

Каскады обработки и преобразования сигналов в измерительных каналах с кремниевым детектором

Часть 2

А. Воронин, к. ф. -м. н.¹

УДК 539.1.075 | ВАК 05.27.01

Во второй части статьи рассмотрены особенности реализации аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, а также стабилизаторов базовой линии, применяемых для считывающей электроники кремниевых детекторов в проектах физики высоких энергий и физики космических лучей.

АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ И ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Современные технологии для АЦП и ЦАП позволяют использовать емкостные цепи вместо резистивных цепей, когда резистивная матрица меняется на емкостную матрицу с ключами. Такая замена увеличивает быстродействие преобразователей и снижает потребляемую мощность. АЦП и ЦАП нашли широкое применение в специализированных интегральных микросхемах (СИМС) считывающей электроники (СЭ) последнего поколения. ЦАП используются как опорные регулируемые источники напряжений и токов для компараторов и других схем, а также как регулируемые источники смещений каскадов. В калибровочных системах, как одной из важных частей СИМС, используются импульсные ЦАП, которые должны обеспечивать короткий (порядка десятков наносекунд и менее) фронт тестового сигнала. Такие ЦАП применяют также в составе быстродействующих АЦП.

В СЭ используются АЦП следующих типов: параллельные, последовательного приближения, Вилкинсона и иногда ToT (Time over Threshold). Конвейерные АЦП применяются реже, хотя и имеют высокую частоту дискретизации.

Структура и схемные решения для ЦАП и АЦП, применяемых в физике высоких энергий (ФВЭ) и физике космических лучей (ФКЛ), подробно освещены в литературе [1], однако основные требования к ЦАП и АЦП для СЭ имеют определенную специфику. Эти требования вытекают из многоканального характера аппаратуры и требований эксперимента.

В первых поколениях СИМС АЦП практически не применялись из-за высокой потребляемой мощности

и площади, занимаемой на кристалле. Развитие технологии позволило частично устранить эти недостатки. Другой важный фактор – помехи, возникающие в переключаемых цифровых схемах. Для систем с невысоким динамическим диапазоном (трековые системы) помехи можно довести до приемлемого уровня, тогда как в калориметрических системах или системах, когда требуется АЦП высокого разрешения (12–16 разрядов и более), подавление помех, снижение потребляемой мощности и выполнение требований по точности всё еще представляют проблему при проектировании АЦП для СИМС.

Погрешности оцифровки и специфика АЦП для кремниевых систем рассмотрены в [2]. Требования к линейности характеристики АЦП для СИМС ФВЭ и ФКЛ, в отличие от аудиосистем, как правило, невысокие (несколько процентов), поскольку калибровка каналов позволяет корректировать данные.

ЦАП (применяемые в основном для задания режимов каскадов и порогов компараторов) не требуют высокого

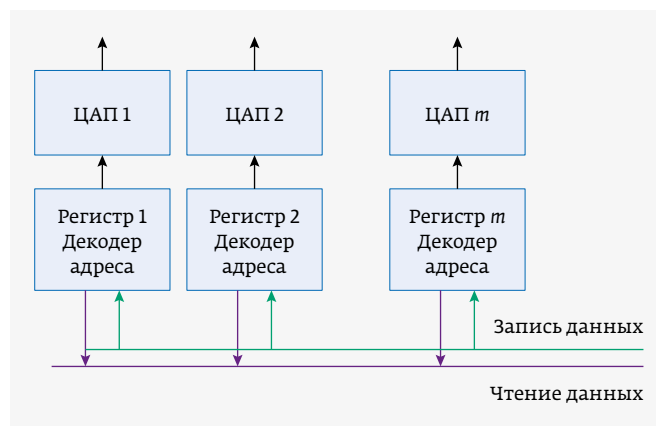


Рис. 18. Формирователь опорных напряжений (токов) СИМС при помощи ЦАП

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

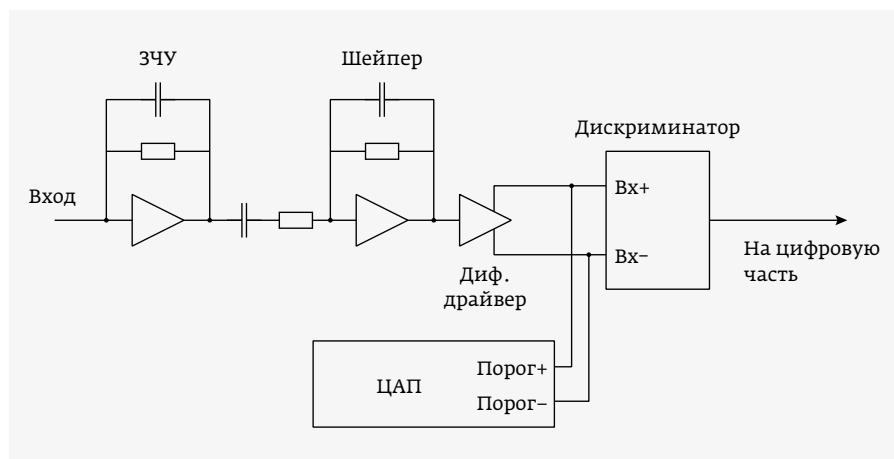


Рис. 19. Использование ЦАП в СИМС MUCH V2 (показан один канал)

быстродействия, за исключением тех случаев, когда ЦАП не используется в составе быстродействующего АЦП или калибровочной системе.

Применение ЦАП для задания режимов каскадов (СИМС STS-XYTER) позволяет снизить количество внешних регулировочных элементов и использовать цифровое управление режимами СИМС (рис. 18). Для проверки правильности записи кодов ЦАП используется обратное чтение состояния регистра управления ЦАП.

Использование ЦАП в СИМС MUCH V2 [3] приведено на рис. 19. Для формирования дифференциального порога для дискриминатора был применен токовый ЦАП со схемой преобразования тока ЦАП в дифференциальный регулируемый источник напряжения.

В СИМС для многоканальных систем считывания кремниевых детекторов применяют следующие типы АЦП: в FSSR2 и STS-XYTER используется параллельный АЦП, в SVX4 – АЦП Вилкинсона, в MUCH V2 и MUCH V3 – АЦП последовательного приближения (рис. 20, 21). АЦП по методу ТоТ будут рассмотрены в следующем разделе статьи.

Шестиразрядный АЦП последовательного приближения для СИМС MUCH V2 [3] построен на основе матрицы конденсаторов емкостью несколько фФ, что обеспечило их быстрый перезаряд и позволило получить быстродействие 50 Мвыб/с

(потребляемая мощность составляет 2 мВт).

Модификация АЦП, использованная в СИМС MUCH V3 [4], показана на рис. 21. Шестиразрядный АЦП последовательного приближения содержит конденсаторную матрицу, компаратор, регистр последовательного приближения и набор ключей. Для уменьшения площади на кристалле матрица разделена на две части, что позволило сократить площадь АЦП с 1,56 до 0,92 мм². АЦП имеет один аналоговый вход. Генератор тактовой частоты – внутренний (порядка 500 МГц), построенный по схеме кольцевого генератора. При такой тактовой частоте АЦП уверенно работает до частоты 40 МГц.

В версии СИМС MUCH V4 [5] АЦП последовательного приближения имеет восемь разрядов при максимальной

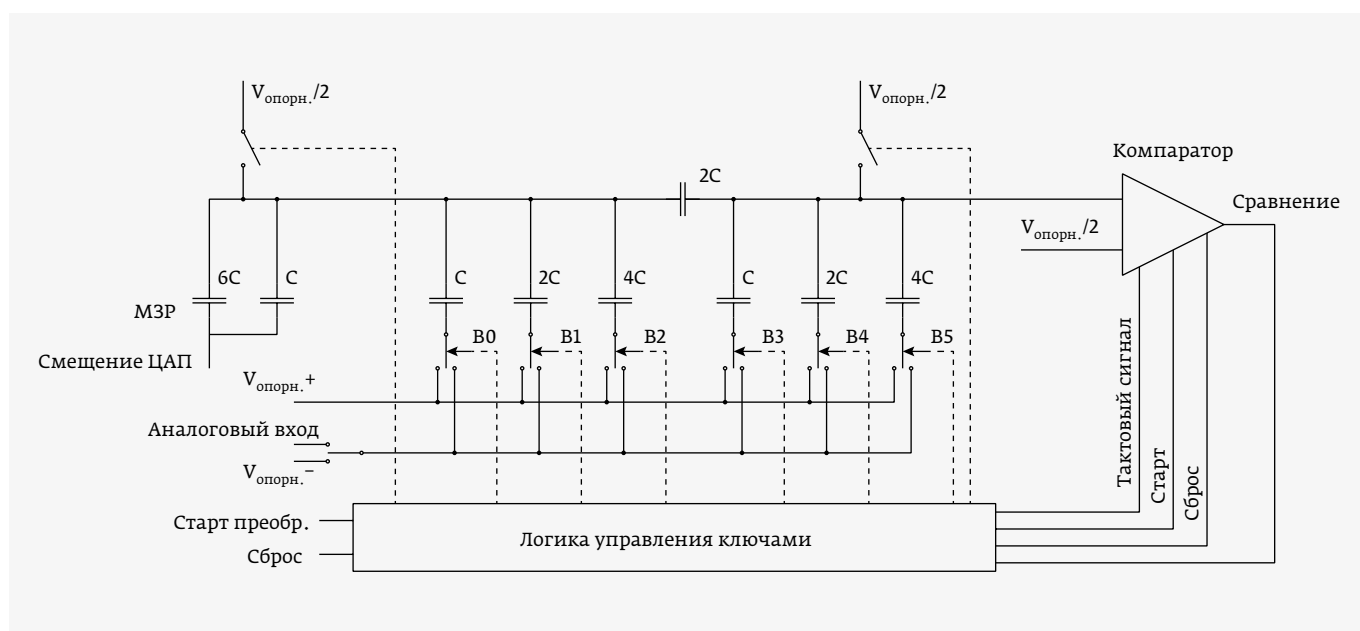


Рис. 20. АЦП последовательного приближения MUCH-XYTER V2

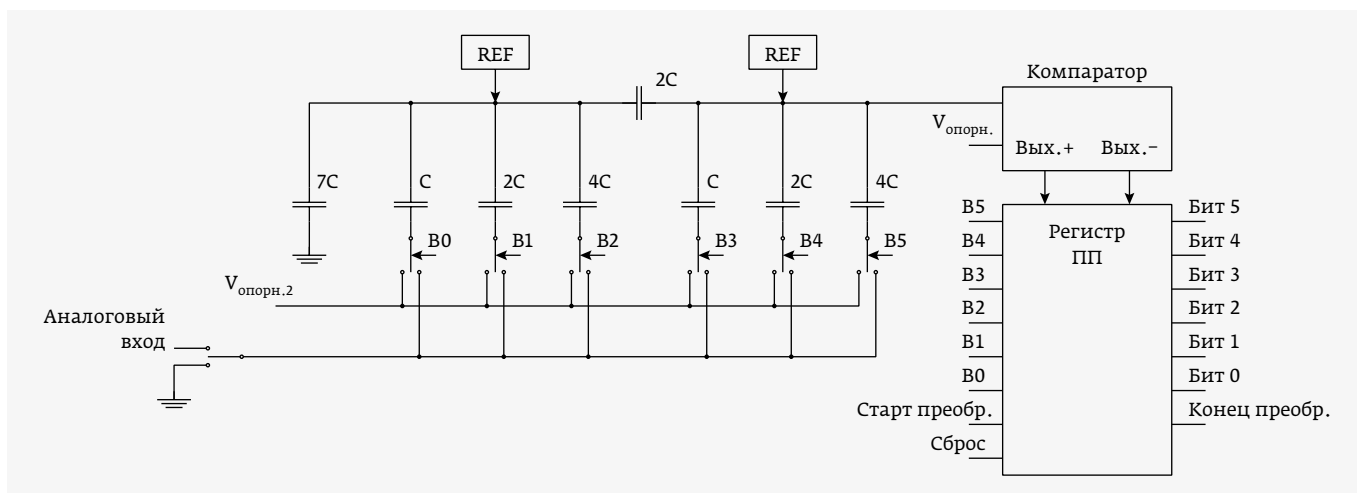


Рис. 21. АЦП последовательного приближения MUCH-XYTER V3

частоте 30 МГц входного сигнала и потребляемой мощности 1,5 мВт.

АЦП по методу ToT (Time over Threshold)

Метод оцифровки сигнала ToT применяется недавно, в основном в ядерной электронике, и считается самым простым способом получить цифровой эквивалент аналогового сигнала. Суть метода заключается в определении амплитуды сигнала по длительности сигнала дискриминатора, подключенного к выходу предусилителя или шейпера.

Метод ToT обеспечивает следующие преимущества:

- низкую потребляемую мощность;
- малую площадь на кристалле;
- простоту реализации;

- возможность установки АЦП ToT на выходе зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ).

Недостатками метода можно считать высокую нелинейность и зависимость времени преобразования от амплитуды импульса (рис. 22).

Этот метод рассмотрен в [6], в частности применительно к кремниевым системам. Здесь мы отметим некоторые особенности при использовании ToT в системах с полупроводниковыми детекторами по сравнению с пиксельными детекторами.

Реализация метода ToT в СИМС ТОРИХ [7] для пиксельных детекторов показывает, что можно добиться упрощения схемы измерительного канала. АЦП ToT в СИМС ТОРИХ реализуется на компараторе, который сравнивает на входах опорное напряжение и напряжение на выходе

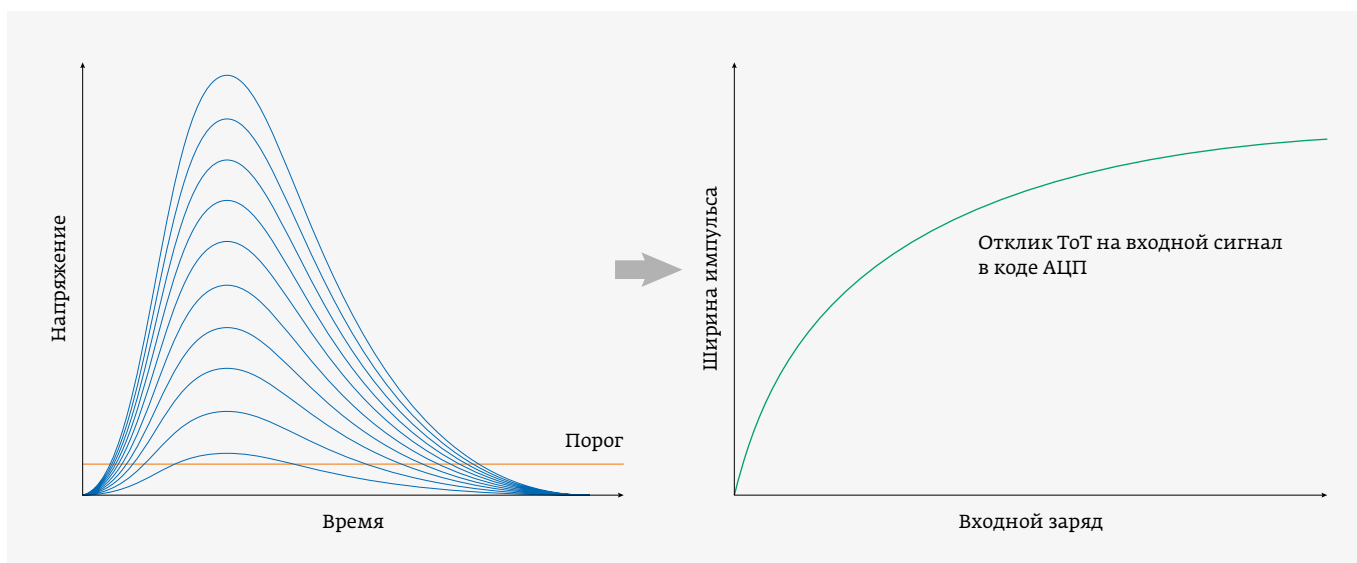


Рис. 22. Принцип оцифровки по методу ToT

ЗЧУ при отсутствии шейпера. Разряд емкости обратной связи осуществляется постоянным током, что линеаризует переходную характеристику АЦП. Такое схемное решение можно применить, когда входная емкость пикселя невелика – менее нескольких пФ, что снижает напряжение шума, например, до 200 электронов. Другими словами, в системе, где шумы незначительны, можно подключить АЦП ToT (компаратор) непосредственно к выходу ЗЧУ, исключив из схемы шейпер. Транзистор разряда емкости обратной связи при этом включается в режиме источника тока. Если линейность не важна, то схема подключения транзистора разряда емкости обратной связи ЗЧУ работает в обычном режиме экспоненциального разряда (в режиме резистора).

Рассмотрим влияние шума, наложений импульсов и нелинейности на точность измерения длительности выходного импульса компаратора ToT.

В отличие от АЦП, измеряющего непосредственно напряжение (амплитуду импульса), при методе ToT измеряется длительность импульса над порогом, которая затем конвертируется в значение амплитуды. Амплитудный шум σ_v при этом не дает правильной оценки погрешности измерений. В методе ToT для измерения длительности интервала, выделенного дискриминатором, важны флуктуации фронта и спада вдоль оси времени в области порога, то есть джиттер σ_t . Считая шум аддитивным и сложив его с сигналом (рис. 23), можно отметить, что джиттер зависит от скорости нарастания сигнала в области порога.

Среднеквадратическое отклонение для джиттера равно: $\sigma_t = \sigma_v / (dV/dt)$.

Поскольку мы имеем две точки срабатывания компаратора – σ_{t1} по фронту сигнала и σ_{t2} по его спаду – и считаем, что корреляция отсутствует, то суммарное среднеквадратическое отклонение равно: $\sigma_{t\Sigma} = (\sigma_{t1}^2 + \sigma_{t2}^2)^{1/2}$. Скорость нарастания фронта в ЗЧУ выше скорости спада, линеаризованного постоянным разрядным током для пиксельных детекторов (как минимум в несколько раз). Величина джиттера в этом случае будет больше зависеть от спада сигнала. Поэтому малый шум, с суммарным $\sigma_{t\Sigma}$ в десятки раз меньшим периода тактовой частоты измерения интервала ToT, не приведет к неприемлемой ошибке измерений.

Величина загрузки канала не должна быть высокой. ЗЧУ имеет спад, как правило, длиннее ширины импульса шейпера и, соответственно, вероятность наложений на выходе ЗЧУ выше, чем у шейпера. Если шейпер во многих случаях выделяет наложение сигналов, то сигналы на выходе ЗЧУ при наложении суммируются. При методе ToT это приводит к ошибке преобразования. Должно выполняться условие: максимальное время преобразования не должно превышать временной интервал между сигналами.

Однако этот эффект может увеличить время преобразования по сравнению с использованием узкополосного шейпера в схеме. Суммируя сказанное можно сделать вывод: ToT предпочтительно использовать для пиксельных детекторов и трековых систем с невысоким уровнем шума, обеспечивающим достаточную точность измерения амплитуды, невысоким динамическим диапазоном (нелинейность характеристики) и невысокой загрузкой каналов (практически отсутствие наложения импульсов).

Если сравнивать псевдогауссовый выход CR-RC-фильтра, то зависимость длительности выходного импульса компаратора от амплитуды входного сигнала носит явно нелинейный характер (см. рис. 22). Однако при этом имеется полезное свойство ToT, когда необходим логарифмический преобразователь. Форма импульса шейпера $U_{\text{вых}}(t)$ описывается набором экспоненциальных функций:

$$U_{\text{вых}}(t) = (B_1 + B_2 t + \dots + B_n t^n) \cdot e^{-t/\tau} + B_p \cdot e^{-t/\tau_p} B,$$

где B_n – весовые коэффициенты, τ – постоянная времени каскадов шейпера, $\tau_{\text{зчу}}$ – постоянная времени ЗЧУ.

Характеристика преобразования в этом случае на определенном участке до 10 ФКл (см. рис. 22) близка к логарифмической – так называемая «логарифмическая компрессия».

При использовании микростриповых детекторов часто не удастся обойтись без CR-RC-шейпера для минимизации шума. В этом случае приходится либо мириться с нелинейностью характеристики преобразования, либо вводить дополнительные элементы для ее линеаризации. Метод ToT для микростриповых детекторов, например,

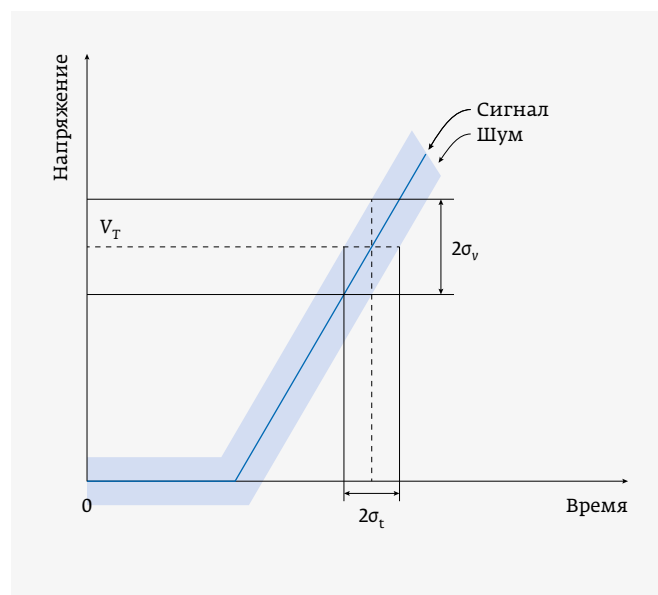


Рис. 23. Амплитудный шум, джиттер и сигнал в области порога АЦП ToT

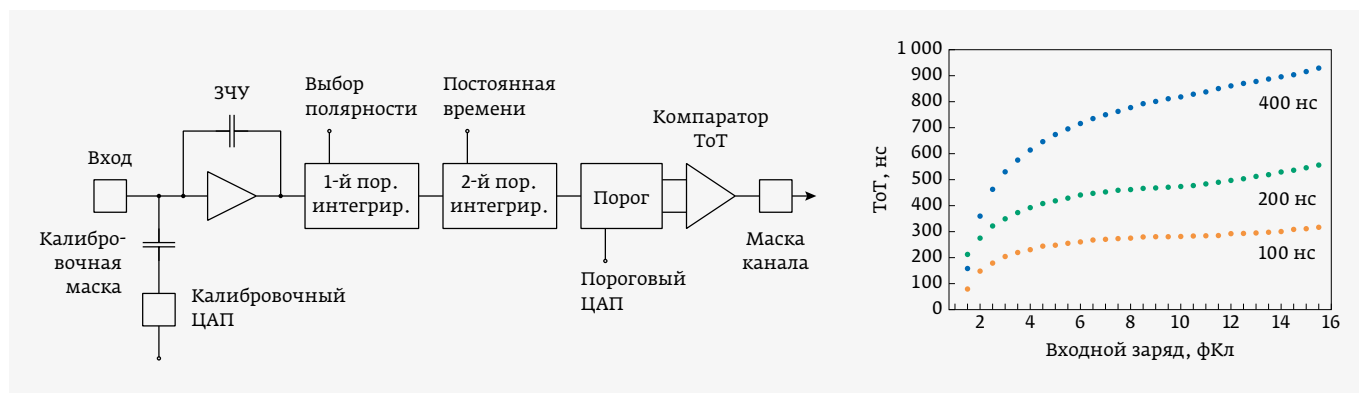


Рис. 24. Схема и характеристика преобразования СИМС АТОМ для разных времен шейпинга

реализован в СИМС АТОМ [8, 9], в котором используются два интегрирующих шейпера (рис. 24). Отношение «сигнал – шум» (ENC) СИМС АТОМ составляет для емкости детектора 33 пФ и времени формирования шейпера 100, 200 и 400 нс соответственно 1700, 1500 и 1250 электронов.

Для линейаризации характеристики преобразования был предложен динамический метод ToT, при котором пороговое значение компаратора изменяется во время преобразования [10]. Схема, сигналы на входах компаратора и характеристика преобразования динамического ToT приведены на рис. 25.

При каждом срабатывании компаратора одновибратор вырабатывает импульсы, которые увеличивают пороговое напряжение, используя R-C-цепь, сигнал которой компенсирует «логарифмическую компрессию» и линейризует характеристику, тем самым уменьшая ошибку.

Усложненный метод динамического ToT, названный мультипороговым [11], использует несколько динамических порогов, увеличивая динамический диапазон и линейность, однако, при попытках улучшить свойства АЦП ToT, указанный метод теряет главное свойство метода – простоту исполнения. В этом случае необходимо сравнивать реализацию ToT с другими типами АЦП.

В заключении раздела о ЦАП и АЦП перечислим основные подходы к проектированию этих блоков для электроники кремниевых детекторов:

- необходимо стремиться к минимизации разрядности, чтобы уменьшить потребляемую мощность и площадь на кристалле. Алгоритмы для обработки сигнала в большинстве случаев не требуют разрядности более 10, за исключением СИМС с большим динамическим диапазоном, однако при расчете разрядности АЦП полезно предусмотреть, чтобы младшие разряды позволяли оценить шум в канале;
- требования к линейности АЦП можно разумно снизить за счет калибровки;
- быстродействие и разрядность АЦП зависят от загрузки канала и времени цифровой обработки

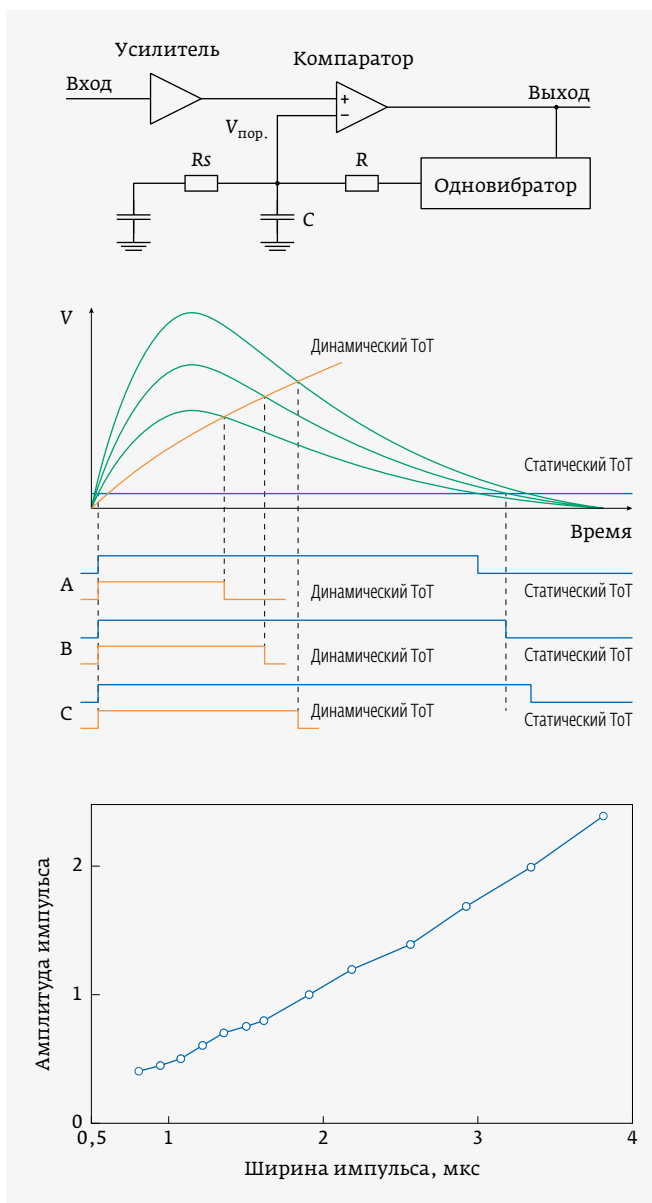


Рис. 25. Пояснение динамического метода ToT

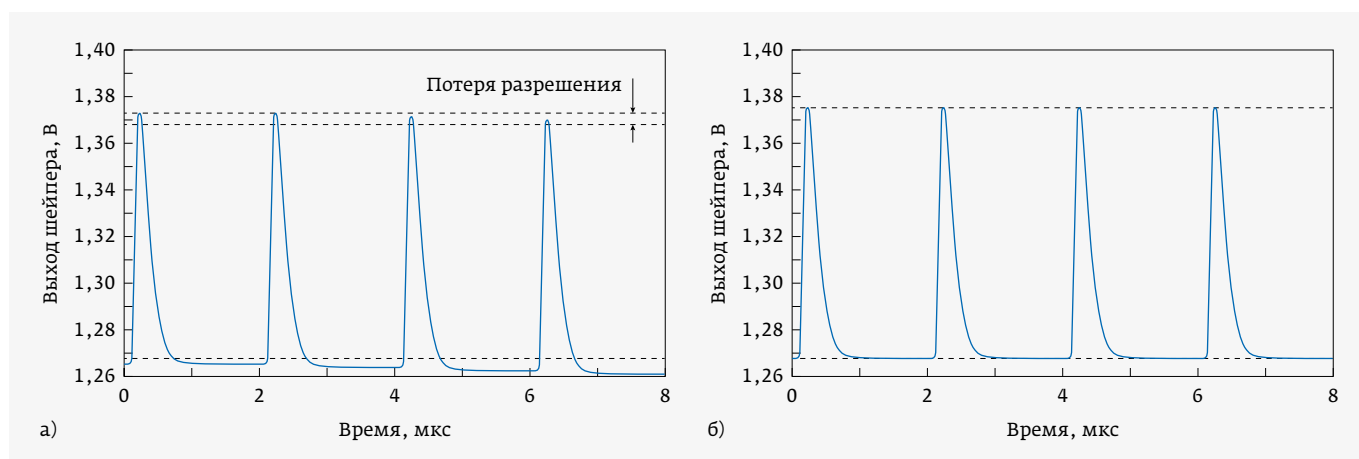


Рис. 26. Сигнал на выходе шейпера: а – до восстановления базовой линии, б – после восстановления базовой линии

сигналов. В общем случае, частота событий на входе канала в ближайшем будущем пока не предвидится более 50 МГц, поэтому для полноценной цифровой обработки можно ограничить быстродействие АЦП максимальным значением 500 МГц.

СТАБИЛИЗАТОРЫ (ВОССТАНОВИТЕЛИ) БАЗОВОЙ ЛИНИИ

Изменения базовой линии и наложение сигналов происходят из-за дрейфа постоянной составляющей под воздействием дестабилизирующих факторов. Такими факторами являются: использование связи по переменному току, случайное или регулярное появление сигналов на входе и удлиненный спад ЗЧУ. Пример – сигнал на выходе шейпера в начале регулярного поступления сигналов на вход (рис. 26а). Результат работы схемы восстановления приведен на рис. 26б.

Для считывающей электроники, предназначенной для работы с кремниевыми детекторами в экспериментах ФВЭ и ФКЛ, не характерно применение специальных мер для стабилизации и восстановления базовой линии или исключения наложений сигналов. Только в некоторых СИМС, например FSSR2, встроен восстановитель базовой линии, при этом имеется возможность его отключения. Это связано с несколькими факторами:

- возможностью снижения загрузки каналов за счет высокой гранулярности детектора и, как следствие, восстановлением базовой линии без применения схем ускоренного восстановления или ее стабилизации;
- повышением уровня шумов в канале для многих схем восстановления (20% для FSSR2);
- высоким быстродействием кремниевых детекторов (длительность импульса тока детектора не превышает 10–30 нс). В результате скажность сигнала тока велика ($\gg 1$), и, при использовании быстрого

шейпера с компенсацией полюса ЗЧУ, смещение базовой линии и вероятность наложения сигналов во многих случаях становятся пренебрежимо малы.

Схемы восстановления или стабилизации базовой линии применяются в том случае, если загрузки каналов приводят к ошибкам обработки сигналов. Например, для СИМС FSSR2 схема восстановления базовой линии включается только для измерительных каналов, расположенных близко к пучку, где загрузки каналов высоки, но не превышают допустимые.

В общем виде влияние смещения базовой линии и наложения сигналов различно для некоторых видов обработки сигналов: измерения амплитуды, обнаружения сигнала, измерения времени и некоторых других измерений. Случайные изменения базовой линии эквивалентны увеличению шумов.

В СИМС FSSR2 использован диодный аналоговый восстановитель базовой линии (рис. 27) [12]. Этот восстановитель базовой линии не зависит от вида шейпера (однополярный или биполярный). Постоянная времени восстановления $\tau \approx 2rC$, где C – переходная емкость; r – эквивалентное сопротивление транзистора в диодном включении, которое пропорционально петлевому коэффициенту усиления операционного усилителя. Смещение базовой линии Δu в зависимости от скажности входного сигнала $Q=1/f$ и падения напряжения на транзисторе u при токе I равно:

$$\Delta u = \frac{2uf}{1-f}.$$

Напряжение ОУ на его обоих входах примерно равно V_{ref} при отсутствии сигнала на входе. Если при поступлении сигнала на транзисторе напряжение изменяется на Δu , то ОУ регулирует напряжение на отрицательном входе, чтобы компенсировать разность напряжений на входах ОУ до ≈ 0 . При скажности Q , когда длительность

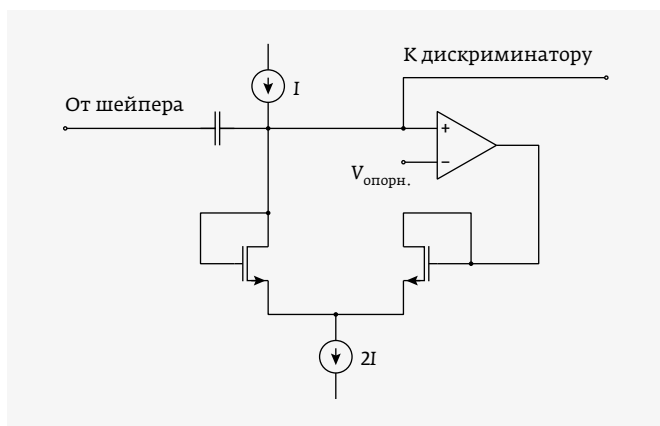


Рис. 27. Диодный аналоговый восстановитель базовой линии

импульса сравнима с постоянной времени восстановления τ , ошибка восстановления будет возрастать.

В последнее время в считывающей электронике начинают применяться эффективные цифровые способы восстановления или стабилизации базовой линии.

Один из способов цифрового восстановления базовой линии применен в СИМС SAMPA и его прототипе SAltro-16 [13] для газовых детекторов при модернизации электроники проектов БАК и проекта MPD (NICA).

Коррекция базовой линии в СИМС SAMPA осуществляется в два этапа: на первом этапе компенсируются медленные изменения базовой линии и регулярные искажения, на втором – случайные изменения базовой линии. Коррекция медленных искажений обеспечивается усреднением отсчетов АЦП вне временного окна, в котором производится обработка сигнала, и с приходом триггера полученное последнее значение базовой линии вычитается в пределах окна (рис. 28).

Медленный корректор базовой линии имеет также два блока памяти: в первом хранятся отсчеты регулярных искажений (рис. 29), во втором – пьедесталы.

Имея такой банк данных искажений полезного сигнала, можно осуществить несколько видов коррекции: постоянную коррекцию, коррекцию в определенные моменты

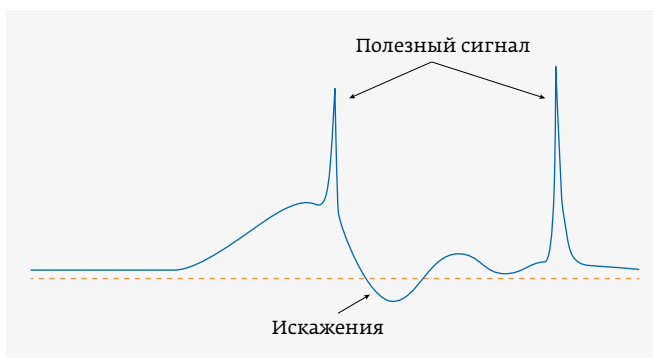


Рис. 29. Систематические искажения

времени и коррекцию, рассчитанную по имеющимся данным, в зависимости от количества выборок сигнала.

Случайные изменения базовой линии корректируются внутри временного окна обработки сигнала (рис. 30).

Выбросы сигнала исключаются из процедуры коррекции, остальные отсчеты усредняются по формуле:

$$y(n) = \frac{1}{M+1} \sum_{r=0}^M x(n-r), M=1,3,5,7,$$

где $y(n)$ – выход фильтра, M – количество усредняемых выборок, $x(n)$ – текущая выборка входного сигнала, $x(n-r)$ – предыдущие входные выборки.

Результат обработки показан на рис. 31.

Процедуры, заложенные в СИМС SAMPA, достаточно сложны и имеют несколько вариантов коррекции, для такой схемы следует ожидать повышенное потребление мощности. В предложенном алгоритме не используется итерационный метод; коррекция проводится в режиме реального времени.

Для систем с кремниевыми детекторами этот метод можно упростить, поскольку длительность сигнала тока детектора мала (порядка 20 нс) и не имеется серьезных искажений сигнала, показанных на рис. 31. В нашем случае достаточно применить усреднение и непрерывную медленную коррекцию совместно с коррекцией для случайного потока импульсов, исключив банк данных искажений и разнообразие видов обработки на первом этапе.

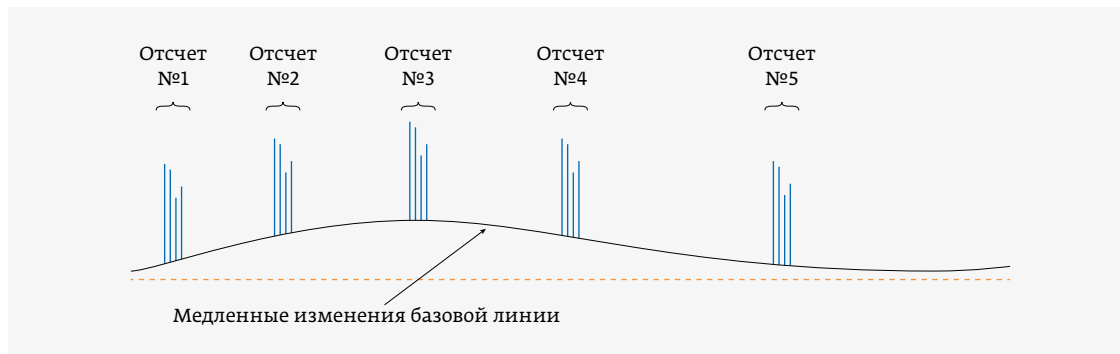


Рис. 28. Медленные изменения базовой линии и уровень (обозначен красным), к которому приводится базовая линия



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Акционерное общество
«Научно-производственное предприятие
«Электронное специальное
технологическое оборудование»

124460, г. Москва, Зеленоград,
Георгиевский проспект, д.5, стр.1
тел.: (499) 729-7751, факс: (499) 479-1239
info@nppesto.ru www.nppesto.ru

СИСТЕМА GROOVY ICP –
ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО
Для критического травления
диэлектриков на основе уникального
узкозазорного индуктивного плазменного
реактора для массового производства

Разработка АО «НПП «ЭСТО» при финансовой
поддержке Министерства промышленности
и торговли Российской Федерации

МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



Группа компаний ЭСТО более 20 лет производит оборудование
для микроэлектроники в собственном инженерно-производственном комплексе
метражом в 5000 кв.м в г. Зеленограде



Оборудование для лазерной микрообработки:
резка, фрезерование, скрайбирование,
прошивка отверстий



Оборудование
для термических процессов



Оборудование для измерения физических
и геометрических параметров



Высокоточное оборудование
для дисковой резки

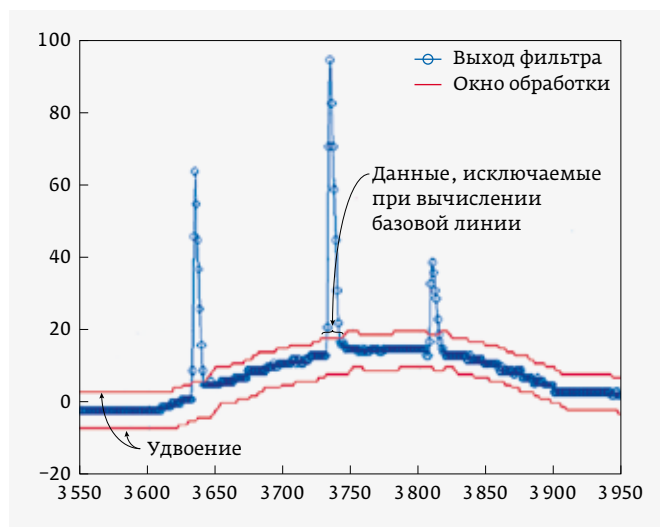


Рис. 30. Случайное изменение базовой линии

В статье рассмотрены основные аналого-цифровые блоки схем формирования и преобразования сигналов, подключаемые к выходам ЗЧУ и шейперам и формирующие измерительный канал кремниевых детекторов.

* * *

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 18-02-40047 мега.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Spierer H.** Semiconductor Detector Systems. John Wiley Oxford University Press, New York U.S.A., 2005.
2. **Воронин А.** Аналого-цифровое преобразование в измерительном канале с кремниевым детектором // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 4.
3. **Atkin E., Ivanov V., Ivanov P., Malankin E., Normanov D., Osipov D., Samsonov V., Shumikhin V., Voronin A.** Development of the read-out ASIC for muon chambers of the CBM experiment // JINST. 2015. V. 10.
4. **Atkin E., Malankin E., Shumikhin V., Samsonov V., Voronin A.** Development of the asynchronous readout ASIC for GEM detectors // 2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD), Strasbourg, 2016. PP. 1–5.
5. **Atkin E., Bulbakov I., Ivanov V., Ivanov P., Malankin E., Normanov D., Petrovskiy S., Shumikhin V., Voronin A., Samsonov V.** 32-channel self-triggered ASIC for GEM detectors 32-channel Self-triggered ASIC for GEM Detectors // 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL) Nis, 2017. PP. 225–228.
6. **Kasinski K.** M.Sc. PH. D. Thesis. Multichannel Integrated Circuits for Silicon Strip Detectors Readout with

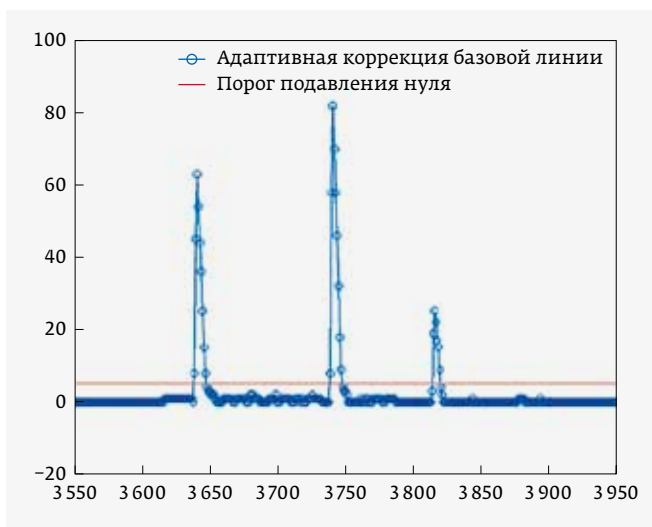


Рис. 31. Результат коррекции базовой линии для случайного потока импульсов

Timestamping and Amplitude Pulse Measurement // AGH University of Science and Technology.

7. **Calvo D., de Remigis P., Martoiu S., Rivetti A., Wheadon R.** TOPIX: The first prototype of pixel readout for PANDA experiment. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 596, 2008. PP. 96–99.
8. **Manfredi P. F., Ratti L., Roe N. A., Spezielli V.** Noise limits of AToM, a 128 channel CMOS readout chip in applications with room temperature high granularity detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 458, 2001. PP. 382–291.
9. **Manfredi P. F.** at al. Functional Characteristics and Radiation Tolerance of AToM, the Front-End Chip of BaBar Silicon Vertex Tracker // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1999. V. 46. No. 6. PP. 1865–1870.
10. **Shimazoe K., Takahashi H., Fujiwara T., Furumiya T., Ooi J., Kumazawa Y.** A New Dynamic Time over Threshold Method // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2009. PP. 1916–1918.
11. **Fujiwara T., Takahashi H., Shimazoe K., Shi B.** Multi-Level Time-Over-Threshold Method for Energy Resolving Multi-Channel Systems // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2010. V. 57. No. 5. PP. 2545–2548.
12. **Yarema R., Hoff J., Mekkaoui A., Manghisoni M., Re V., Manfredi P. F., Ratti L., Spezielli V., Chase R. L., Poulo L. R.** A high precision DC restorer. Fermilab Silicon Strip Readout Chip for BTeV // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1967. V. 14. No. 6. PP. 83–87.
13. **Aspell P., Santos H. F., Garcia E. G., de Gaspari M., Mager M., Musa L., Rehman A., Trampitsch G.** Description of the SAltro-16 chip for gas detector readout // CERN – European Organization for Nuclear Research LCD-Note-2011-024 CERN, Switzerland, July 27, 2010.

Кongress

СФЕРА

15
ИЮНЯ

2021

ЦВК «Экспоцентр»



www.glonass-forum.ru

Организатор
Форума



Генеральный партнёр
Форума



Стратегический партнёр
Форума



Экспертные партнёры
Форума



Организатор выставки
«Навитех-2021»/спонсор Форума



Оператор
Форума

