

Структура каналов для считывающей электроники кремниевых детекторов

А. Воронин, к. ф-м. н.¹

УДК 539.1.075 | ВАК 05.27.01

Одна из особенностей считывающей электроники (СЭ) аппаратуры для экспериментов в области физики высоких энергий и космических лучей, электроники для некоторых других классов приборов, использующей кремниевые системы детектирования ионизирующих излучений, – многоканальность. Например, количество идентичных измерительных каналов СЭ установок для физики высоких энергий, каждый из которых подключен к одному сегменту детектора (стрипу или паду), может превышать 10^7 . Специализированные интегральные микросхемы (СИМС), применяемые в СЭ, содержат, как правило, от 16 до 128 каналов. Рассмотрим основные структурные решения для СЭ и факторы, влияющие на выбор структурной схемы при реализации многоканальной детектирующей системы на основе кремниевых детекторов.

Основной задачей, для решения которой используется канал СЭ, является получение (измерение) достоверных характеристик импульсов одного сегмента детектора по напряжению и времени (в том числе в виде бинарной последовательности импульсов полезных сигналов). Применяемые в настоящее время структурные решения измерительных каналов в зависимости от технических требований – преимущественно аналого-цифровые, в состав которых могут входить головная часть, блоки аналоговой и цифровой обработки, АЦП, ЦАП.

Несмотря на многообразие схемных решений, можно выделить три основных типа каналов:

- последовательный;
- последовательно-параллельный;
- канал, образованный коммутацией отдельных блоков, входящих в СЭ.

Канал первого типа, один из вариантов реализации которого показан на рис. 1, содержит цепь блоков, соединенных последовательно, и при необходимости может иметь обратные связи между блоками. Головная часть канала обеспечивает преобразование сигнала детектора в импульс напряжения, фильтрацию шумов и оптимизацию формы импульса, что позволяет выполнить дальнейшую обработку сигнала.

Под цифровыми блоками обработки сигнала понимаются блоки, осуществляющие цифровое преобразование сигнала в одном канале. Все более широкое применение технологии цифровой обработки связано с внедрением субмикронных и наноэлектронных СИМС кремниевых детекторов, что значительно уменьшает размер вентиля на кристалле, потребляемую мощность и повышает рабочую частоту до нескольких гигагерц. Это позволяет применять аппаратные методы реализации сложных цифровых функций в многоканальной электронике, при этом обеспечиваются высокое быстродействие обработки сигналов и малые размеры цифровых устройств по сравнению с универсальными контроллерами. Общие для СЭ (СИМС) цифровые узлы, такие как управление, интерфейсы, общее преобразование данных в СЭ и другие подобные блоки, не входят в состав канала и в настоящей статье не рассматриваются, за исключением принципа работы арбитражной логики.

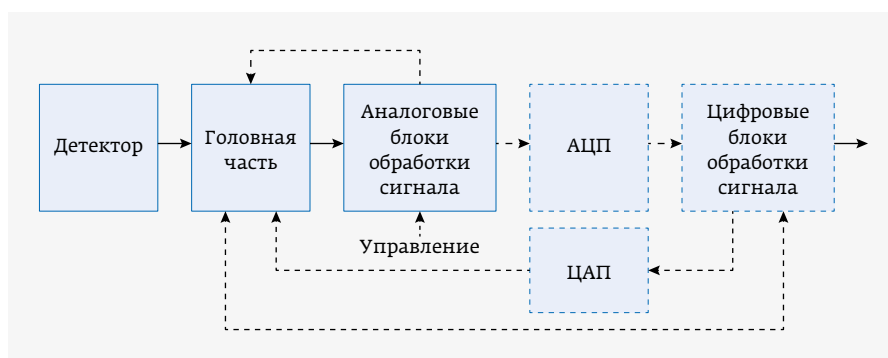


Рис. 1. Структура последовательного канала (штриховой линией обозначены блоки и связи, которые могут отсутствовать в реализации канала для конкретного проекта)

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцина МГУ им. М.В. Ломоносова, voronin@silab.sinp.msu.ru.

случае канал делится на несколько укрупненных блоков, при этом в кристалле СИМС или СЭ создается набор аналогичных блоков, состоящий из субканалов каждого типа и содержащий необходимое количество устройств, которое должно обеспечивать обработку всех сигналов на входе при максимальной загрузке СЭ (СИМС). При этом число входов $N > M$ (где M – число аналоговых субканалов), соответственно уменьшается количество АЦП и цифровых блоков.

Схема должна реализовать минимально допустимую вероятность пропуска полезного сигнала с учетом времени обработки в каналах, создаваемых по принципу переключения укрупненных блоков. Каждый входной каскад (число входов N) подключается к входу аналогового мультиплексора (матрицы), к другим входам которого подключаются входные каскады иных сегментов детекторов. Полный канал для одного сегмента формируется из свободных на данный момент блоков СЭ (на рис. 3 показан линиями красного цвета).

Дополнительная аналоговая переключающая матрица может быть расположена между аналоговыми блоками и АЦП. Арбитражная логика (схема управления) обеспечивает коммутацию блоков СЭ, создает один канал обработки для одного сегмента детектора и должна сохранять информацию о состоянии блоков СЭ («свободен» или «занят») и коммутирующих устройств, а также формировать команды для переключения блоков (см. рис. 3). Арбитражная логика для цифровых блоков может быть проще, чем для аналоговых блоков, поскольку данные на выходе АЦП привязаны к тактовой частоте, в отличие от входных сигналов, случайно появляющихся на входе канала. Арбитражная логика содержит регистры состояния и решающее устройство, обеспечивает привязку данных к номеру входного канала и при необходимости привязку ко времени появления события.

Каждый отдельный укрупненный блок, показанный на рис. 1–3, состоит из функциональных узлов (функциональных блоков), обеспечивающих формирование, преобразование, фильтрацию шумов и измерение импульсов детекторов. Сигнал детектора – аналоговый, поэтому первый каскад СЭ выполняется как зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ), или интегратор тока детектора, либо как преобразователь тока детектора в импульс напряжения. К основным функциональным узлам канала кремниевого детектора относятся:

- фильтр-формирователь с бесконечной импульсной характеристикой (время-инвариантный шейпер) или конечной

импульсной характеристикой (время-вариантный шейпер);

- компенсатор полюса ЗЧУ, уменьшающий смещение базовой линии в канале;
- стабилизатор базовой линии, компенсирующий изменения постоянной составляющей, которая возникает при случайном во времени потоке импульсов детектора и нестабильности головного каскада;
- память;
- пиковый детектор;
- ЦАП и АЦП.

Кроме того, в состав функциональных блоков входят каскады усилителей, компараторы, ключи и мультиплексоры (переключающие матрицы), опорные источники напряжения, фильтры и другие каскады.

Функциональные блоки могут быть реализованы в аналоговом и цифровом виде, причем цифровая реализация узлов может быть выполнена как цифровое подобие аналоговых блоков или при помощи оригинальных цифровых методов.

Функции обработки сигнала детектора осуществляются в канале по запускающему триггеру (команде), что позволяет существенно уменьшить объем информации, которую должна обработать СЭ. В зависимости от вида триггера применяют разные структурные схемы (различный набор функциональных блоков) для построения канала. Существуют два основных метода триггирования канала: по внешнему триггеру и самотриггирование канала.

КАНАЛ С ВНЕШНИМ ТРИГГЕРОМ

Принцип работы канала с внешним триггером рассмотрим на примере последовательного канала с аналоговой реализацией основных блоков (рис. 4). Описание аналоговой части подобного канала без триггера и входящих в него узлов, а также схема подключения триггера приведены в [1, 4]. Часть блоков канала, таких как стабилизатор базовой линии, формирователь, уменьшающий длительность импульса и снижающий вероятность

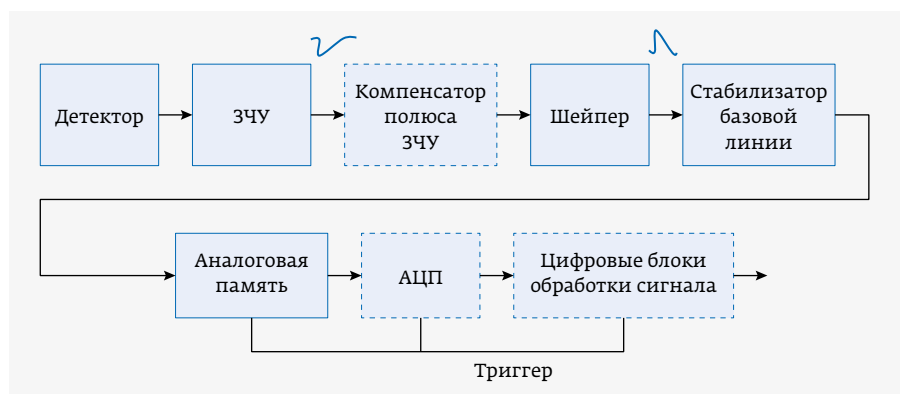


Рис. 4. Пример канала с внешним триггером

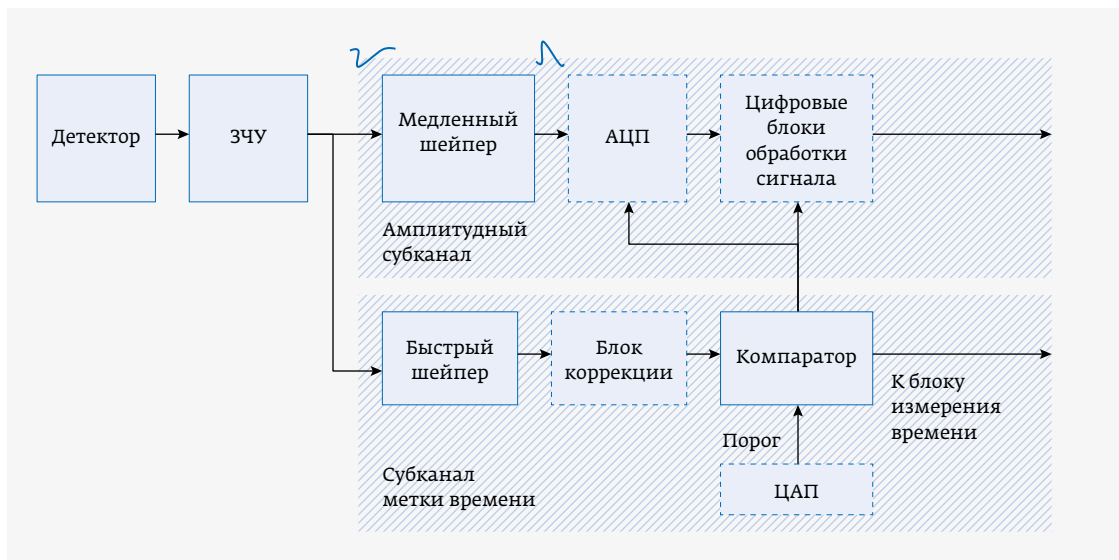


Рис. 5.
Пример канала с самотриггированием

наложений соседних событий, или дополнительный пиковый детектор, можно реализовать в цифровом виде.

При внешней триггерной системе структура канала и его реализация существенно упрощаются, однако основной недостаток внешнего триггера – низкое быстродействие. Это связано с тем, что внешняя триггерная система обрабатывает большое количество каналов, и необходимо дополнительное время на принятие решения о выработке триггера – не менее сотен наносекунд. Поэтому аналоговая память (блок задержки) – ключевой блок для правильной работы канала по внешнему триггеру. Аналоговая память может служить также пиковым детектором, если триггер подать во время достижения максимума импульсом на выходе шейпера.

КАНАЛ С САМОТРИГГИРОВАНИЕМ

Канал с самотриггированием (то есть решение о наличии сигнала принимается в самом канале, в английском варианте data driven) выполняется, как правило, по последовательно-параллельной схеме (см. рис. 2, 5). Для этого вводится субканал с шейпером, для которого выбирается минимально возможное время формирования, которое для кремниевых детекторов составляет десятки наносекунд. Быстрое время формирования минимизирует время определения события и позволяет его фиксировать в блоке измерения времени, привязывая к адресу канала для дальнейшей локализации данных о событии со всех каналов установки.

Возможно введение блока коррекции, который стабилизирует или компенсирует разброс задержки срабатывания компаратора, возникающий за счет конечности времени фронта быстрого шейпера. Схема с самотриггированием более быстродействующая по сравнению со схемой с внешним триггером, поскольку решение о наличии сигнала принимается в головных каскадах одного канала.

Субканал метки времени запускает также обработку сигнала в основном амплитудном канале, время формирования которого больше, чем в быстром канале, что позволяет снизить шум и пренебречь задержкой быстрого канала. Столь простая схема субканала метки времени дает возможность предположить наличие ошибок при ее работе.

Известно, что ошибки вносят два основных фактора – шум и статистический разброс величин ионизационных потерь в кремнии и, как следствие, разброс амплитуды сигнала в кремниевом детекторе. Для релятивистских частиц амплитудный спектр сигнала приближенно можно описать кривой, аналогичной распределению Ландау (рис. 6).

На рис. 6, показывающем пересечение амплитудных спектров сигнала и шумов, видно, что практически невозможно установить порог, полностью исключив шум. Ошибки при определении метки времени можно классифицировать, используя понятие выбросов шумов, то есть пересечение шумами порога компаратора:

- ложный сигнал (ложная тревога) или потеря полезного сигнала;
- ошибка в измерении времени события.

Кроме того, на входе быстрого шейпера шумовой выброс может соединить близко расположенные сигналы в один (выброс «снизу-вверх») или разделить один сигнал на несколько (выброс «сверху-вниз»).

Амплитудный спектр с обрезанным шумом, полученный в процессе эксперимента СВД-2, представлен на рис. 7.

Суммарная длительность импульсов в канале метки времени кремниевого детектора составляет ~20–40 нс/импульс, что не превышает нескольких процентов даже при высокой загрузке канала (например, при частоте до 1 МГц). Можно утверждать, что основным источником ошибки (ложной тревоги) в канале являются

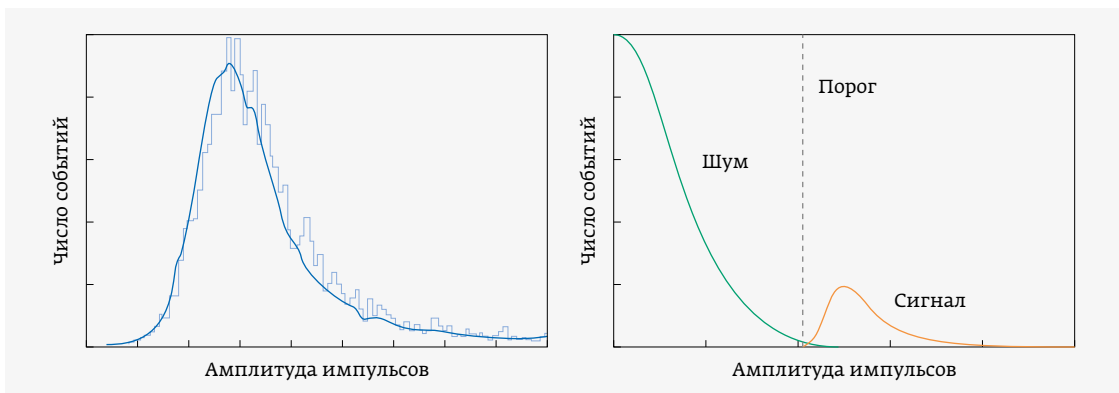


Рис. 6. Вид распределения Ландау (слева) и амплитудный спектр сигнала и шума (справа)

шумовые выбросы в отсутствии сигнала. Для нормальных стационарных шумовых процессов среднее число шумовых выбросов «снизу-вверх» N_1 (а также «сверху-вниз» N_2) в единицу времени в общем виде равно [2, 3]:

$$N_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-R(0)''} \cdot e^{-0,5\gamma^2}, \tag{1}$$

где $R(0)''$ – вторая производная от корреляционного коэффициента шума в нуле [2, 3], $\gamma = Th / \sigma$ – отношение величины порога Th к среднеквадратическому отклонению σ , взвешенного в полосе шейпера;

$$R(0)'' = -\frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 \cdot S(2\pi f) \cdot d(2\pi f), \tag{2}$$

где $S(2\pi f)$ – спектральная плотность шума, f – циклическая частота.

В нашем случае на входе канала преобладающей шумовой составляющей является «белый» шум со спектральной плотностью N_0 , поэтому $S(2\pi f)$ можно выразить следующим образом:

$$S(2\pi f) = N_0 |k_n(2\pi f)|, \tag{3}$$

где $|k_n(2\pi f)|$ – модуль коэффициента передачи для шумов канала метки времени с ЗЧУ.

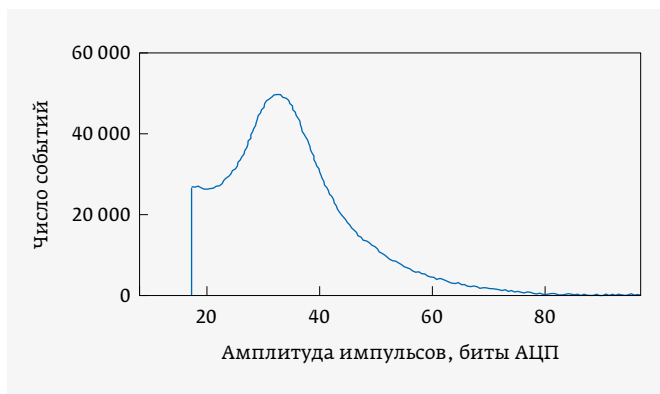


Рис. 7. Амплитудный спектр канала эксперимента СВД-2

Выражения для $|k_n(2\pi f)|$ достаточно просто получить, используя работы [1, 3, 5], с учетом различных видов шейперов (k_{nSH}) (коэффициент передачи $k_n(2\pi f) = k_{пзчу} \cdot k_{nSH}$).

В канале метки времени используются в основном CR-RC-шейперы, образующие полосовой фильтр и состоящие из последовательно соединенных дифференцирующих и интегрирующих каскадов. Отклик такого шейпера представляет собой импульс псевдогауссовой формы, а форма амплитудного спектра шума на выходе фильтра близка к гауссовой форме. В работе [2] показано, что количество выбросов пропорционально полосе спектральной плотности полосового фильтра $k \cdot \Delta f$. Коэффициент k определяет поведение огибающей $|k_n(2\pi f)|$. Поскольку ложный запуск канала метки времени осуществляется выбросами «снизу-вверх», для оценки k полосового импульса псевдогауссовой формы можно предположить, что ложный запуск дает половина числа переходов шумов через порог в полосе Δf и $k \approx 0,5$. Оценить среднее число выбросов N_1 в единицу времени и соответственно число ложных запусков в канале можно по следующей формуле:

$$N_1 \approx 0,5 \cdot \Delta f \cdot e^{-0,5\gamma^2}, \tag{4}$$

где Δf – полоса спектральной плотности по уровню 0,5 по мощности (0,707 по напряжению), которую можно получить, преобразовав $|k_n(2\pi f)|$, используя [3].

Более точное значение N_1 можно рассчитать, применив выражения (1) – (3); например, для идеального гауссового спектра $k = 0,42$.

Напряжение порога выбирают исходя из $\gamma = Th / \sigma$ так, чтобы количество ложных срабатываний было пренебрежимо мало по сравнению со средней частотой загрузки канала f_0 . Очевидно, что величина порога должна быть существенно меньше максимального сигнала детектора $Umipc$ для минимально ионизирующей частицы (рис. 6, 7) на входе компаратора и находиться в зоне пересечения амплитудных спектров шумов и сигнала.

Для кремниевого детектора наиболее вероятный (максимальный) выходной сигнал на единицу толщины детектора составляет заряд $Qtip / мкм = 12 \cdot 10^{-18} К / мкм$.

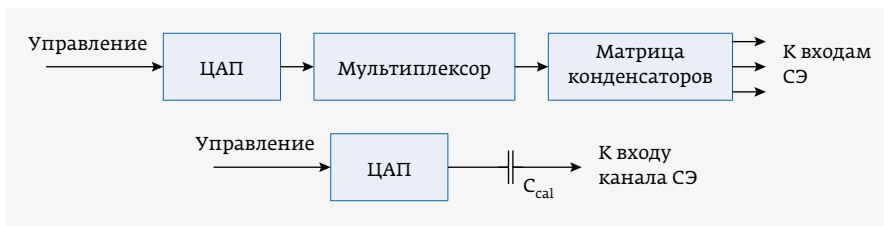


Рис. 8. Структура тестового канала: сверху – для группы измерительных каналов; внизу – для индивидуального измерительного канала

Преобразуем Q_{tip} в напряжение: $U_{tip} = Q_{tip} / C_{eq}$. Емкость C_{eq} – это сумма емкости детектора и всех паразитных емкостей, подключенных к входу СЭ. Умножив коэффициент передачи сигнала k_s , рассчитанный используя [3], на U_{tip} , получим амплитуду импульса на входе компаратора $U_{tipc} = U_{tip} \cdot k_s$ для конкретной схемы канала с коэффициентом передачи k_s .

Обычно на выходе шейпера канала с кремниевым детектором отношение сигнал-шум $SNR = Q_{mipsh} / \sigma_{sh}$ находится в пределах 5–15, соответственно порог не может превышать несколько σ . Необходимо найти компромисс между максимальным быстродействием и отношением сигнал-шум в канале, чтобы число ложных срабатываний было допустимо минимальным, а эффективность регистрации (пропуск полезного события) – максимальной. Это достигается, в частности, юстировкой аппаратуры (экспериментальной регулировкой порога).

Следует отметить, что экспонента в выражениях для выбросов быстро спадает из-за $\gamma^2(1)$, что обеспечивает эффективность регистрации на уровне выше 90%. Оценить эффективность регистрации полезного сигнала по отношению к выбросам можно с использованием данных амплитудного субканала (см. рис. 5), поскольку SNR в этом канале выше, чем в канале метки времени. Канал, показанный на рис. 3, также является самотриггирующимся.

Кроме измерительных каналов (каналов регистрации), в СЭ (СИМС) для кремниевых детекторов вводятся калибровочные каналы, позволяющие контролировать работоспособность аппаратуры.

КАЛИБРОВОЧНЫЙ КАНАЛ

Калибровочный (тестовый) канал в СЭ (СИМС) выполняет две функции: проверку работоспособности каналов СЭ и создание информационной базы для коррекции данных при деградации СЭ, например в космических экспериментах.

Калибровочный канал может быть одним для группы измерительных каналов (рис. 8). В этом случае можно выбирать только номера каналов с помощью мультиплексора. Тестовые сигналы при этом будут одной и той же амплитуды.

Калибровочный канал также может быть реализован в каждом измерительном канале, в этом случае можно создать любую комбинацию тестовых воздействий с разными амплитудами (см. рис. 8).

Калибровочный канал не может полностью имитировать пролет частицы через кремниевый детектор, поскольку он подключен непосредственно к входам СЭ и не учитывает

детекторную часть измерительного канала, в частности задержки. Форма тестового сигнала генерируется ЦАП, как правило, в виде прямоугольного импульса длительностью Δt , что не соответствует в полной мере форме сигнала детектора. Корреляцию между калибровочной системой и сигналом от частицы можно установить при помощи эксперимента с источником соответствующего излучения или лазера.

Калибровочная емкость C_{cal} выбирается из условия $C_{cal} \ll C_d$ (C_d – емкость детектора), чтобы уменьшить паразитную емкость входа. ЦАП может иметь выход по напряжению U_{dac} , тогда входной тестовый заряд $Q_t = U_{dac} \cdot C_{cal}$, или по однополярному току I_t : $Q_t = I_t \cdot \Delta t$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье в обобщенном виде рассмотрены структурные схемы каналов многоканальной электроники для регистрации и тестирования приборов, использующих в качестве датчика кремниевые детекторы, а также вопросы, связанные с подключением внешнего триггера, и особенности триггера, расположенного в самом канале. Кроме того, кратко описана структура калибровочного (тестового) канала для проверки работоспособности остальных (рабочих) каналов. Положения этой статьи предполагается использовать при реализации гранта РФФИ № 18-02-40047 «Система скоростного потокового чтения данных с широко-апертурной кремниевой трековой системы установки NICA-BM@N».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Spieler H.** Semiconductor Detector Systems // John Wiley Oxford University Press, New York U. S.A., 2005.
2. **Тихонов В. И.** Выбросы случайных процессов // Успехи физических наук. 1962. Т. LXXVII. Вып. 4.
3. **Баскаков С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы / 3-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.
4. **Spieler H.** Electronics and data acquisition // Nuclear Instruments and Methods, 2012, V. A666, P. 197–222.
5. **Grybos P.** Front-end Electronics for Multichannel Semiconductor Detector Systems. // Institute of Electronic Systems, Warsaw University of Technology, Warsaw, 2010.