

Каскады обработки и преобразования сигналов в измерительных каналах с кремниевым детектором

Часть 1

А. Воронин, к. ф-м. н.¹

УДК 539.1.075 | ВАК 05.27.01

Блоки обработки и преобразования сигналов считывающей электроники (СЭ) кремниевых детекторов строятся, в большинстве случаев, на основе аналого-цифровых и аналоговых схем, к которым относятся аналоговые ключи, мультиплексоры, устройства аналоговой памяти, устройства выборки-хранения (УВХ), пиковые детекторы, АЦП, ЦАП, некоторые типы шейперов и др. Для таких блоков характерно, что каскады обработки или преобразования сигнала выполнены в аналоговом, а управляющие схемы – в цифровом виде. В статье рассмотрены способы построения и особенности реализации аналого-цифровых и аналоговых функциональных блоков считывающей электроники кремниевых детекторов в проектах физики высоких энергий и физики космических лучей.

АНАЛОГОВЫЕ КМОП-КЛЮЧИ И АНАЛОГОВЫЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ (КОММУТАТОРЫ)

Основными элементами аналого-цифровых блоков обработки сигналов кремниевых детекторов служат аналоговые ключи в совокупности с конденсаторами. Развитие МОП-технологии упростило создание качественных полупроводниковых ключей, поскольку транзисторы, применяемые в МОП-технологии, имеют канал с омическим сопротивлением (без учета паразитных емкостей). Сопротивление ключа является неким аналогом механического переключателя. В биполярном транзисторе в открытом состоянии образуется напряжение смещения за счет р-п-переходов. Этот эффект отсутствует в полевых транзисторах. Следовательно, МОП-транзистор лучше подходит для построения интегральных аналоговых ключей, которые в замкнутом состоянии являются активными резисторами. В настоящее время сопротивление каналов замкнутых ключей может составлять несколько Ом.

Аналоговый ключ может быть построен как на п-канальном, так и на р-канальном транзисторе. Однако сопротивление замкнутого ключа будет зависеть от напряжения затвор-исток. Поскольку напряжение на затворе не изменяется, то напряжение затвор-исток зависит от входного сигнала ключа, при этом сопротивление

замкнутого ключа меняется. Этот недостаток можно значительно уменьшить, применив аналоговый КМОП-ключ, который реализуется путем параллельного соединения одноименных выводов двух транзисторов разных полярностей: с каналом п-типа и каналом р-типа (транзисторы М3 и М4 на рис. 1).

Для повышения быстродействия переключения управляющий сигнал проходит через драйвер, который создает квази-дифференциальную пару цифровых управляющих сигналов с короткими фронтами (СИМС НУКЛОН). На рис. 2 приведена зависимость сопротивления

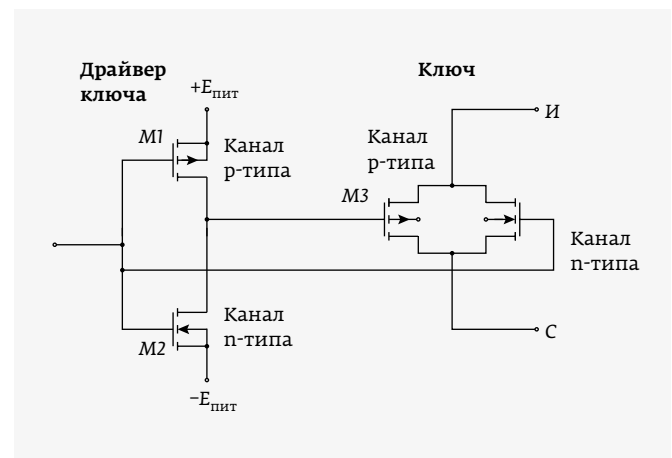


Рис. 1. Аналоговый КМОП-ключ

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

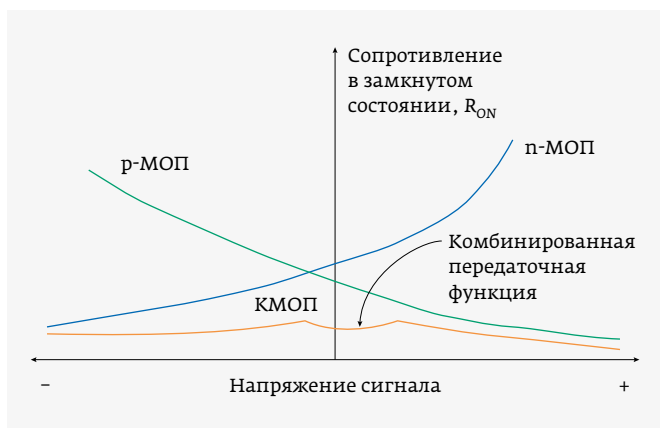


Рис. 2. Зависимость сопротивления замкнутых ключей трех типов от напряжения входного сигнала

замкнутых ключей разных типов от напряжения входного сигнала. Поскольку на затворы ключа поступают цифровые импульсы, то напряжение на них фиксировано, а напряжение затвор-исток меняется в зависимости от уровня аналогового сигнала для всех трех типов ключей (р-, n-, КМОП). Следовательно изменяется сопротивление замкнутого канала $R_{он}$. Как показано на рис. 2, минимальные вариации сопротивления замкнутого канала $R_{он}$ характерны для КМОП-ключа [1]. КМОП-ключи, аналогичные схеме на рис. 1, применены в СИМС проектов НУКЛОН, АТИК, СВД-2 и др.

Эквивалентная схема с учетом элементов транзисторов и паразитных элементов для двух соседних КМОП-ключей (рис. 3) сложнее, чем схема на рис. 1. Будем считать, что схема находится в момент переключения: верхний ключ замкнут и размыкается, а нижний разомкнут и замыкается (показано стрелками). Сопротивление источников входных аналоговых сигналов близко к нулю ($R_{ген} \approx 0$), нагрузки каналов одинаковы. Соответственно, паразитная емкость $C_{и-и}$ между истоками I_1 и I_2 , емкости истоков $C_{и1}$ и $C_{и2}$, а также токи утечки истоков $-I_{утеч}$ и $+I_{утеч}$ зашунтированы. Для современных технологий токи утечки $-I_{утеч}$ и $+I_{утеч}$ крайне малы, но для прецизионных ключей они могут сыграть негативную роль.

Чтобы лучше понять принцип работы КМОП-ключа, обсудим коэффициент передачи схемы с приведенными ограничениями ($R_{ген} \approx 0$). Сначала рассмотрим замкнутый верхний ключ. Обозначим полное проходное

сопротивление через $Z_{к1ON}$, которое в операторной форме равно:

$$Z_{к1ON} = R_{к1ON} / (1 + sR_{к1ON} C_{ст-и1}), \tag{1}$$

где $R_{к1ON}$ – сопротивление замкнутого ключа и параллельная ему емкость $C_{ст-и1}$.

Нагрузка ключа $Z_{нагр}$:

$$Z_{нагр} \approx \left(\frac{R_{нагр} R_{к1ON}}{R_{к1ON} + R_{нагр}} \right) \times \frac{1}{\left(s \frac{R_{к1ON} R_{нагр}}{R_{к1ON} + R_{нагр}} (C_{ст1} + C_{нагр} + C_{ст-ст} + C_{ст-и1}) + 1 \right)}, \tag{2}$$

где $C_{нагр}$ – емкость нагрузки, $C_{ст1}$ – емкость стока первого ключа, $C_{ст-ст}$ – паразитная емкость между стоками, когда первый и второй ключи замкнуты. Если второй нижний ключ разомкнут, то $C_{ст-ст}$ следует приравнять нулю и добавить параллельно к $Z_{нагр}$ (2) соединение Z_1 :

$$Z_1 = 1 / sC_{ст-ст} + R_{нагр2} / (1 + sR_{нагр2} (C_{нагр2} + C_{ст-и2})). \tag{3}$$

Сопротивление нагрузки $Z_{2нагр}$ в этом случае равно:

$$Z_{2нагр} = (Z_{нагр} Z_1) / (Z_{нагр} + Z_1), C_{ст-ст} = 0.$$

Индекс «2» означает элементы цепи нижнего ключа. Принимая во внимание [1], коэффициент передачи можно выразить, как $Z_{нагр} / Z_{к1ON}$, или $Z_{2нагр} / Z_{к1ON}$.

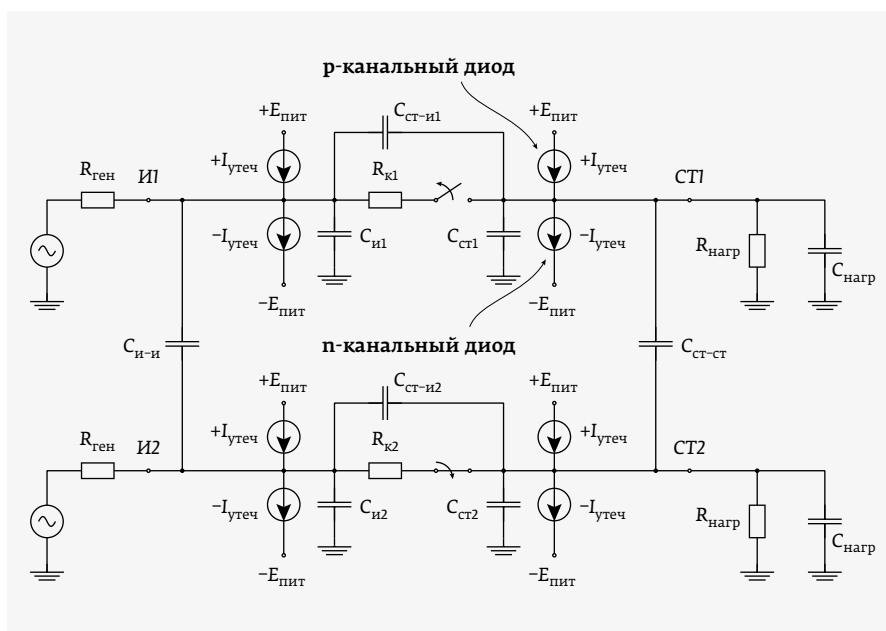


Рис. 3. Эквивалентная схема двух соседних аналоговых КМОП-ключей

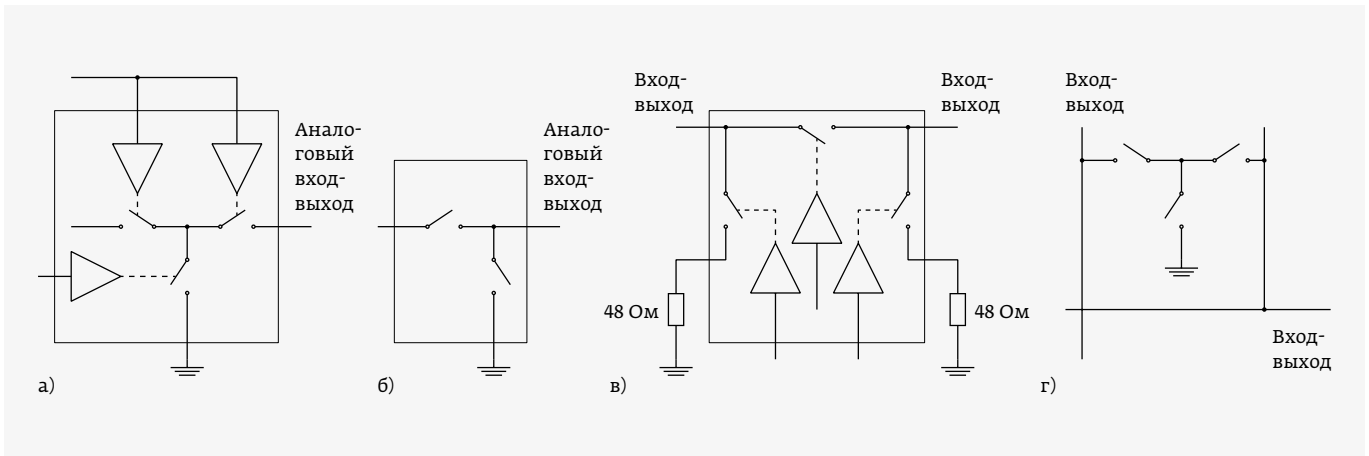


Рис. 4. Структуры аналоговых ключей: а - Т-ключ, б - L (Г)-ключ, в - п (П)-ключ, г - матричный ключ

Коэффициент передачи замкнутого ключа в операторной форме равен:

$$K_{ON}(s) = Z_{нагр} / Z_{к1ON},$$

$$K_{ON}(s) \approx \left(\frac{R_{нагр}}{R_{к1ON} + R_{нагр}} \right) + \frac{1 + sR_{к1ON}C_{ст-и1}}{\left(s \frac{R_{к1ON}R_{нагр}}{R_{к1ON} + R_{нагр}} (C_{ст1} + C_{нагр} + C_{ст-ст} + C_{ст-и1}) + 1 \right)}, \quad (4)$$

или $K_{ON}(s) = Z_{нагр} / Z_{к1ON}$ (при разомкнутом втором (нижнем) ключе).

Для разомкнутого нижнего ключа, исключая $R_{к12}$, коэффициент передачи $K_{OFF}(s)$ равен:

$$K_{OFF}(s) \approx \frac{sR_{нагр}C_{ст-и1}}{\left(sR_{нагр}(C_{ст1} + C_{нагр} + C_{ст-ст} + C_{ст-и1}) + 1 \right)}. \quad (5)$$

Выражение (4) для коэффициента передачи замкнутого ключа $K_{ON}(s)$ представляет собой разновидность коэффициентов передачи, описывающих фильтр нижних частот, а выражение (5) для коэффициента передачи разомкнутого ключа – фильтр верхних частот. Это означает, что для того, чтобы получить на выходе ключа неискаженный сигнал, кроме выбора типа ключа, необходимо его согласование с нагрузкой и генератором.

Если генератор имеет ненулевое сопротивление $Z_{ген}$, тогда (1) усложняется. Разновидностей блоков, являющихся генераторами для ключа и их выходных сопротивлений $Z_{ген}$, достаточно много. Сопротивление $Z_{ген}$ для разных схем может находиться в пределах от долей Ома до нескольких МОм. На рис. 3 показано наиболее распространенное применение активного сопротивления $R_{ген}$. Учитывая емкость истока $C_{и1}$ и паразитную емкость $C_{и-и}$,

получим на входе ключа фильтр низких частот, и $Z_{ген1}$ будет равно:

$$Z_{ген1} \approx 1 / (sR_{ген}(C_{и1} + C_{и-и}) + 1). \quad (6)$$

Для цепи $C_{и-и}$ полное сопротивление $Z_{и-и}$ можно записать в виде:

$$Z_{и-и(3)} \approx 1 / (sC_{и-и} + R_{ген2}). \quad (7)$$

Тогда сопротивление входа $Z_{вх}$ равно:

$$Z_{вх} \approx R_{к1ON} / (1 + sR_{к1ON}C_{ст-и1}) + 1 / (sC_{и-и} + R_{ген2}) + 1 / (sC_{и1}). \quad (8)$$

Для получения $K(s)$ с комплексным сопротивлением генератора входного напряжения, используя (6), (7), (8), получим: $K(s) = Z_{нагр} / Z_{вх}$, где $Z_{нагр}$ – суммарное сопротивление нагрузки ключа.

Структуры ключей могут быть дополнены вспомогательными ключами [2] для создания различных вариантов переключающих схем (рис. 4), а также улучшения ряда параметров: уменьшения токов утечки, нечувствительности к изменению нагрузки и к влиянию паразитных элементов основного ключа.

Мультиплексор представляет собой набор ключей с объединенными стоками со схемой управления (рис. 5).

Проходные емкости $C_{ст-и1}$, $C_{ст-и2}$, $C_{и-и}$ создают на выходе перекрестные помехи (см. рис. 5). Перекрестные помехи (пьедестал) возникают также в момент переключения ключей через емкость цепи «сток-затвор» и зависят от быстроедействия переключения (длительности фронта).

На базе мультиплексоров и ключей строят аналоговую память или некоторые виды шейперов с различной структурой ключей и емкостей, а также ЦАП, АЦП и другие блоки.

Осциллограф-мультиметр **Fluke**
Keysight Память Канал Джиттер
Осциллограмма Информация
ГГц Цифровой осциллограф **R&S**
LeCroy Выборка
ЧАСТОТА WaveScan Гбит
Передача Полоса пропускания Сигнал I²C
синхронизация CAN Анализ ИЗМЕРЕНИЯ 12 БИТ
ОСЦИЛЛОГРАФ
Мом Скорость нарастания **Tektronix**
ОБНОВЛЕНИЯ ЭКРАНА **TriggerScan** Дискретизация
Напряжение SPI развертка
Спектр Портативный осциллограф
Metrix Разрешение **GW Instek**
USB-осциллограф
Данные **АКИП** Уровень МГц
50 Ом

PRIST.RU PRIST.RU PRIST.RU PRIST.RU PRIST.RU



119071, г. Москва, 2-й Донской пр., д. 10, стр. 4; тел.: +7 (495) 777-5591; факс: +7 (495) 640-3023
196006, г. Санкт-Петербург, ул. Цветочная, д. 18, лит. В, офис 202; тел./факс: +7 (812) 677-7508
620089, г. Екатеринбург, ул. Цвиллинга, д. 58, офис 1; тел./факс: +7 (343) 317-3999; ek@prist.ru

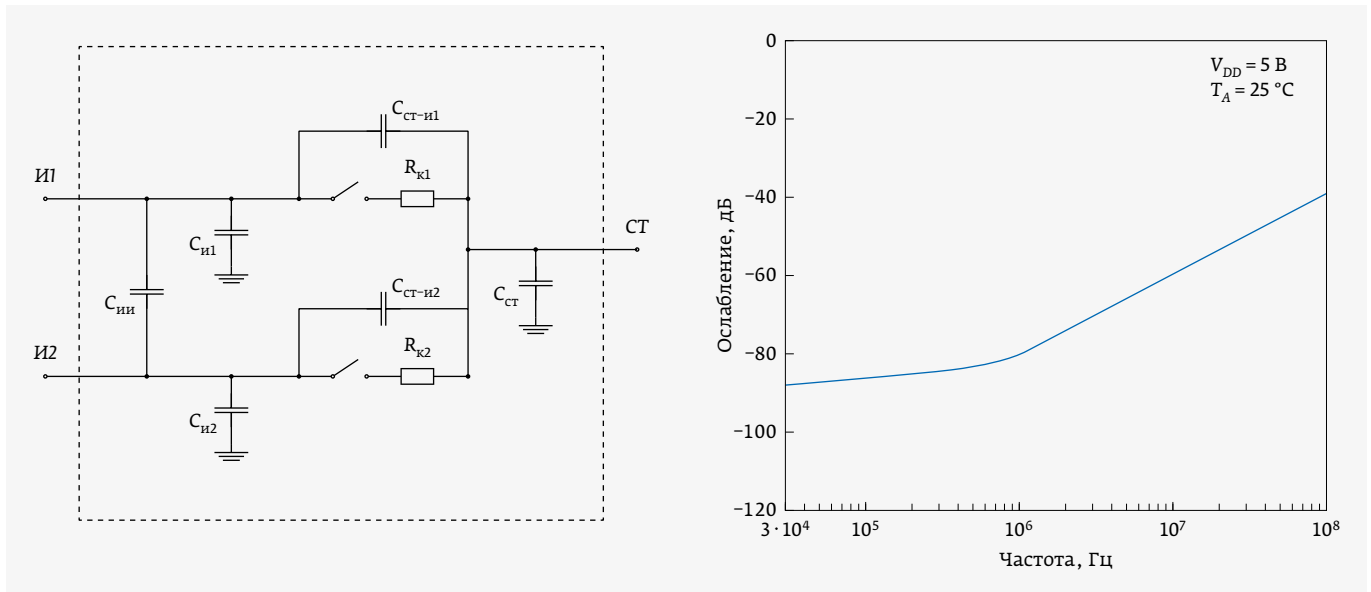


Рис. 5. Эквивалентная схема для двух каналов мультиплексора и зависимость перекрестной помехи от частоты микросхемы ADG708 (Analog Device)

АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ АНАЛОГОВОЙ ПАМЯТИ

Аналоговая память, как один из видов аналого-цифровых схем для считывающей электроники, широко используется в СИМС (VA, n-XYTER, CR-1, APV 25, НУКЛОН, ZEUS) и может быть разделена на два вида: однокаскадную и многокаскадную память.

Одним из простых блоков аналоговой памяти с ключом и конденсатором является схема, известная как «устройство выборки-хранения» (УВХ) (рис. 6).

УВХ применяется практически во всех проектах физики высоких энергий и физики космических лучей (ФВЭ и ФКЛ): СВД-2, НУКЛОН многих других. Однокаскадная память УВХ используется, в основном, для хранения амплитудного значения сигнала. Если задержка между приходом триггера и максимумом сигнала достаточно стабильна, то введение такой задержки между триггером

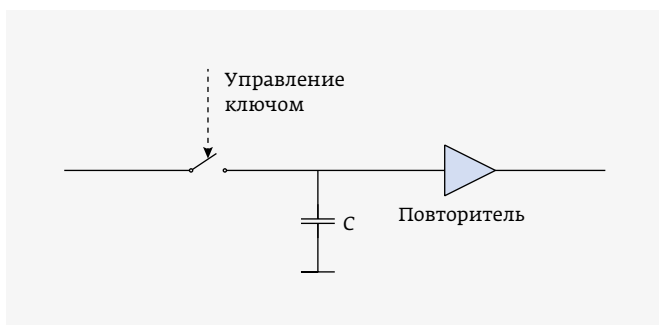


Рис. 6. Однокаскадный элемент аналоговой памяти (УВХ)

и срабатыванием ключа позволяет держать на конденсаторе напряжение, близкое к значению амплитуды входного импульса.

Запоминающая емкость в СИМС имеет значение от 10 фФ до нескольких пикофарад. Малое значение емкости позволяет перезаряжать конденсатор С за короткое время, порядка 1 нс и менее. Управление ключом может осуществляться в двух режимах: «запись-хранение» (track&hold) и «выборка-хранение» (sample&hold). В первом режиме нормально ключ замкнут, и форма сигнала на емкости повторяет форму сигнала на входе схемы. При размыкании ключа на емкости остается значение напряжения, существующее в момент переключения.

Во втором режиме на затвор ключа подается короткий импульс и производится выборка аналогового сигнала, которая хранится до прихода следующего импульса. Разряд конденсатора $\Delta U_{утеч}$ за время Δt определяется здесь токами утечки $I_{утеч\Sigma}$ повторителя и ключа:
$$\Delta U_{утеч\Sigma} = \frac{I_{утеч\Sigma} \Delta t}{C}$$
, и при токе утечки 10 фА $\Delta U_{утеч\Sigma}$ не превышает 0,1% за 1 с.

Значение записанного в память напряжения содержит три составляющие: амплитудное значение сигнала, мгновенный уровень базовой линии предыдущего каскада и пьедестал (паразитный сигнал), возникающий в канале ключа от воздействия управляющего импульса. Влияние управляющего сигнала на поведение ключа иллюстрируется осциллограммой (рис. 7). Шум УВХ в общем виде в шумовой полосе $1/4RC$ равен $e_{ш} = (kT/C)^{1/2}$, где С – запоминающая емкость, R – активное эквивалентное сопротивление каскада.



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104

объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1М, K52-1БМ, K52-1Б, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1А, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31, K58-32, K58-33

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов МИК, МИЧ, ИТИ

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001



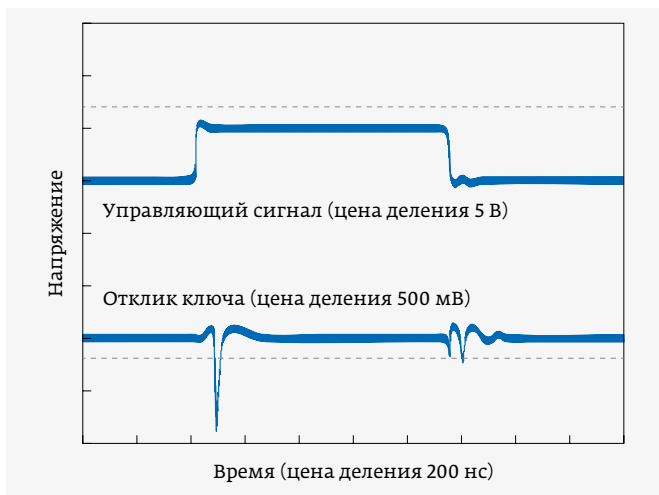


Рис. 7. Отклик ключа на управляющий сигнал

Многокаскадная аналоговая память применяется в СИМС (n-ХУТЕР, APV 25, СИМСы проекта ZEUS) для буферизации отсчетов сигнала при некоторых видах обработки (свертка и др.). Вычитание суммарного пьедестала

может осуществляться в режиме реального времени (SVX4, SAMPA), а также при пост-обработке. Для этого осуществляется набор статистики значений пьедесталов при отсутствии сигнала и определяется усредненное значение пьедестала для его последующей коррекции (проект СВД-2).

Наиболее часто используется последовательное соединение каскадов памяти – пайплайн (pipe-line).

Примерами многокаскадных микросхем аналоговой памяти могут служить СИМС PIPE-LINE (пайплайн) и СИМС BUFFER-MULTIPLEXOR (буфер-мультиплексор) проекта ZEUS (HES) (рис. 8) [3, 4]. СИМС PIPE-LINE содержит четыре канала по 58 каскадов ячеек памяти в каждом. До прихода сигнала «запись» (WR) в ячейки памяти последовательно записываются отсчеты входного сигнала с частотой 10 МГц. При переходе в режим «чтение» (RD) на выход поступают четыре отсчета, а затем СИМС снова переводится в режим непрерывной записи (WR). Эти четыре отсчета переписываются в последовательную память (сдвиговый регистр на рис. 8) в СИМС BUFFER-MULTIPLEXOR. В этой СИМС имеется буферная аналоговая память на одно дополнительное событие, то есть один канал может хранить информацию о двух

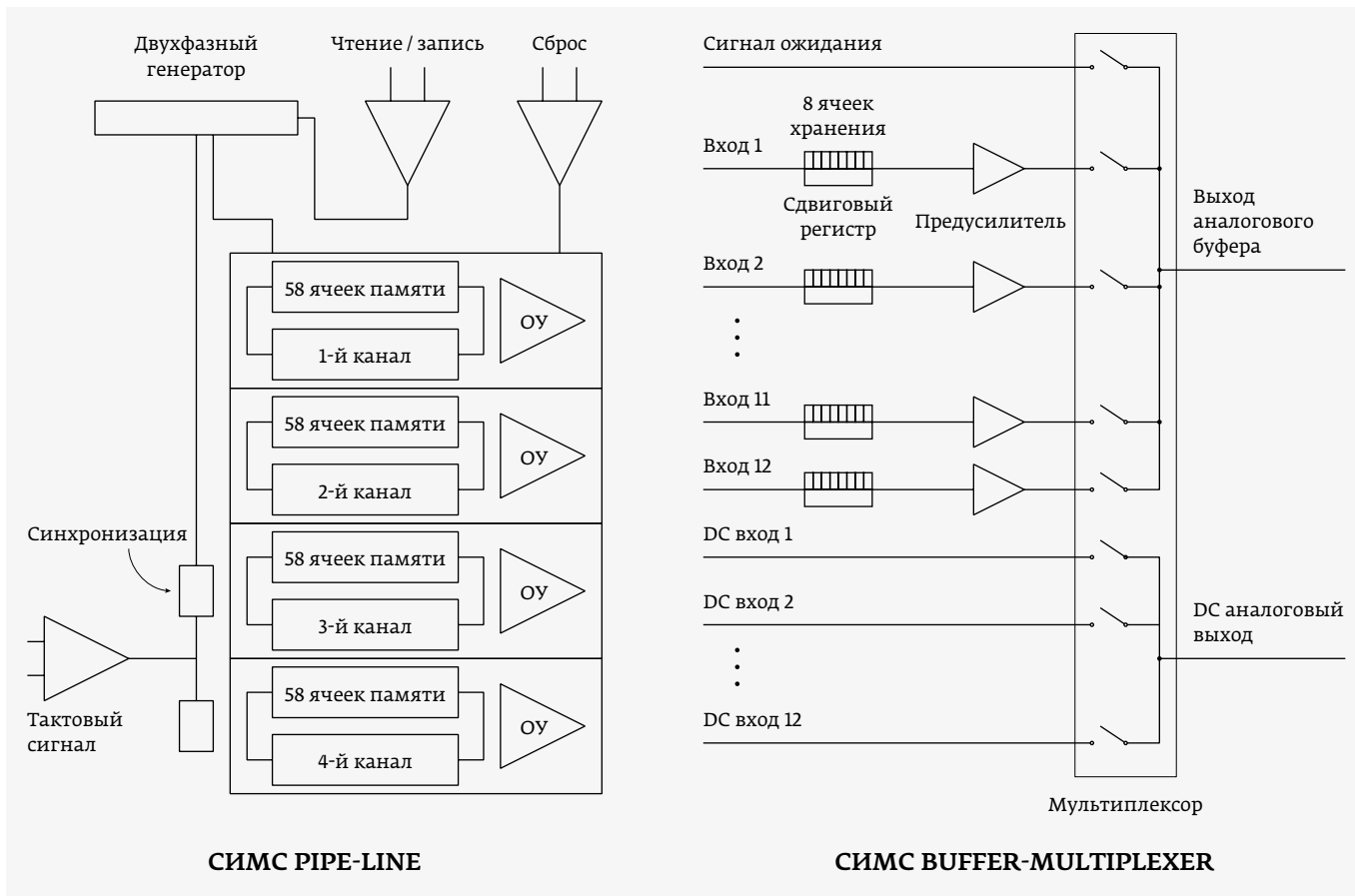


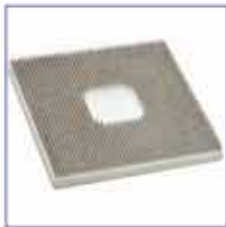
Рис. 8. Аналоговые части проекта ZEUS (HES): пайплайн (СИМС PIPE-LINE) и буфер-мультиплексор (СИМС BUFFER-MULTIPLEXER)

ЙОШКАР-ОЛА, РЕСПУБЛИКА МАРИЙ ЭЛ

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ»



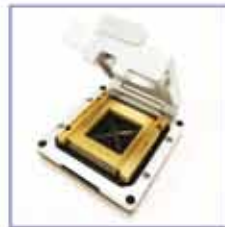
Выводные рамки



Металлокерамические
корпуса



Нагревательные
элементы



Контактные
устройства



Графитовая
оснастка



Оптоэлектронные
корпуса



424003, Россия, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26
Тел.: +7-8362-45-70-09, 45-67-68.
info@zpp12.ru marketing@zpp12.ru

zpp12.ru

событиях. К одной СИМС BUFFER-MULTIPLEXOR подключены соответственно четыре СИМС PIPE-LINE. Затем выходы двенадцати каналов СИМС BUFFER-MULTIPLEXOR коммутируются на один выход микросхемы. По четырем выборкам каждого канала PIPE-LINE восстанавливается амплитуда сигнала в каждом измерительном канале, который подключен к кремниевому детектору.

Вторым примером применения трех видов блоков служит СИМС APV25 [5] проекта LHC (рис. 9): пайплайн, мультиплексоры и дополнительный фильтр (аналоговый формирователь-процессор).

Применение ячеек аналоговой памяти и операционного усилителя (ОУ) позволило реализовать в СИМС APV25 дополнительный блок (шейпер) или процессор аналоговой обработки [6], реализация которого основана на теории фильтров с переключаемыми конденсаторами. Как известно, во временной области отклик фильтра $y(t)$ представляет собой свертку сигнала $s(t) = s(\tau)$ с импульсной характеристикой фильтра $h(t - \tau)$:

$$y(t) = \int_{-\infty}^t s(\tau)h(t-\tau)d\tau.$$

Поскольку при использовании переключаемых конденсаторов производится дискретизация сигнала во времени, то отсчеты сигнала на выходе фильтра можно представить как матрицу: $\mathbf{Y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}$. Следует отметить, что фильтр (шейпер) в считывающих системах для кремниевых детекторов не только обеспечивает фильтрацию шумов, но и пропускную способность измерительного канала. Исходя из загрузки канала длительность импульсов не должна превышать некоторой величины, в противном случае наложения не позволят измерять требуемые параметры импульсов. Зная параметры входного импульса и желаемые параметры выходного, требуется найти соответствующую им импульсную характеристику фильтра. Проверкой, выбранной \mathbf{H} , является обратная операция: $\mathbf{X} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{Y}$, где весовая функция $\mathbf{W} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{H}$. Для аналога CR-RC-фильтра первого порядка можно упростить процедуру фильтрации, используя только три ненулевых весовых коэффициента w_1, w_2, w_3 для трех выборок сигналов y_k, y_{k-1}, y_{k-2} : $X_k = w_1 y_k + w_2 y_{k-1} + w_3 y_{k-2}$.

Это означает, что фильтр должен суммировать три взвешенных отсчета в одном такте преобразования.

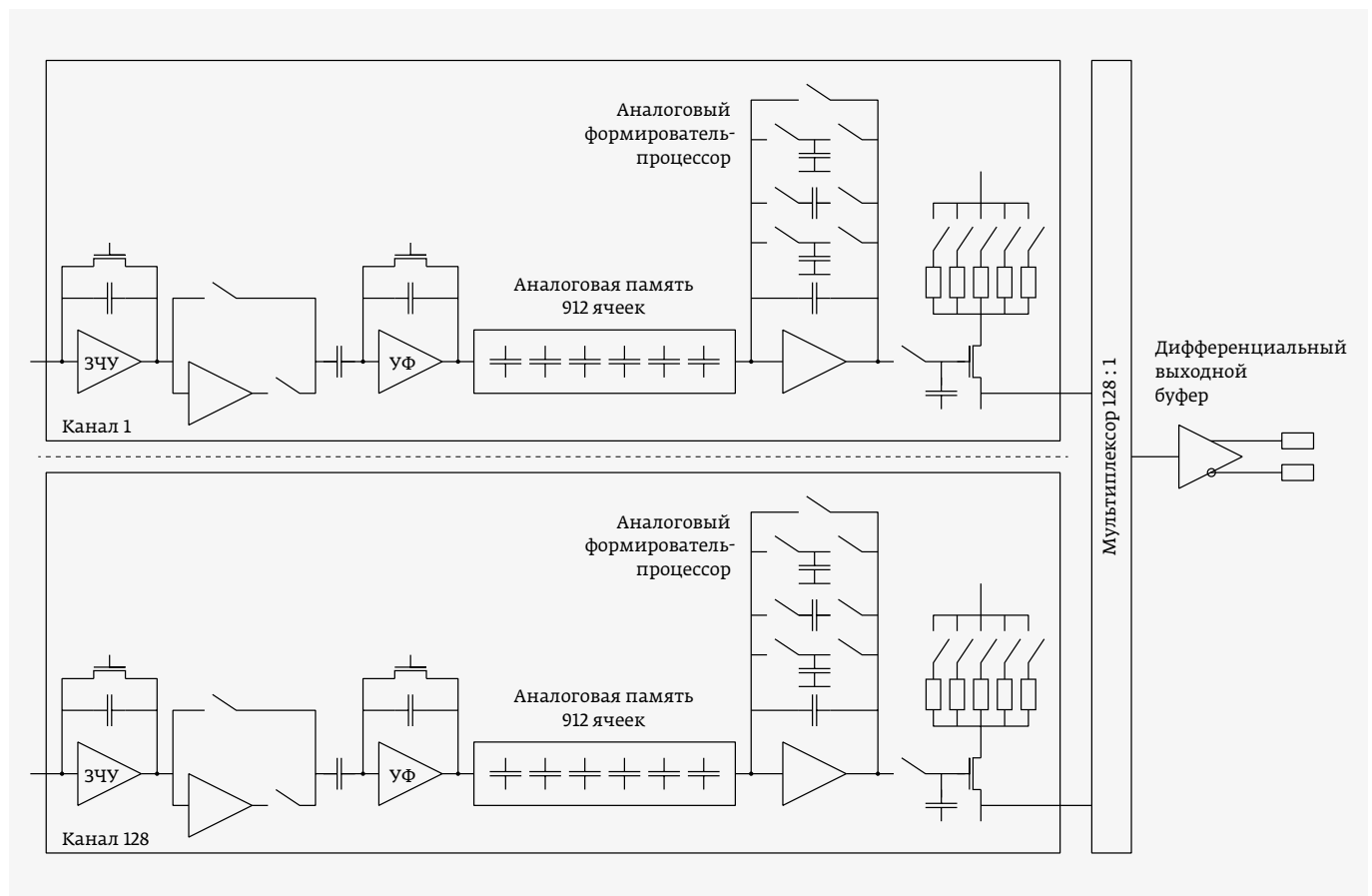


Рис. 9. Реализация пайплайн, мультиплексора и процессора на переключаемых конденсаторах с использованием операции свертки

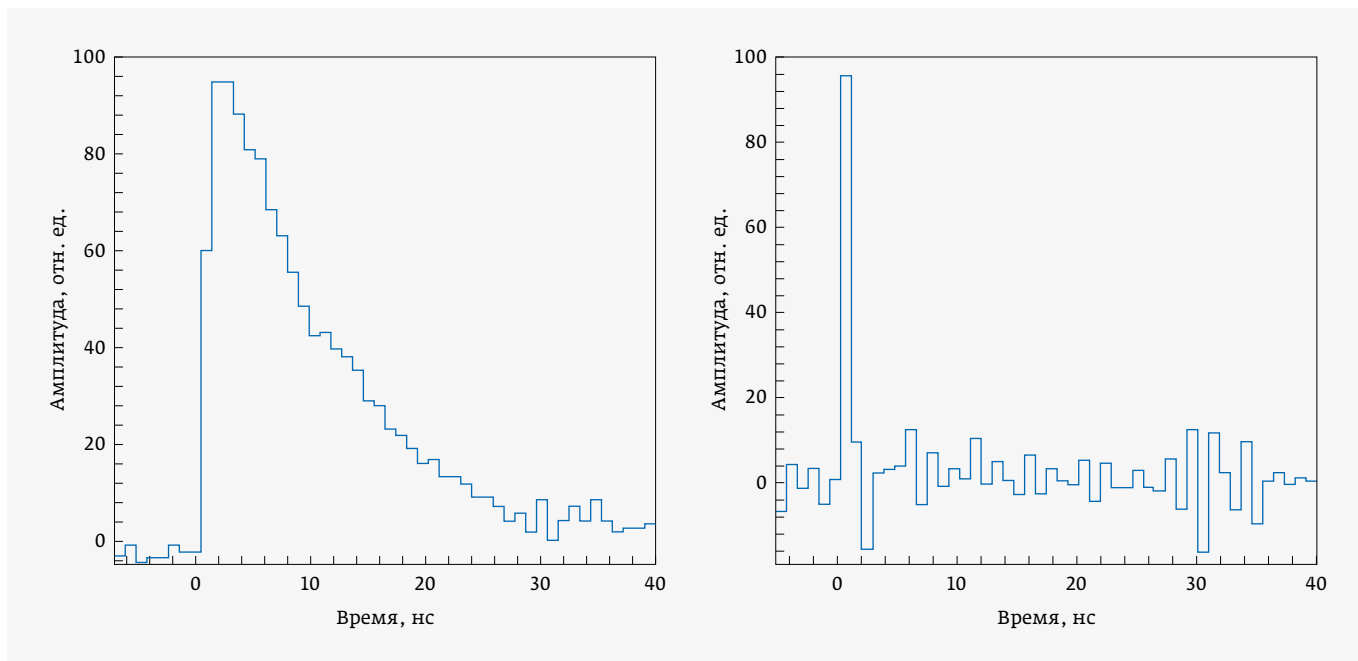


Рис. 10. Результат обработки аналоговых отсчетов в канале со сверткой: слева – форма импульсов на выходе аналоговой памяти; справа – форма импульсов на выходе фильтра

Реализация в цепи обратной связи линейного элемента обратной функции x_k создает на выходе этого элемента дискретизированную во времени импульсную функцию фильтра $y(t)$. Весовые коэффициенты фильтра определяются величинами конденсаторов C_{w1} , C_{w2} , C_{w3} . Первый отсчет сигнала заряжает C_{w1} , второй отсчет – C_{w2} , третий – C_{w3} . Затем все три взвешенных отсчета суммируются на конденсаторе C_1 . При помощи дополнительного ключа осуществляется быстрый разряд конденсаторов. На рис. 9 конденсаторы нумеруются сверху вниз: C_{w1} , C_{w2} , C_{w3} , C_1 .

На рис. 10 показан результат обработки аналоговых сигналов зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) в канале до фильтра и на выходе фильтра.

Цифровые схемы управления на рис. 8 и 9 не показаны, поскольку построены по стандартным схемам формирования тактовых частот.

Матричная реализация аналоговой памяти нашла широкое применение в АЦП, ЦАП и также применяется в переключающихся схемах блоков каналов [7].

ПИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Пиковые детекторы (ПД), используемые в СЭ для кремниевых детекторов, автоматически определяют максимум сигнала, в отличие от блоков аналоговой памяти, которые могут хранить информацию о любых выборках напряжений, присутствующих в аналоговых сигналах. ПД может быть реализован в аналоговом или аналого-цифровом

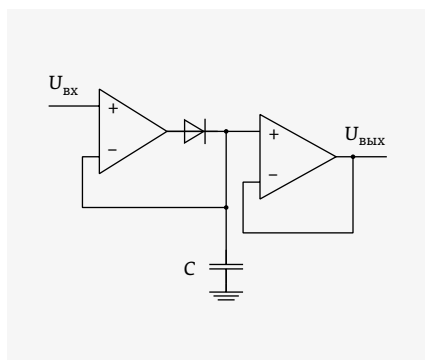


Рис. 11. Аналоговый диодный пиковый детектор

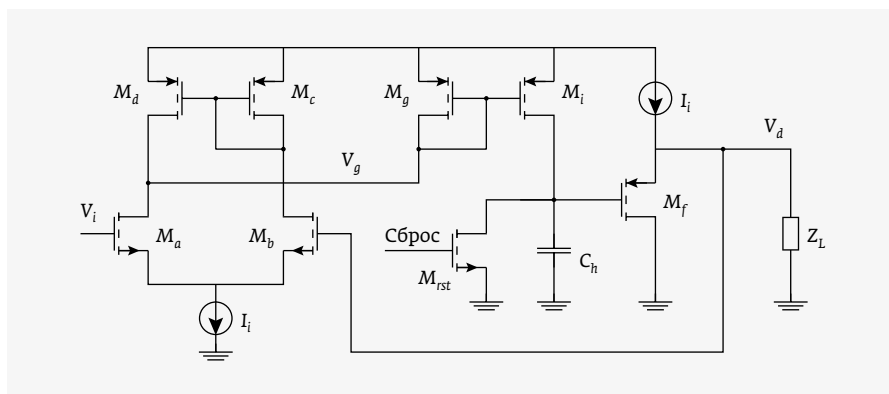


Рис. 12. Аналоговый пиковый детектор на МОП-транзисторах

виде. В аналоговом ПД вместо ключа используется диод (рис. 11).

В СИМС обычно применяется диод на МОП-транзисторе (рис. 12). Транзисторы M_a, M_b, M_c, M_d образуют дифференциальный каскад. Диод заменен на транзистор M_i , к стоку M_i подключен запоминающий конденсатор C_h . После того, как напряжение на C_h достигнет максимума, полярность разности сигналов на входах усилителя поменяет знак и M_i будет закрыт. В схеме на рис. 12: M_f – буферный каскад; M_{rst} – разрядный ключ; M_g – служит для повышения устойчивости схемы [8].

Недостатками однотактного пикового детектора можно считать наличие пьедестала и других источников погрешностей при детектировании. В проекте BNL применен двухтактный пиковый детектор [8], в котором процесс детектирования разбит на две стадии: «запись» и «чтение». В обоих режимах используется один и тот же усилитель, что позволяет уменьшить величину пьедестала (рис. 13). В режиме «запись» на емкости C_h запоминается напряжение смещения ОУ. В режиме «чтение» на C_h запоминается входной сигнал. При этом напряжение смещения вычитается, корректируя выходное напряжение до правильного значения.

Бросок напряжения на затворе M_i (как и в предыдущей схеме на рис. 12) используется для переключения режимов «запись» – «чтение» (рис. 14). Ошибка детектирования $V_0 - V_{ip}$ (V_0 – выходное напряжение, V_{ip} – максимум

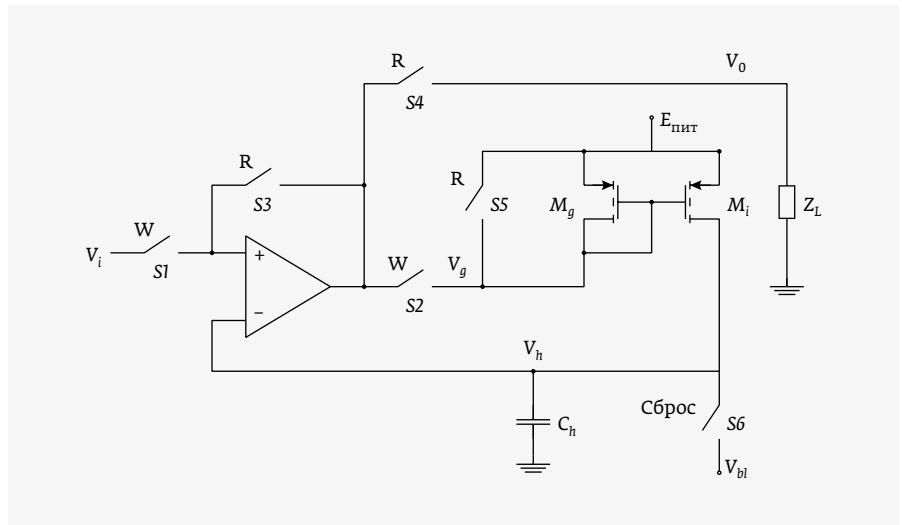


Рис. 13. Схема двухтактного пикового детектора

входного сигнала, K_0 – петлевое усиление) соответствует выражению: $V_0 - V_{ip} \approx (V_{gp} - V_{ip}) / K_0$.

По аналогичной схеме разработан детектор для опытного образца интегральной схемы [9] для обработки нерегулярного по времени потока данных (рис. 15).

Цифровые пиковые детекторы

Цифровая реализация пикового детектора применена в СИМС STS-XYTER [10]. Схема пикового детектора (рис. 16) основана на применении статического параллельного регистра на RS-триггерах и параллельного АЦП, выходной код которого является термометрическим, то есть напоминает работу термометра. При отсутствии высокого уровня напряжения шума, при растущем на протяжении импульса срабатывают компараторы, начиная с младшего разряда, при этом код из АЦП переносится

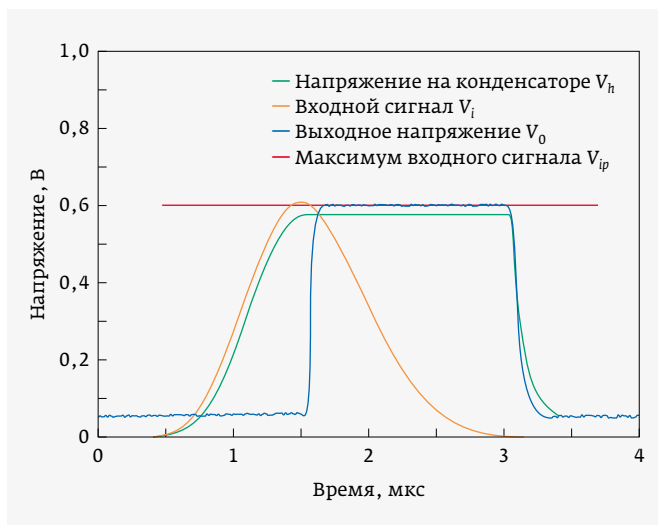


Рис. 14. Эпюры сигналов пикового детектора с двойным тактированием

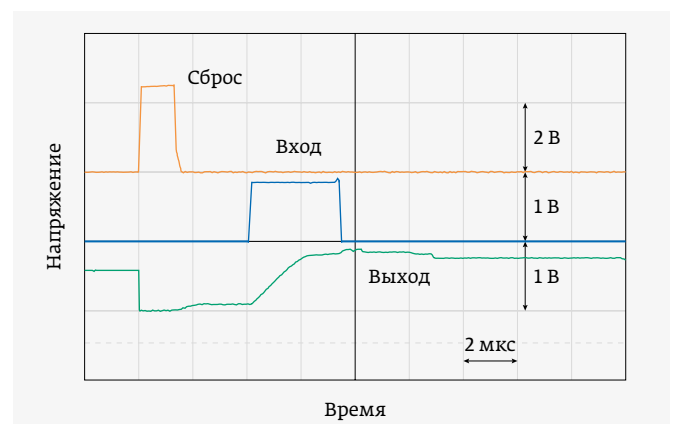


Рис. 15. Осциллограмма сигналов пикового детектора микросхемы для обработки нерегулярного по времени потока данных



ИНТЕЛЛЕКТ. КАЧЕСТВО.

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»
Москва, Щелковское шоссе, д.5, стр.1
Тел. (499) 644-21-03, (499) 644-25-62
(многоканальный)
Факс +7(499) 644-19-70
E-mail: mwsystems@mwsystems.ru
www.mwsystems.ru

- СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ
- ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО
- ПОЛНЫЙ СПЕКТР УСЛУГ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРОИЗВОДСТВУ МОНОЛИТНЫХ И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА (0,3 - 22 ГГц)

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»



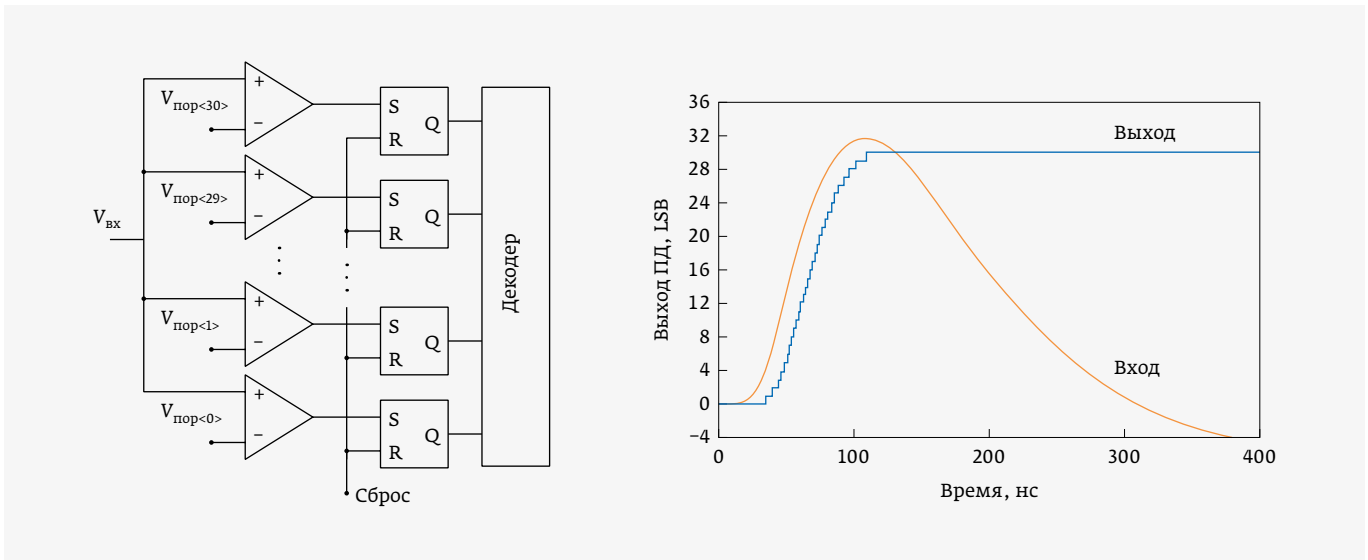


Рис. 16. Схема и сигналы цифрового пикового детектора СИМС STS-ХУТЕР

в RS-регистр. Когда уровень напряжения начинает снижаться, в регистре остается максимальное число, и код уже не переносится в RS-регистр, поскольку каждый разряд регистра имеет только вход S. Таким образом, в регистр записывается код, соответствующий максимуму импульса.

Далее код максимума преобразуется в бинарный код либо другие виды кодов. После перезаписи кода производится сброс регистра. Недостатками такой схемы

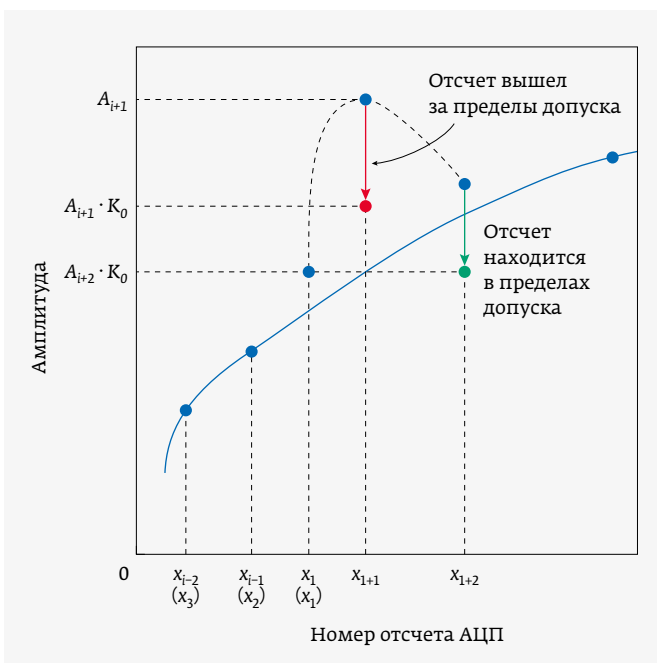


Рис. 17. Пояснение работы алгоритма пикового детектора

являются: низкая помехоустойчивость, любой шумовой выброс может быть принят за максимум сигнала. Наличие пьедестала (сравним рис. 14 и 16), сбой в регистре также приводят к ошибкам определения максимума.

Для повышения помехоустойчивости в СИМС MUCH V3 [11] в ПД проекта СВМ применен следующий алгоритм: если усредненная сумма трех последовательных отсчетов, приходящая от АЦП $(X_{i-2} + X_{i-1} + X_i) / 3$, больше следующего, умноженного на корректирующий коэффициент K_0 , то этот отсчет запоминается, если нет – блокируется (рис. 17): $(X_{i-2} + X_{i-1} + X_i) / 3 > K_0 X_{i+1}$.

Далее ПД ожидает следующие отсчеты АЦП, в соответствии с алгоритмом выполняя их обработку, и, кроме определения наличия помех, осуществляет поиск пика. Пик сигнала ищется по переходу периода нарастания сигнала к периоду спада; для контроля анализ производится также на спадающем участке. Код найденного пика переписывается в память.

Коэффициент K_0 зависит от типа (формы), диапазона оцифрованного сигнала и уровня шумов. Потребление такого блока составляет 0,46 мВт, он сохраняет работоспособность до 50 МГц.

В СИМС MUCH v4 (СВМ) коэффициент K_0 может быть изменен для более точного определения амплитуды пика импульса, а разрядность АЦП увеличена до восьми. В результате ПД работает, как цифровой автомат с тремя состояниями: а) ожидание, б) обработка отсчетов, пик найден, в) ожидается запрос на чтение. Точность выделения максимума сигнала зависит от K_0 , быстродействия АЦП и его разрядности.

В рамках устаревших (микронных) интегральных технологий реализация схем аналоговой памяти была проблемной из-за большой площади конденсаторов

на кристалле и токов утечки транзисторов. Современные субмикронные технологии лишены этих недостатков и позволяют заменять резистивные цепи емкостными. Аналоговые пиковые детекторы также могут включать в схему конденсаторы с ключами, а элементы аналоговой памяти использовать для операций с аналоговыми выборками сигналов.

* * *

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Analog Switches and Multiplexer Basics. MT-088 Tutorial // www.analog.com.
2. All Purpose Analog Switch Design Hints. Application Brief 7 // Pericom 1999.
3. **Hervas L.** The pipelined readout for the ZEUS Calorimeter // Thesis FTUAM-EP 91-01, DESY F35D-91-01, Jan 1991.
4. **Voronin A. G., Bashindzhagyan G. L., Ermolov P. F., Karmanov D. E., Korotkova N. A., Kuznetsov E. N., Merkin M. M., Savin A. A.** Analog Section of a Hadron-Electron Separator of the ZEUS Experiment (DESY) Instruments and Experimental Techniques, v. 45, no. 2, 2002, pp. 167–174. Translated from Pribory i Tekhnika Eksperimenta, no. 2, 2002, pp. 26–33.
5. **French M. J., Jones L. L., Morrissey Q., Neviani A., et al.** Design and results from the APV25, a deep sub-micron CMOS front-end chip for the CMS tracker // Nuclear Instruments and Methods. 2001. V. A666. PP. 359–365.
6. **Bingefors N., Bouvier S., Gidomski S., Hall G., Hogh T. S., Jalocha P., vd. Lippe H., Michel J., Nygård E., Raymond M., Rudge A., Sachdeva R., Weillhammer P., Yoshioka K.** A novel technique for fast pulse-shaping using a slow amplifier at LHC // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A326. 1993. PP. 112–119.
7. **Воронин А.** Структура каналов для считывающей электроники кремниевых детекторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 2 (00183).
8. **De Geronimo G., Kandasamy A., O'Connor P.** Analog CMOS peak detect and hold circuits. Part 1, 2. Analysis of the classical configuration // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 484, 2002. PP. 533–556.
9. **Воронин А. Г., Аткин Э. В., Ключев А. Д., Бочаров Ю. И.** Метод и интегральная микросхема для обработки нерегулярного во времени потока данных в многоканальной аппаратуре физического эксперимента // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 3. С. 1–7.
10. **Kasinski K., Kleczek R., Otfinowski P., Szczygiel R., Grybos P.** STS-XYTER, a high count-rate self-triggering silicon strip detector readout IC for high resolution time and energy measurements // Conference Record of Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). 2014.
11. **Atkin E., Bulbakov I., Ivanov P., Ivanov V., Malankin E., Normanov D., Sagdiev I., Samsonov V., Shumikhin V., Shumkin O., Vinogradova S., Voronin A.** Readout channel with majority logic timestamp and digital peak detector for Muon Chambers of the CBM experiment // Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, JINST, v. 11, pp. 26–30, September 2016.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ И СМЕШАННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Под ред. У. Кестера

Книга посвящена как теоретическим, так и прикладным аспектам создания аналого-цифровых систем обработки сигналов. Рассматриваются вопросы аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования, даются основы цифровой обработки сигналов, цифровой фильтрации, спектрального анализа. Отдельная глава посвящена вопросам конструирования, таким как компоновка устройства, разводка печатных плат, передача сигналов по высокоскоростным интерфейсам, сопряжение цифровых и аналоговых блоков устройства.

Для инженеров и студентов радиотехнических и других смежных специальностей.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2010. — 328 с.,
ISBN 978-5-94836-243-4

Цена 475 руб.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru