиксированным коэффициентом передачи, амплитудный дискриминатор, состоящий из компаратора с гистерезисом и программируемого источника опорного напряжения для задания порога. Выход компаратора служит сигналом запуска схемы синхронизации, включающей два программируемых таймера и логику управления. Программируемый усилитель, дискриминатор и таймеры образуют в совокупности временной подканал. Кроме него каждый канал содержит амплитудный подканал. Он включает в себя ФНЧ на базе одного из программируемых усилителей, управляемый пиковый (амплитудный) детектор, буферный масштабирующий усилитель – драйвер АЦП и программируемую схему сдвига постоянного уровня (базовой линии). Пиковый детектор может находиться в следующих состояниях: прозрачный, поиск максимума, удержание, сброс. Управление работой пик-детектора может быть как внутренним – автоматический режим с использованием таймеров, так и внешним – ручной режим с подачей управляющих сигналов извне. Все параметры программируются индивидуально для каждого из каналов.

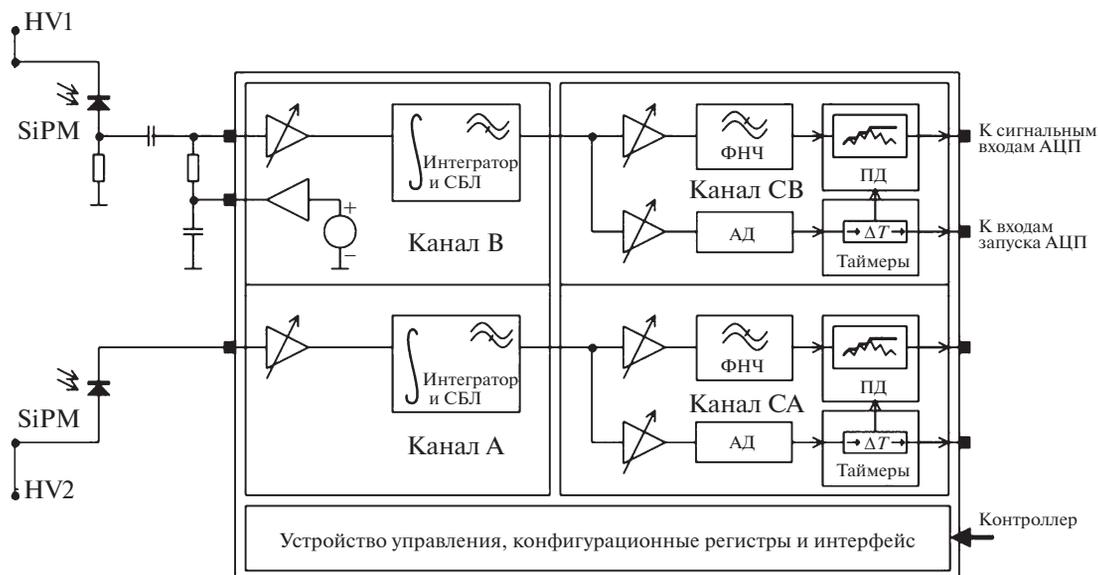


Рис. 1. Структурно-функциональная схема SLOSIC. СБЛ – стабилизатор базовой линии, ФНЧ – фильтр нижних частот, АД – амплитудный дискриминатор, ПД – пиковый детектор.

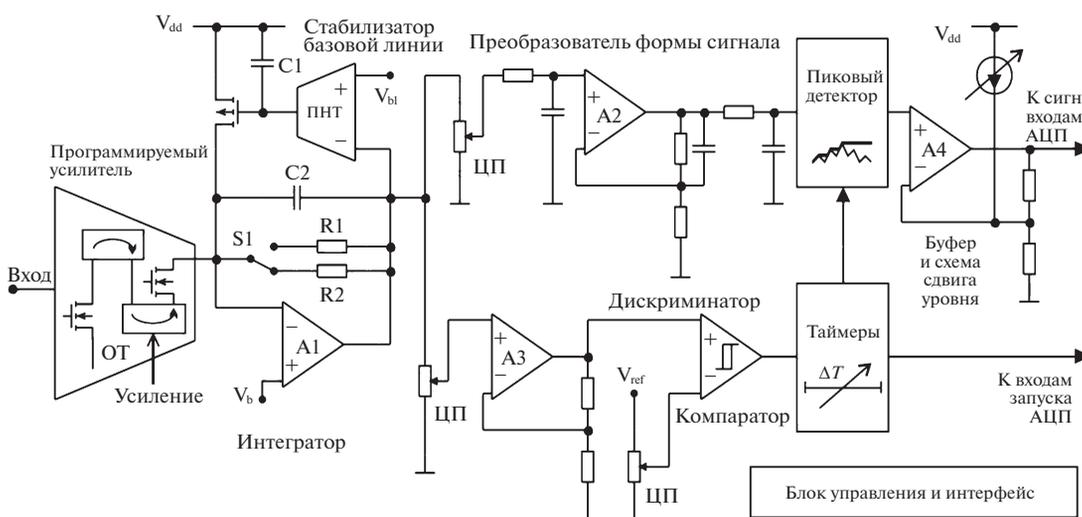


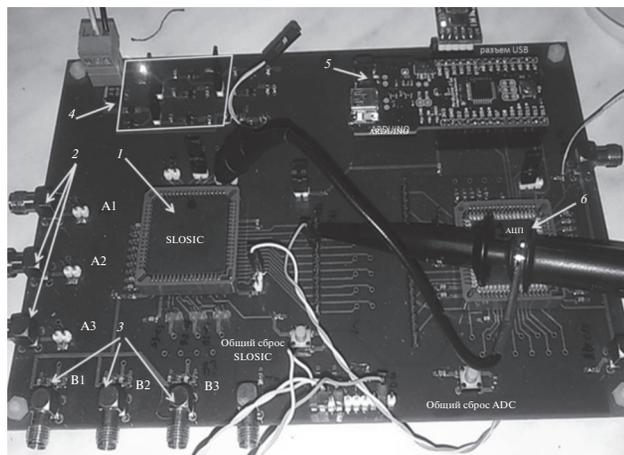
Рис. 2. Функциональная схема одного сквозного канала SLOSIC. ЦП – цифровой потенциометр, ПНТ – преобразователь напряжение-ток.

### 2.2. Тестовая плата

Для проведения измерений была разработана и изготовлена тестовая плата, обеспечивающая подачу стабилизированных напряжений питания для структурных блоков SLOSIC и имеющая разъемы для подключения аналоговых и управляющих сигналов, а также порт для связи с компьютером (рис. 3). Автоматический режим работы SLOSIC с использованием встроенных таймеров для управления работой пик-детектора в измерениях не применялся, сигналы управления режи-

мами работы (прозрачный, поиск максимума, удержание, сброс) подавались от внешней схемы. В качестве управляющего элемента платы использовался микрокомпьютер ARDUINO.

Для управления микросхемой было разработано приложение в среде LabVIEW, которое позволяет конфигурировать микросхему, в режиме реального времени считывать данные с внешнего АЦП, который может быть установлен на ту же плату. Более подробно разработанное программное обеспечение описано ниже.



**Рис. 3.** Фотография тестовой платы. 1 – микросхема SLOSIC, 2 – входы каналов типа А, 3 – входы каналов типа В, 4 – стабилизаторы питания, 5 – плата ARDUINO для связи с компьютером, 6 – микросхема аналого-цифрового преобразователя.

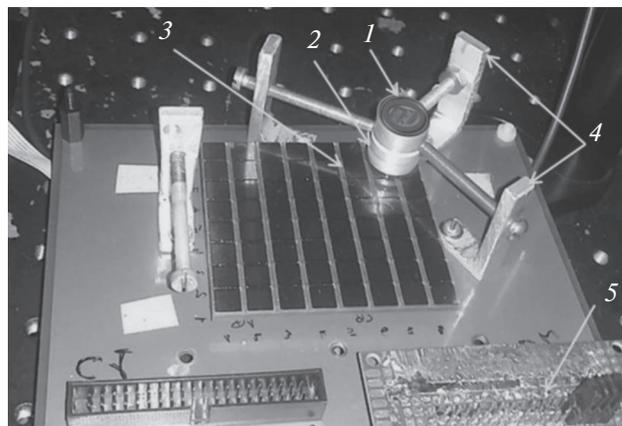
### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

#### 3.1. Модуль гамма-детектора

Модуль гамма-детектора состоит из трех основных компонентов: фотодетекторы, плата-носитель фотодетекторов и сцинтиллятор. Фотография модуля показана на рис. 4, где используются обозначения: 1 – источник гамма-квантов, 2 – сцинтилляционный кристалл, 3 – матрица кремниевых фотоумножителей, 4 – система фиксации сцинтиллятора относительно матрицы фотодетекторов, 5 – плата сумматора и считывания сигнала для определенных каналов матрицы.

Фотодетекторы представляют из себя 64-канальную матрицу ( $8 \times 8$  элементов), составленную из SiPM КЕТЕК РМ6660ТP-SB [16]. SiPM данной модели имеет геометрический размер  $6.8 \times 7.8 \text{ мм}^2$ , чувствительную область  $6 \times 6 \text{ мм}^2$  и содержит 10000 микроячеек, каждая из которых имеет размер  $60 \times 60 \text{ мкм}^2$ .

Матрица фотодетекторов SiPM собрана в ГУП НПП “Пульсар” (г. Москва). Зазор между соседними SiPM на матрице составляет 0.3 мм. Матрица устанавливается на плату-носитель при помощи четырех 40-контактных разъемов высокой плотности серии DF17 фирмы Hirose [17]. К каждому разъему подключены 16 SiPM (1 квадрант матрицы), каждый SiPM использует на разъеме 2 контакта – питание и сигнал. Остальные контакты разъема используются для подачи общего потенциала. Следует отметить, что для каждой линии питания SiPM на матрице смонтирован RC-фильтр для подавления перекрестных электрических наводок по шине питания. Плата-носитель обеспечивает разводку напряжения питания от одного входного разъема по индивидуаль-



**Рис. 4.** Фотография гамма-детектора.

ным линиям, а также подключение сигнальных линий к четырем 40-контактным разъемам типа IDC (1 разъем на квадрант).

Для измерений использовался сцинтиллятор NaI(Tl) высотой 10 мм и диаметром 10 мм, в алюминиевом корпусе с толщиной выходного окна около 2 мм. Данный сцинтиллятор геометрически существенно отличается от кристаллов, используемых в полномасштабных гамма-камерах, однако основной задачей, стоящей перед нами на данном этапе, являлось экспериментальное определение энергетического разрешения системы сцинтиллятор–матрица SiPM–электроника и сравнение результатов по его величине, полученных при использовании микросхем SLOSIC и MAROC3.

Сцинтилляционный кристалл с помощью оптической смазки монтировался на 4 смежных элементах матрицы, выходы которых были соединены параллельно, образуя SiPM с площадью  $\sim 12 \times 12 \text{ мм}^2$ , как показано на рис. 4. Остальные элементы матрицы были отключены. Выходной сигнал по коаксиальному кабелю подавался на измерительный стенд. В процессе измерений модуль гамма-детектора находился в светозащищенной термокамере MC-811 фирмы ESPEC.

#### 3.2. Измерительный стенд

Измерительный стенд включает в себя:

- специально разработанную и изготовленную тестовую плату для SLOSIC, обеспечивающую подачу напряжения питания для микросхемы и имеющую разъемы для аналогового и управляющего сигналов, а также порт для связи с компьютером;

- многоканальную систему сбора данных на основе микросхемы MAROC3 фирмы WeeRoc (evaluation board MAROC3) [18], для сравнительных измерений;

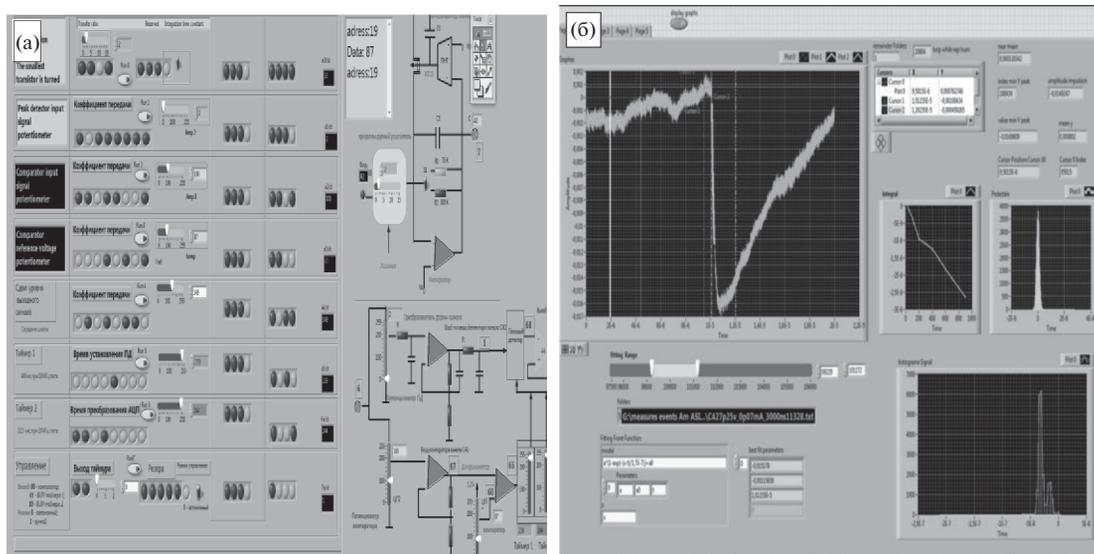


Рис. 5. Скриншот ПО. 5а – блок управления микросхемой SLOSIC, 5б – блок осциллограмм и обработки сигналов.

- цифровой осциллограф LeCroyWR620zi, используемый в качестве системы сбора данных;
- генератор точной амплитуды ORTEC 419;
- систему оптического attenuатора;
- источники питания для SiPM (Keithley 2400) и электроники.

#### 4. ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ SLOSIC И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для тестирования SLOSIC было разработано управляющее программное обеспечение (ПО) в среде LABVIEW, которое позволяет конфигурировать микросхему, управлять работой тестовой платы, а также вести обработку данных on-line или off-line, в зависимости от формата и скорости потока данных. Скриншоты ПО показаны на рис. 5.

Управляющее ПО выполняет следующие действия:

- конфигурирует микросхему путем загрузки управляющих слов через последовательный интерфейс;
- схематично показывает текущее состояние основных структурных блоков микросхемы, облегчая процесс конфигурирования и визуального контроля состояния микросхемы;
- считывает данные с внешнего АЦП, который может быть установлен на тестовой плате, и представляет данные графически;
- проводит построение и обработку спектров;
- в случае использования цифрового осциллографа для регистрации и записи осциллограмм сигналов, ПО содержит блок off-line обработки записанных данных – воспроизведение осцилло-

грамм, анализ формы импульсов, построение и обработка зарядовых и амплитудных спектров, подбор оптимальных параметров обработки и гистограммирования.

Поскольку количество событий в пике полного поглощения зависит от энергии и интенсивности гамма-линии источника, использование одинаковой ширины канала при построении спектров от разных источников является неоптимальным для определения параметров пика. Правильно подобранная ширина каналов гистограммы позволяет дать наиболее точную оценку параметров функции распределения [19–22]. В управляющем ПО была реализована процедура выбора оптимальной ширины каналов. Ниже приведен алгоритм данной процедуры:

- 1) начальное количество каналов гистограммы задается пользователем так, чтобы ширина пика полного поглощения на его полувысоте находилась в пределах 5–10 каналов [23] (при этом полученное распределение контролируется визуально);
- 2) используя процедуру фитирования функцией Гаусса (1), из полученного распределения определяем координату центра пика полного поглощения  $X_0^i$  и погрешность ее измерения  $\Delta X_0$ :

$$y = y_0 + \frac{Ae^{-\frac{4 \ln(2)(X-X_0)^2}{w^2}}}{w \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln(2)}}}, \quad (1)$$

где  $y_0$  – подложка,  $X_0$  – координата центра пика,  $A$  – площадь,  $w$  – полная ширина на половине максимума пика [24]. Учитывая несимметричность пиков полного поглощения, границы интервала, на котором производится фитирование,

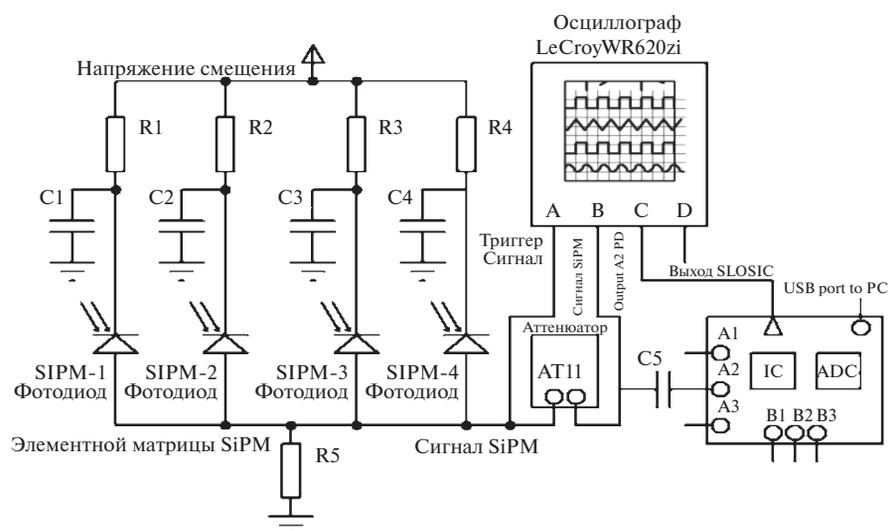


Рис. 6. Схема экспериментальной установки.

устанавливаются следующим образом: правая граница определяется как канал для которого  $y = y_0$ ; левая граница как канал для которого  $y = 2h/3$ , где  $h$  – высота пика;

3) затем ширина канала уменьшается на величину, заданную оператором, осуществляется гистограммирование исходных экспериментальных данных и повторяется шаг 2.

Данный алгоритм повторяется, пока не будет выполнено условие: значение  $X_0^i$  и  $w^i$  для выбранного разбиения равно предыдущему  $X_0^{i-1}$  и  $w^{i-1}$  и последующему значению  $X_0^{i+1}$  и  $w^{i+1}$  в пределах полученной при  $i$  шаге фитирования погрешности. Тогда значение ширины канала для  $i$  шага считаем оптимальным.

## 5. ИЗМЕРЕНИЯ

Базовая схема подключения аппаратуры показана на рис. 6.

Все измерения со SLOSIC проводились на канале с токовым входом, сконфигурированным для работы со сцинтиллятором NaI(Tl) (постоянная времени интегрирования 750 нс), а с MAROC3 – при конфигурации с максимальным временем интегрирования (приблизительно 120 нс).

Сигнал от гамма-детектора подавался на вход цифрового осциллографа и служил триггером для захвата осциллограмм. Тот же сигнал, ослабленный при помощи аттенюатора, подавался на второй вход осциллографа и на тестовую плату. Аттенюатор потребовался для того, чтобы согласовать диапазон изменения сигналов от гамма-детектора с динамическим диапазоном SLOSIC. Выходной сигнал пик-детектора SLOSIC подавался на

третий вход осциллографа. Встроенный в SLOSIC пик-детектор управлялся следующим образом: процесс поиска максимума сигнала интегратора запускался при срабатывании внутреннего дискриминатора; выходной сигнал этого дискриминатора запускал внешнюю схему управления (на схеме подключения не показана), генерирующую сигналы переходов в режимы Удержание и Сброс.

Управление работой MAROC3 осуществлялось примерно так же, с той разницей, что в этой микросхеме нет пик-детектора и захват уровня сигнала происходит в момент подачи синхросигнала.

Осциллограммы сигналов записывались на внешний носитель для последующей обработки.

Параметры конфигурации системы подбирались таким образом, чтобы можно было производить измерения в диапазоне энергий от 59.6 кэВ ( $^{241}\text{Am}$ ) до 1274 кэВ ( $^{22}\text{Na}$ ) без перенастройки. Измерения с гамма-источниками были проведены во всем указанном диапазоне, включая область, где наблюдается заметное отклонение сигнала собственно SiPM от линейности. Напряжение питания матрицы SiPM – 28.25 В – было определено как напряжение, при котором достигалось наилучшее разрешение для источника  $^{137}\text{Cs}$ . Все измерения с матрицей проводились при этом напряжении и температуре  $+20^\circ\text{C}$ .

Линейность отклика SLOSIC на входной сигнал проверялась двумя способами. В первом источником входного сигнала служил подключенный вместо гамма-модуля генератор импульсов точной амплитуды ORTEC419, вырабатывающий экспоненциальный сигнал с постоянной времени спада 250 нс, имитирующий сигнал от сцинтиллятора NaI(Tl). Сигнал генератора, ослабленный

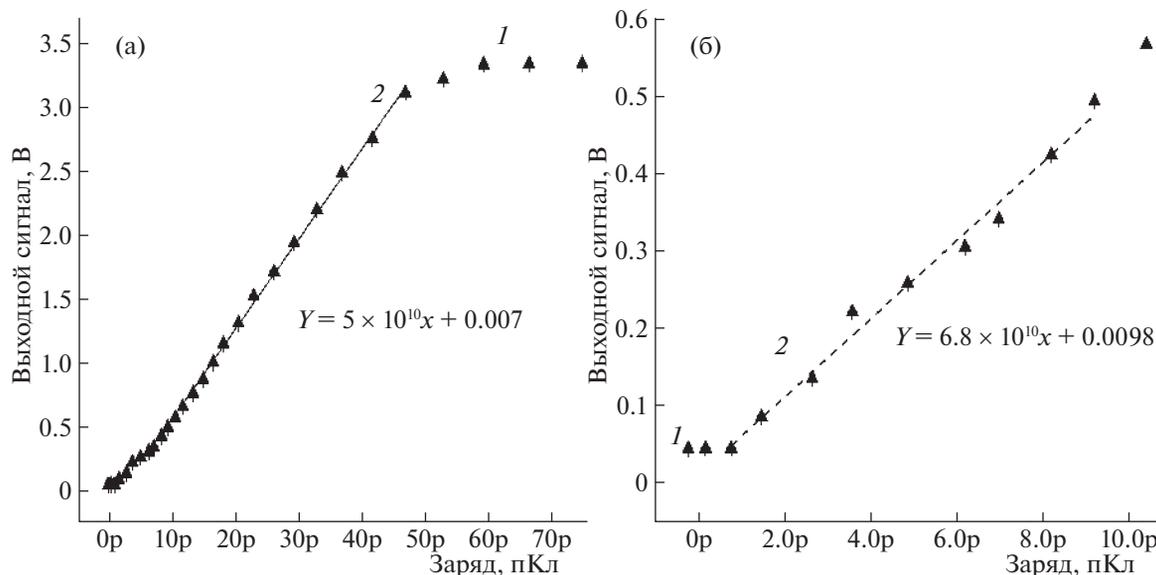


Рис. 7. Отклик SLOSIC на сигнал генератора: 7а – полный диапазон, 7б – диапазон малых сигналов, 1 – выход пик-детектора SLOSIC, 2 – линейный фит.

при помощи прецизионного аттенюатора, подавался на вход SLOSIC и на цифровой осциллограф LeCroyWR620zi.

Во втором использовалась способность SLOSIC работать с сигналом одиночной ячейки SiPM. При этом источником калибровочного сигнала выступал подключенный к SLOSIC SiPM Hamamatsu S13360-1350PE, для которого зависимость сигнала ячейки от напряжения питания (коэффициент усиления) нами хорошо изучена. SiPM облучался вспышками пикосекундного лазера с длиной волны 660 нм, ослабленными при помощи оптического аттенюатора до уровней в несколько фотонов на площадь SiPM за вспышку.

Набор спектров проводился с использованием стандартных калибровочных гамма-источников ОСГИ, при этом источники располагались таким образом, чтобы ток через матрицу фотодетекторов оставался постоянным и не влиял на параметры фотодетекторов.

### 6. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 7 показан отклик SLOSIC на суммарный заряд, поступивший на вход, при использовании генератора точной амплитуды (рис. 7а – в широком диапазоне входного сигнала, рис. 7б – в области малых сигналов). Фитирование линейными функциями для этих диапазонов дает разные коэффициенты наклона и постоянные смещения с зоной перехода в районе 6–7 пКл. В области величины заряда около 4 пКл наблюдается дополнительный выброс.

На рис. 8а представлен одноэлектронный спектр сигнала SiPM Hamamatsu S13360-1350PE при освещении лазером. Каждый следующий пик в спектре отличается от предыдущего на величину сигнала (заряда) одной ячейки. Зная заряд (усиление) одиночной ячейки и количество сработавших ячеек, соответствующих каждому пику спектра, можно построить зависимость сигнала SLOSIC от величины заряда на входе, как показано на рис. 8б.

При измерениях с Hamamatsu S13360-1350PE параметры конфигурации SLOSIC (в частности коэффициент передачи входного каскада) оптимизировались для получения спектра одиночных ячеек и отличались от параметров, применяемых при измерении с источниками. Спектр, показанный на рис. 8а, набран при установке порога дискриминатора SLOSIC, запускающего пик-детектор, на уровне 10 ячеек. Такой метод генерации входного сигнала может быть использован для калибровки и мониторингирования электронного тракта без использования дополнительного оборудования. Видно, что в области входных зарядов порядка 4.5–5 пКл также наблюдается отклонение от линейности, что проявляется в нарушении эквидистантности первых 2 пиков одноэлектронного спектра.

Характеристики систем на основе SLOSIC и MAROC3 с подключенным модулем гамма-детектора изучались в диапазоне энергий 59.6–511 кэВ (диапазон энергии соответствует источникам, используемым в гамма-камере) с использованием источников <sup>241</sup>Am (59.6 кэВ), <sup>57</sup>Co (122 кэВ), <sup>152</sup>Eu (344 кэВ) и <sup>22</sup>Na (511 кэВ). На рис. 9

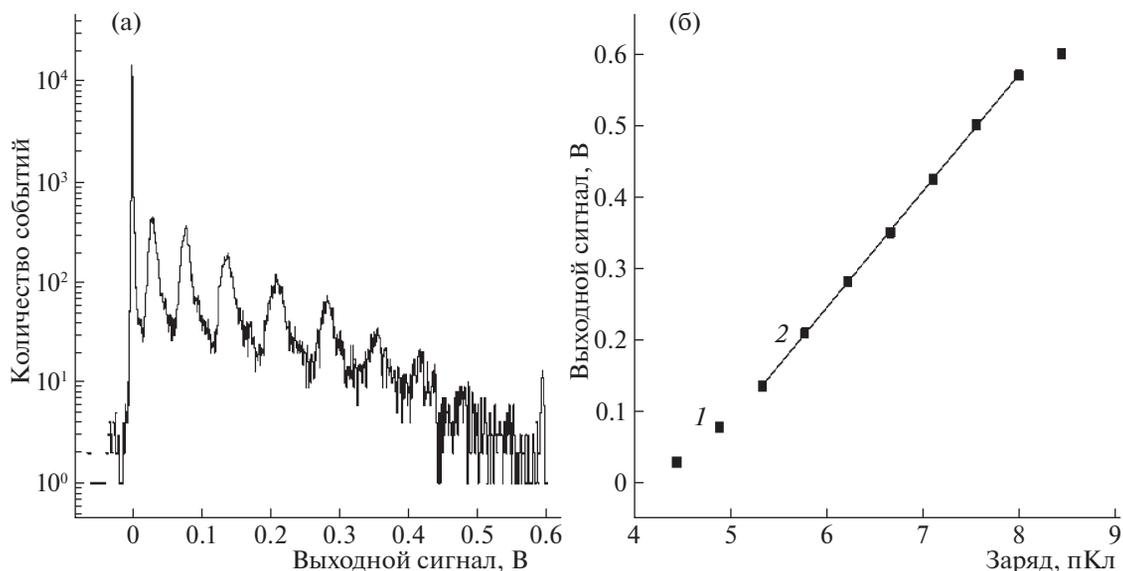


Рис. 8. 8а – Одноэлектронный спектр SiPM Hamamatsu S13360-1350PE, 8б – отклик SLOSIC на сигнал от SiPM.

в качестве примера представлены спектры сигналов и результаты фитирования для пьедесталов и пиков полного поглощения для источника  $^{241}\text{Am}$  (59.6 кэВ). Видно, что энергетическое разрешение гамма-детектора, использующего SLOSIC в качестве фронтэнда лучше, несмотря на то, что ширина пьедестала для системы с MAROC3 уже (интегрирование темновых импульсов SiPM происходит в более узком временном интервале). Собственное разрешение SLOSIC без использования SiPM составило 5 кэВ. Разница в разрешении, полученная для гамма-пиков (табл. 1) объясняется тем, что время интегрирования  $\tau$  в MAROC3 составляет  $\approx 120$  нс, в то время как SLOSIC имеет встроенный интегратор с  $\tau = 750$  нс. Исходя из разницы во временах интегрирования, ожидаемое количество зарегистрированных фотонов от вспышки сцинтиллятора NaI(Tl) с постоянной времени высвечивания  $\tau = 250$  нс для SLOSIC и MAROC3 отличается в 2.6 раза и должно приводить к улучшению разрешения для SLOSIC в  $\sqrt{2.6} \approx 1.6$  раза, что качественно согласуется с экспериментальными данными.

Полученные после обработки спектров калибровочные зависимости представлены на рис. 10. Обе системы сцинтилятор–матрица SiPM–MAROC3/SLOSIC в указанном диапазоне энергий достаточно хорошо описываются линейной зависимостью, не показывая характерного для систем с использованием SiPM насыщения в области больших сигналов. Тем не менее следует отметить, что SLOSIC имеет заметное отклонение от линейности, что связано, по-видимому, с отмеченными выше особенностями работы прототипа микросхемы в области малых сигналов.

Чтобы оценить энергетическое разрешение систем для энергии 140.5 кэВ – основной линии изомера  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , который является наиболее часто применяемым в гамма-камерах источником, была построена зависимость энергетического разрешения от энергии гамма-кванта (рис. 11) и отфильтрована функцией вида:

$$R = a * (E - b)^c,$$

где  $R$  – относительное энергетическое разрешение,  $E$  – энергия гамма-кванта, а  $a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты.

Таблица 1

	Пьедестал (ПШПВ), кэВ	Пик поглощения для $^{241}\text{Am}$ (ПШПВ), кэВ	Пик поглощения, разрешение $^{241}\text{Am}$ (ПШПВ), %	Пик поглощения, разрешение (интерполированное значение) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (ПШПВ), %
MAROC	$4.3 \pm 0.3$	$16.5 \pm 0.5$	$27.7 \pm 0.9$	$14.0 \pm 0.9$
SLOSIC	$7.2 \pm 0.5$	$10.0 \pm 0.5$	$16.9 \pm 0.9$	$10.1 \pm 0.9$

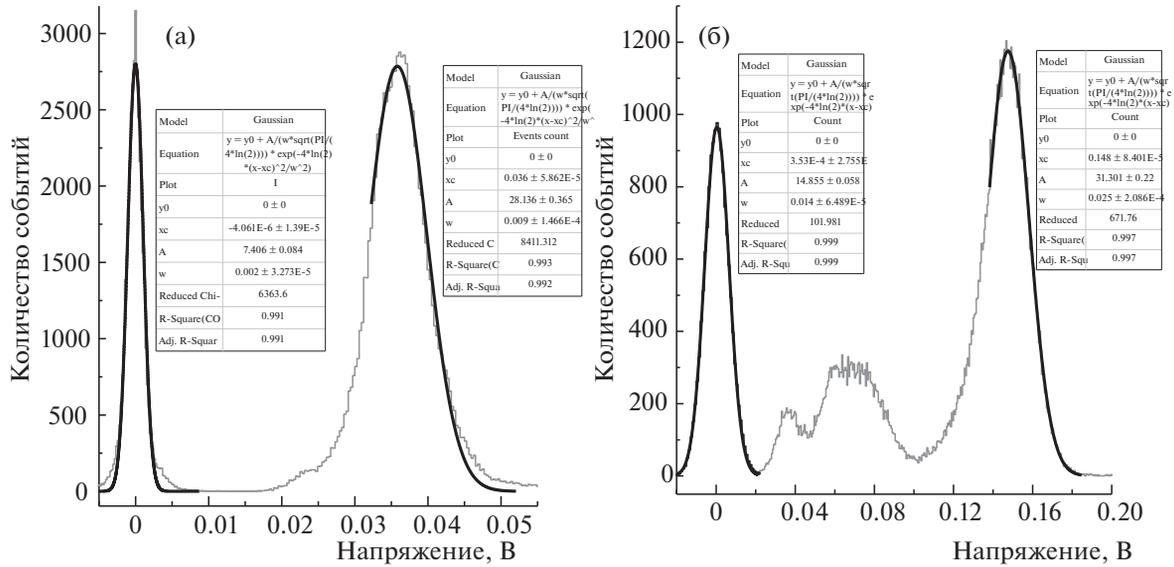


Рис. 9. Спектры <sup>241</sup>Am (59.6 кэВ) для MAROC3 (9a) и SLOSIC (9б).

Используя полученные значения коэффициентов, было вычислено энергетическое разрешение для  $E\gamma = 140.5$  кэВ и результаты представлены в таблице. Полученное разрешение для MAROC3 согласуется с представленным в работе [15]. Наличие в SLOSIC встроенного интегратора, позволяющего собрать примерно 96% фотонов, по сравнению с примерно 40% для MAROC3, обеспечивает лучшее энергетическое разрешение в районе энергии 140 кэВ, где статистика фотонов вносит большой вклад в полное разрешение системы.

### 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы по Мегагранту 14.A12.31.0006 (от 24.06.2013) был разработан и изготовлен прототип аналоговой фронтэнд электроники для использования с SiPM и медленными сцинтилляторами типа NaI(Tl). Для тестирования прототипа SLOSIC был собран тестовый стенд и разработано программное обеспечение. Были проведены измерения отклика SLOSIC на сигнал от генератора точной амплитуды и сигнал от отдельного SiPM. Кроме того, были проведены измерения с

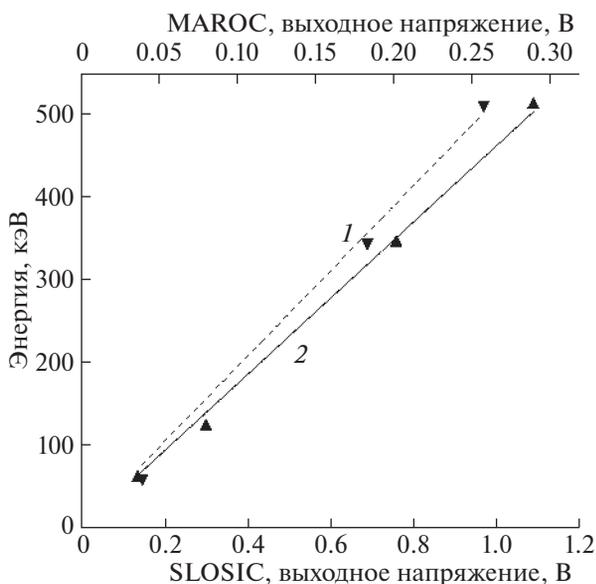


Рис. 10. Калибровочная зависимость. 1 – SLOSIC, 2 – MAROC3.

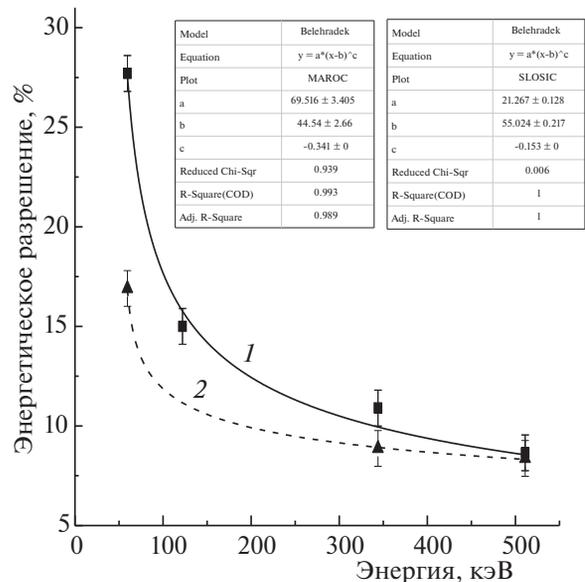


Рис. 11. График зависимости энергетического разрешения от энергии гамма-кванта. 1 – MAROC3 и 2 – SLOSIC.

гамма-детектором на основе кристалла NaI(Tl) и матрицы SiPM в диапазоне энергии от 60 до 511 кэВ. Измерения показали, что с использованием прототипа SLOSIC может быть достигнуто энергетическое разрешение, удовлетворяющее требованиям современных гамма-камер.

Данная микросхема также может быть использована для построения многоканальных систем в таких областях как ядерная физика, досмотровая техника и дозиметрия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wernick M.N., Aarsvold J.N.* Emission Tomography – The Fundamentals of PET and SPECT. Elsevier Academic Press, 2004.
2. *Popova E.V., Berdnikov V.V., Belyaev V.N. et al.* SiPM MЭPhI Megagrant Developments in Nuclear Medicine // *Physics Procedia*, 2015. V. 74. P. 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.189>
3. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/citiroc-1a/1-citiroc-1a-one-sheet-description>
4. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/petiroc-2a/2-petiroc-2a-one-sheet-description>
5. <https://www.weeroc.com/products/sipm-read-out/triroc-1a>
6. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/maroc-3a/4-maroc-3a-one-sheet-description>
7. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/catiroc-1/5-catiroc-1-one-sheet-description>
8. [https://www.petsyselectronics.com/web-site/docs/products/product1/Flyer\\_ASIC2\\_V15.pdf](https://www.petsyselectronics.com/web-site/docs/products/product1/Flyer_ASIC2_V15.pdf)
9. <https://ideas.no/products/va32hdr14-3/>
10. <https://ideas.no/products/ide3160-2/>
11. <https://ideas.no/products/ide3380/IDE3380 SIPHRA>
12. <https://ideas.no/products/vata64hdr16-2/>
13. *Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Симаков А.Б.* Специализированная интегральная микросхема для съема и аналоговой обработки сигналов матриц кремниевых фотоэлектронных умножителей // ПТЭ, 2017. № 6. С. 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.189>
14. <https://www.xfab.com/about-x-fab/>
15. *Morozov A., Solovov V., Alves F. et al.* Iterative reconstruction of detector response of an Anger gamma camera // *Physics in Medicine and Biology*, 2015. V. 60. № 10. P. 4169–4184. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/10/4169>
16. [www.ketek.net/](http://www.ketek.net/)
17. <https://www.hirose.com/product/document?cl-code=&productname=&series=DF17&documenttype=Catalog&lang=en&documentid=D49657>
18. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/maroc-3a/4-maroc-3a-one-sheet-description/file>
19. *Scott D.W.* Sturges' rule // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2009. V. 1. № 3. P. 303–306. <https://doi.org/10.1002/wics.35>
20. *Sturges H.A.* The Choice of a Class Interval // *Journal of the American Statistical Association*, 1926. V. 21. № 153. P. 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
21. *Freedman D., Diaconis P.* On the histogram as a density estimator: L 2 theory // *Zeitschrift Fur Wahrscheinlichkeitstheorie Und Verwandte Gebiete*, 1981. V. 57. P. 453–476. <https://doi.org/10.1007/bf01025868>
22. *Birgé L., Rozenholc Y.* How many bins should be put in a regular histogram // *ESAIM: Probability and Statistics*, 2006. V. 10. P. 24–45. <https://doi.org/10.1051/ps:2006001>
23. ГОСТ 26874-86. Спектрометры энергий ионизирующих излучений. Методы измерения основных параметров (с Изменениями № 1, 2).
24. <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Gaussian-Function-FitFunc>

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 4, pp. 357–367

---

## Application of the Multichannel Front-End Chip for SiPM-Based Gamma Detectors

A. C. Chergui<sup>a, #</sup>, O. V. Bychkova<sup>a</sup>, E. V. Popova<sup>a</sup>, and A. A. Stifutkin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> National Research Nuclear University MЭPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

<sup>#</sup>e-mail: [cherguicherif@hotmail.com](mailto:cherguicherif@hotmail.com)

Received July 17, 2020; revised October 6, 2020; accepted October 12, 2020

**Abstract**—The prototype of a multichannel application specific integrated circuit (ASIC) designed at the National Research Nuclear University MЭPhI as a front-end part of the gamma-detection systems utilizing “slow” scintillators such as NaI(Tl) or CsI(Tl) readout by Silicon Photomultipliers has been tested. The measurements have been carried on using a specially developed electronic test-board and a software package written in LABVIEW. The gamma-detector module includes a NaI(Tl) scintillator crystal and a matrix of SiPM PM6600 (KETEK) as a photosensor part. The system energy resolution (FWHM) has been measured to be  $(16.9 \pm 0.9)\%$  for 59.5 keV gamma rays. For comparison, the same measurements have been replicated using the analog part of the multichannel ASIC MAROC3 with observed energy resolution  $(27.7 \pm 0.9)\%$ .

*Keywords:* SIPM, PMT, MAROC, LABVIEW, MRI

DOI: 10.1134/S2304487X20040094

## REFERENCES

1. Wernick M.N., Aarsvold J.N. Emission Tomography – The Fundamentals of PET and SPECT. Elsevier Academic Press, 2004.
2. Popova E.V., Berdnikov V.V., Belyaev V.N. et al. SiPM MЭPhI Megagrant Developments in Nuclear Medicine. *Physics Procedia*, 2015. Vol. 74, pp. 36–43. doi:10.1016/j.phpro.2015.09.189
3. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/citiroc-1a/1-citiroc-1a-one-sheetdescription>
4. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/petiroc-2a/2-petiroc-2a-one-sheetdescription>
5. <https://www.weeroc.com/products/sipm-read-out/triroc-1a>
6. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/maroc-3a/4-maroc-3a-one-sheetdescription>
7. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/catiroc-1/5-catiroc-1-one-sheetdescription>
8. [https://www.petsyselectronics.com/web/web-site/docs/products/product1/Flyer\\_ASIC2\\_V15.pdf](https://www.petsyselectronics.com/web/web-site/docs/products/product1/Flyer_ASIC2_V15.pdf)
9. <https://ideas.no/products/va32hdr14-3/>
10. <https://ideas.no/products/ide3160-2/>
11. <https://ideas.no/products/ide3380/IDE3380 SIPHRA>
12. <https://ideas.no/products/vata64hdr16-2/>
13. Bocharov Y.I., Butuzov V.A., Simakov A.B. Application of a specific integrated circuit for readout and analog processing of signals from silicon multiplier arrays. *Instruments and Experimental Techniques*, 2017. Vol. 60, no. 6, pp. 800–810.
14. <https://www.xfab.com/about-x-fab/>
15. Morozov A., Solovov V., Alves F. et al. Iterative reconstruction of detector response of an Anger gamma camera. *Physics in Medicine and Biology*, 2015. Vol. 60, no. 10, pp. 4169–4184. doi:10.1088/00319155/60/10/4169
16. [www.ketek.net/](http://www.ketek.net/)
17. <https://www.hirose.com/product/document?cl-code=&productname=&series=DF17&documenttype=Catalog&lang=en&documentid=D49657>
18. <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/maroc-3a/4-maroc-3a-one-sheetdescription/file>
19. Scott D.W. Sturges' rule. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2009. Vol. 1, no. 3, p. 303–306. doi:10.1002/wics.35
20. Sturges H.A. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 1926. Vol. 21, no. 153, pp. 65–66. doi:10.1080/01621459.1926.10502161
21. Freedman D., Diaconis P. On the histogram as a density estimator: L 2 theory. *Zeitschrift Fur Wahrscheinlichkeitstheorie Und Verwandte Gebiete*, 1981. Vol. 57, pp. 453–476. doi:10.1007/bf01025868
22. Birgé L., Rozenholc Y. How many bins should be put in a regular histogram. *ESAIM: Probability and Statistics*, 2006. Vol. 10, pp. 24–45. doi:10.1051/ps:2006001
23. GOST 26874–86. Spektrometryenergii ioniziruiuch'h izluchenii. Metody izmereniiia osnovnyh parametrov. [State Standard 26874–86. Ionizing radiation power spectrometers. Methods of basic parameters measurement]. Moscow, 1987. 35 p.
24. <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Gaussian-Function-FitFunc>