

Головные каскады считывающей электроники кремниевых детекторов: входной усилитель и шейпер

А. Воронин, к. ф-м. н.¹

УДК 539.1.075 | ВАК 05.27.01

Специфическими особенностями считывающей электроники (СЭ) кремниевых детекторов, используемой для регистрации ионизирующих излучений в экспериментальных установках, работающих на ускорителях и в космических аппаратах, являются многоканальность и высокая плотность расположения измерительных каналов – количество идентичных каналов считывания может превышать 10^7 . При выборе схемотехнического решения для СЭ следует учитывать форму сигналов, шумовые свойства, конструктивные особенности и другие параметры кремниевых детекторов. В зависимости от технических требований к СЭ блоки обработки сигналов с детекторов можно реализовать в аналоговом, аналого-цифровом и цифровом виде. В статье рассмотрены особенности и схемные решения для головных каскадов СЭ кремниевых детекторов – входного усилителя и шейпера.

АНАЛОГОВЫЕ И ЦИФРОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ СЭ

Цифровая реализация схем для обработки сигналов в СЭ стала применяться сравнительно недавно, раньше она использовалась в основном в блоках управления специализированных интегральных микросхем (СИМС) и выходных интерфейсах. Обработка сигналов в СЭ заключается в формировании или фильтрации сигналов, например уменьшении длительности и симметрировании формы импульса, снижении уровня шума, стабилизации базовой линии и т. д. Цифровые схемы на основе интегральных субмикронных технологий обеспечивают низкую потребляемую мощность на вентиль, высокое быстродействие и малые физические размеры вентиля. Такие характеристики отвечают требованию обработки сигналов в режиме реального времени в составе многоканальной СЭ. Благодаря цифровым методам может быть достигнута высокая точность и стабильность параметров СЭ, упрощена адаптивная обработка.

Во многих случаях цифровые методы обработки обеспечивают возможности, недоступные для аналоговых схем. Однако имеются особенности и ограничения цифровых методов. Например, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цифрового фильтра из-за периодичности ее формы [1] и возможного наложения спектров отличается от АЧХ аналогового фильтра, при этом импульсные

характеристики цифрового и аналогового фильтра совпадают. К тому же, цифровая обработка требует применения быстродействующих АЦП. Переходные процессы в цифровых и аналоговых реализациях блоков примерно одинаковые, но в некоторых случаях без аналоговых фильтров не обойтись. Например, для того, чтобы избежать наложения спектров на входе АЦП (после предусилителя), обычно ставится аналоговый шейпер [1]. Существуют также смешанные, аналого-цифровые решения, например, для реализации свертки используются блоки на переключаемых конденсаторах.

ВХОДНОЙ УСИЛИТЕЛЬ (ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ)

Минимальный сигнал в кремниевом детекторе достаточно мал: $5 \cdot 10^{-17}$ Кл для 1 кэВ рентгеновского излучения и менее 3,5 фКл для минимально ионизирующей частицы (м. и. ч.) ионизирующих излучений [2]. Входной усилитель (предусилитель) соединяется непосредственно с кремниевым детектором, обеспечивая усиление сигнала с детектора, и в общем случае преобразует его в импульс напряжения, амплитуда которого пропорциональна сигналу с детектора. Одним из ключевых параметров предусилителя для малых сигналов можно считать его шумовые свойства, поскольку исходный шум канала измерения определяется параметрами связки «детектор – предусилитель» [2]. К другим важными параметрами предусилителя относятся коэффициент передачи, быстродействие, динамический диапазон, потребляемая мощность и максимальная емкость, которую можно подключить к входу усилителя. Входной усилитель – единственный функциональный блок, ядро которого

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

выполняется в аналоговом виде. Для двухсторонних кремниевых детекторов требуется усилитель, способный работать с обеими полярностями входного сигнала.

Возможно применение трех типов усилителей: напряжения, тока и заряда [2]. Предусилители напряжения в схемах с кремниевыми детекторами практически не используются в связи с тем, что трудно обеспечить низкий уровень шума, когда импеданс источника сигнала (детектора) носит емкостной характер, а для этого типа усилителей требуются резисторы, добавляющие тепловой шум в схему. Усилитель тока, или преобразователь тока в напряжение, используется в быстродействующих схемах, когда форма выходного импульса напряжения близка к форме импульса входного тока, однако и в этой схеме необходим резистор, преобразующий ток в напряжение и являющийся источником дополнительного шума.

Наиболее широкое применение в качестве предусилителя для кремниевых детекторов нашел зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ), или малошумящий преобразователь заряда, выделившегося в детекторе, в импульс напряжения. В этом устройстве форма выходного импульса напряжения не совпадает с формой входного тока.

Зарядочувствительный усилитель

ЗЧУ представляет собой усилительный инвертирующий каскад, охваченный общей емкостной обратной связью со схемой разряда конденсатора обратной связи (рис. 1). Коэффициент передачи ЗЧУ по входному заряду Q_{in} равен $1/C_{fb}$ (C_{fb} – емкость обратной связи), выходное напряжение шума U_{nout} для емкости детектора C_d и напряжение шума на входе U_{nin} можно оценить по формуле: $U_{nout} = U_{nin}(1 + C_d/C_{fb})$ [3].

Основной составляющей шума ЗЧУ U_{nin} является тепловой шум канала полевого транзистора или активное сопротивление базы биполярного транзистора [3]. Следует отметить, что отношение сигнал-шум уменьшается с увеличением емкости детектора, поскольку заряды сигналов детекторов одинаковой толщины, но разной площади, для одной м. и. ч. равны, а емкости детектора с увеличением площади растут.

Для идеального ЗЧУ, охваченного емкостной обратной связью, максимальное выходное напряжение $U_{out}(t)$ связано с входным током детектора $i_{ind}(t)$ выражением:

$$U_{out} = \frac{1}{C_{fb}} \int_0^t i_{ind}(t) dt = \frac{Q_{in}}{C_{fb}}. \quad (1)$$

Обычно в схему ЗЧУ для кремниевых детекторов добавляется емкость калибровки C_{cal} для контроля ЗЧУ и полного канала СЭ (если $C_{cal} \ll C_d$, то в этом случае шумы практически не увеличиваются). На C_{cal} подается скачок напряжения (в идеале функция Хэвисайда), при этом напряжение максимума сигнала для идеального усилителя $U_{out}(t) = U_{in}(C_{cal}/C_{fb})$, что не коррелирует с выражением (1).

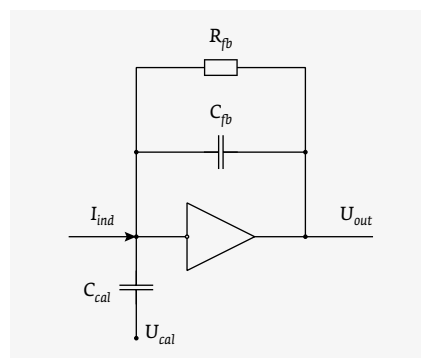


Рис. 1.
Схема ЗЧУ для кремниевых детектора

В основном это отражается на длительности фронта выходного сигнала. Для калибровочного сигнала формы входного и выходного фронтов идеального ЗЧУ одинаковы. Для сигнала детектора длительность фронта определяется длительностью интегрирования токового импульса детектора. В случае, когда полоса усилителя сравнима или менее полосы сигнала, формы фронтов в обоих случаях совпадают и определяются свойствами усилителя. Спады импульсов на выходе усилителя одинаковы, имеют экспоненциальную форму с постоянной времени разряда $C_{fb}R_{fb}$.

Схемное решение и характеристики ЗЧУ подробно рассмотрены в [2] и множестве других работ, поскольку свойства ЗЧУ во многом определяют качество измерительного канала [3, 4].

Входные каскады ЗЧУ

При проектировании входного каскада ЗЧУ ключевой задачей является комплексная оптимизация шумовых параметров, коэффициента усиления и потребляемой мощности. В каждом конкретном случае выбирают входную схему, которая соответствует требованиям проекта.

Входной усилительный каскад ЗЧУ наиболее часто выполняется по схеме каскода [5, 6, 7, 8, 13], которая отличается большой величиной коэффициента усиления (более 1000). Высокое быстродействие, один доминирующий полюс на АЧХ, обеспечивающий потенциальную устойчивость каскада, а также отсутствие эффекта Миллера (увеличение эквивалентной входной емкости

ООО СМП

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные компоненты для поверхностного монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Разборные металлические EMI SMD экраны
- Кварцевые генераторы 0532 на частоты до 125 МГц

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32, e-mail: sale@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

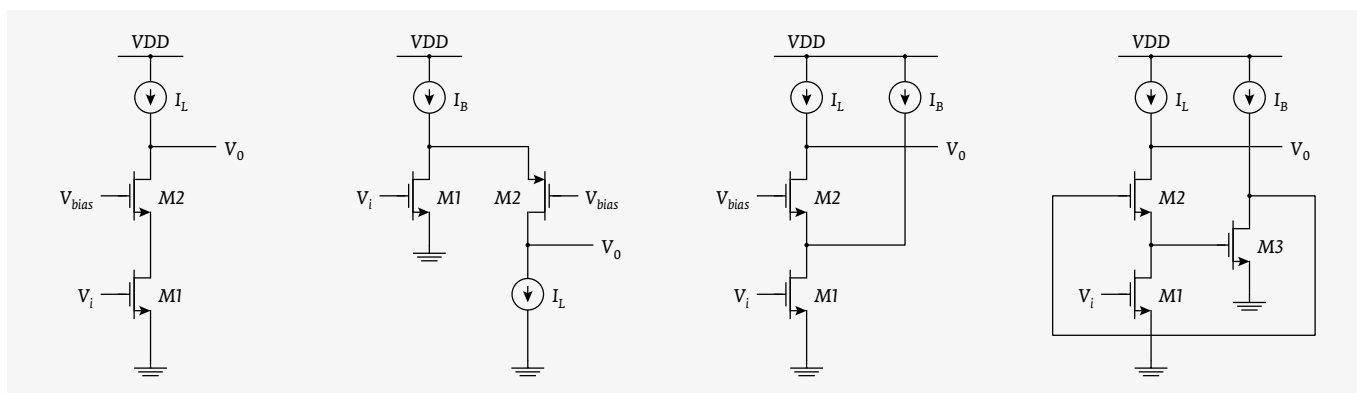


Рис. 2. Каскодные схемы: слева направо – телескопический каскод, параллельный каскод, бустерный каскод, каскод с обратной связью

транзистора, связанной с паразитной емкостью обратной связи с выхода на вход) делают каскод предпочтительным вариантом входного каскада предусилителя. На рис. 2 показаны упрощенные варианты каскодных схем (ядер) для СИМС. Возможна реализация ЗЧУ на ОУ на базе каскодов, как в СИМС SAMPA.

Коэффициенты усиления K_u каскодных схем, приведенных на рис. 2, равны, соответственно [6]:

$$\text{телескопический каскод: } K_u = \frac{-g_{m1}}{g_{DS1} \frac{g_{DS2} + g_L}{g_{m2} + g_{DS2}} + g_L},$$

$$\text{параллельный каскод: } K_u \approx g_{m1} / g_L,$$

$$\text{бустерный каскод: } K_u \approx \frac{-g_{m1}}{\frac{g_{DS1} \cdot g_{DS2}}{g_{m2}} + g_L},$$

$$\text{каскод с обратной связью: } K_u \approx \frac{-g_{m1}}{\frac{g_{DS1} \cdot g_{DS2} \cdot g_{DS3}}{g_{m2} \cdot g_{m3}} + g_L},$$

где g_{m1} , g_{m2} , g_{m3} – крутизна транзисторов M1, M2, M3, соответственно; g_{DS1} , g_{DS2} , g_{DS3} – проводимость сток-исток M1, M2, M3 в рабочей точке; g_L – эквивалентная проводимость каскада источника тока I_L .

Параллельный каскод позволяет уменьшить напряжение на входном транзисторе и снизить потребляемую мощность. Бустерный каскод за счет дополнительного тока через входной транзистор увеличивает усиление, соответственно снижается шум при приемлемом потреблении. Каскод с обратной связью также позволяет увеличить усиление и управлять параметрами каскода. Реальные

схемы могут быть значительно сложнее схем, представленных на рис. 2, возможны также комбинированные решения, в которых сочетаются эти схемы.

В гибридных ЗЧУ, как правило, используется входной полевой транзистор с р-п-переходом, остальная часть схемы реализуется по каскодной схеме на биполярных транзисторах (эксперимент HES – ZEUS).

Структурные и схемотехнические решения для ЗЧУ

Схемные решения для ЗЧУ и его параметры определяются, главным образом, вариантами обратной связи и дополнительными элементами, подключаемыми к ядру ЗЧУ (см. рис. 2).

В ЗЧУ с постоянным разрядом через резистор выходной импульс характеризуется коротким фронтом (ЗЧУ СИМС MUCH-V2, см. рис. 1) и экспоненциальным спадом (рис. 3) [7]. Часто в СИМС в качестве резистора используют МОП-транзистор, как в СИМС CR-1A (см. рис. 3) [8]. Изменяя напряжение на затворе транзистора можно регулировать сопротивление канала, которое может быть

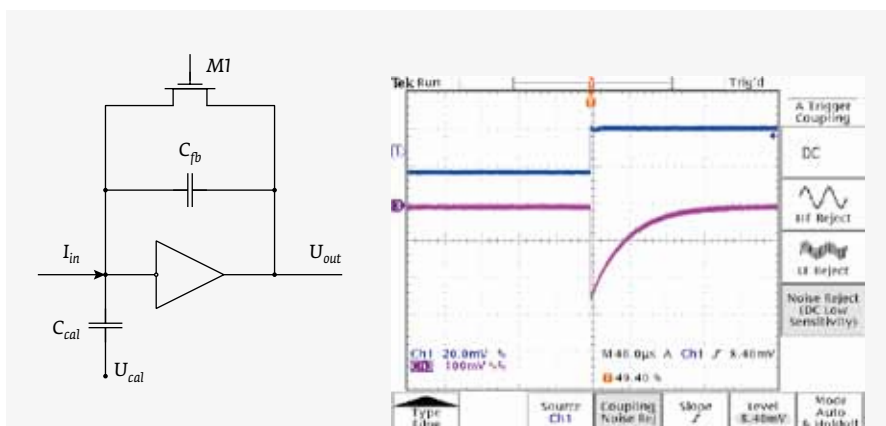


Рис. 3. Схема ЗЧУ с транзистором разряда и осциллограммы ЗЧУ (с резистором или транзистором разряда): входной импульс (синий) и отклик (лиловый)



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»



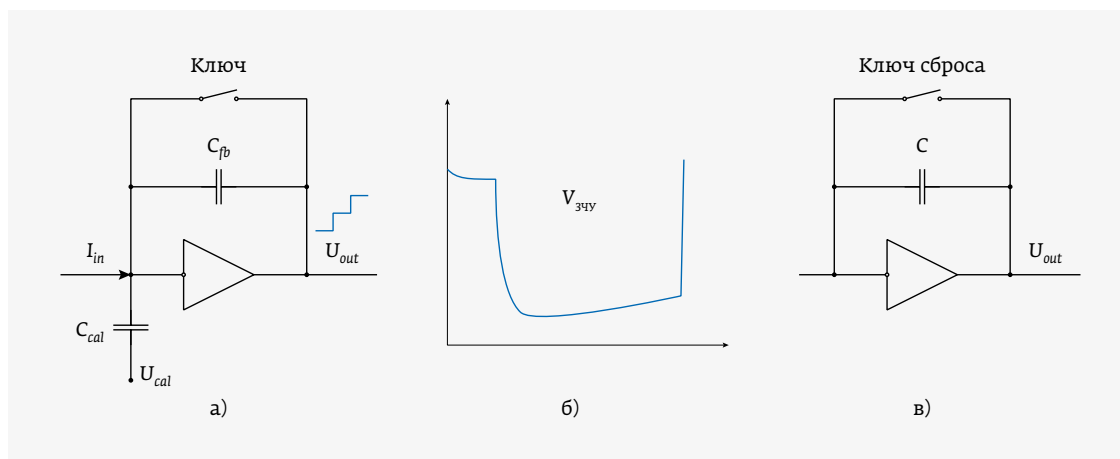


Рис. 4. ЗЧУ с ключом интегрирования разряда (а), форма импульса ЗЧУ с ключом и сбросом (б), шейпер, нечувствительный к спаду импульса ЗЧУ (в)

больше величины резисторов, реализуемых в применяемой технологии. Соответственно, можно увеличить постоянную времени разряда конденсатора обратной связи, не изменяя коэффициента передачи ЗЧУ. Это позволяет снизить параллельный шум ЗЧУ [3].

Для интегрирования зарядов ЗЧУ нескольких событий применяют ключ (СИМС SVX4) (рис. 4), который можно использовать также для разряда конденсатора обратной связи. Однако спад выходного импульса для многих типов шейперов (преобразователя формы импульса) сформирует на своем выходе импульс противоположной полярности. Чтобы избежать этого эффекта в схему шейпера добавляют ключи, превращая шейпер в усилитель, либо выбирают тип шейпера, нечувствительного к отрицательному перепаду напряжения. При разомкнутом ключе параллельный шум существенно меньше, чем при резистивном разряде емкости обратной связи [3].

Регулировка усиления ЗЧУ осуществляется путем изменения величины емкости обратной связи. На рис. 5

представлена обобщенная схема регулировки усиления ЗЧУ, штриховыми линиями показаны связи, которые могут отсутствовать в конкретной схеме. Изменение коэффициента усиления может осуществляться по внешним командам (СИМС FSSR2, STS-MUCH-XYTER) или автоматически. Например, по внешней команде ключ может подключить дополнительный конденсатор C_2 параллельно C_{fb} , и коэффициент передачи ЗЧУ по заряду становится равным $1/(C_{fb1} + C_{fb2})$. Автоматическое переключение усиления реализуется с помощью пороговой схемы управления, для чего используется компаратор или триггер Шмидта [9].

В качестве схемы разряда могут использоваться элементы, приведенные выше, или их комбинация. Иногда требуется синхронизация разряда с некоторой тактовой частотой. Схема разряда может изменять время разряда по команде из схемы управления или с помощью активной схемы обратной связи, работающей по принципу: чем больше амплитуда импульса ЗЧУ, тем меньше постоянная тока разряда. Активные схемы в обратной связи ЗЧУ позволяют получать характеристики ЗЧУ, которых нельзя добиться с помощью более простых схем и только пассивных элементов.

Примером реализации автоматического изменения усиления и применения активных блоков является микросхема CASIS1.0, которая проектировалась для калориметрического применения [9]. Чтобы обеспечить динамический диапазон 50 пКл, передаточная характеристика ЗЧУ этой микросхемы разбита на два поддиапазона. Основная емкость обратной связи ЗЧУ равна 1,6 пФ (рис. 6). При превышении выходным сигналом ЗЧУ порога в блоке управление обратной связью (ОС) к емкости 1,6 пФ в блоке ОС ЗЧУ подключается емкость 30,4 пФ, уменьшая коэффициент передачи ЗЧУ. В этой схеме должны быть минимизированы задержка и длительность переходного процесса цепи подключения дополнительной емкости, чтобы избежать искажения фронта выходного сигнала ЗЧУ. Схема имеет среднее быстродействие и создана для

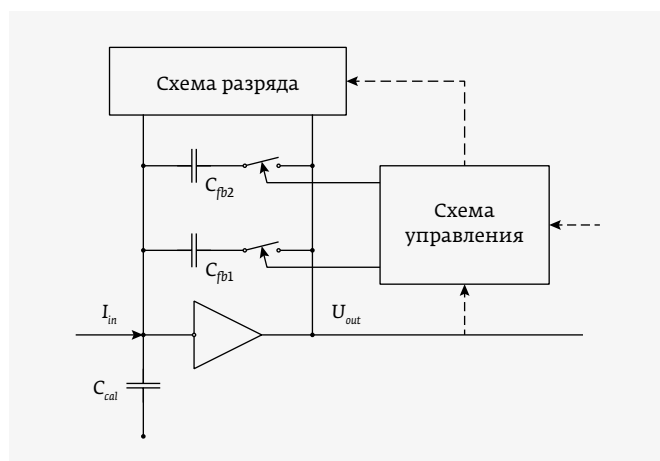


Рис. 5. Обобщенная схема ЗЧУ с регулируемым коэффициентом усиления

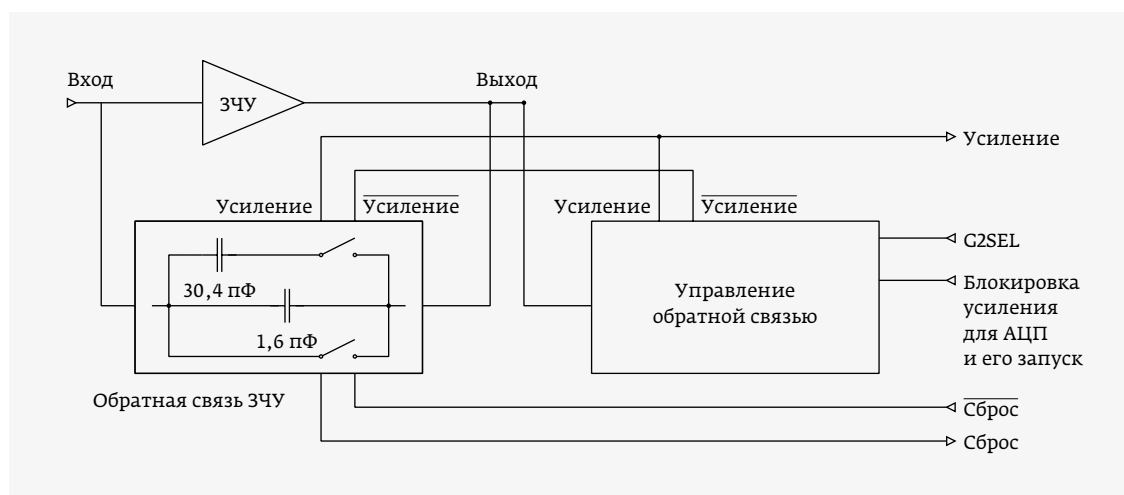


Рис. 6. Схема ЗЧУ с автоматическим переключением коэффициента передачи в СИМС CASIS1.0

применения в аппаратуре для экспериментов в области космических лучей.

ЗЧУ с автоматическим изменением коэффициента передачи, реализованный в СИМС НУКЛОН, содержит входной усилитель и усилитель класса В (рис. 7) [10]. Усилитель класса В работает с отсечкой, поэтому принцип работы схемы напоминает работу схемы с порогом. Однако существуют различия: во-первых, отсутствует ключ, подключающий дополнительную емкость, и, соответственно, переходной процесс после срабатывания ключа. Кроме того, переход усилителя из режима класса В в линейный режим сопровождается небольшим нелинейным участком передаточной характеристики, поэтому изменение коэффициента передачи происходит плавно (рис. 8). В схеме возможна регулировка точки изменения коэффициента передачи (см. рис. 8).

Усилитель, созданный для проекта НУКЛОН, обеспечивает уникально широкий динамический диапазон 1–40 000 м. и. п. Коэффициент усиления малых сигналов по заряду составляет 1/6,6 пКл ($C1=6,6$ пФ), больших сигналов – 1/73 пКл ($C2=67$ пФ) и характеризуется плавным переходом от первого значения ко второму. Разница в коэффициентах усиления составляет около 11. Плавный переход прост в реализации и более стабилен, чем компаратор (из-за наличия больших уровней шумов: отношение сигнал-шум ≈ 2 м. и. ч.). Это связано с тем, что шейпер, стоящий после усилителя, сглаживает шумовой выброс, а компаратор может при переключении усиления создать помеху или осцилляции из-за короткого фронта и шума. То есть изменение

усиления в виде угла может привести к зоне неопределенности при вычислении входного заряда.

Наличие двух коэффициентов усиления в ЗЧУ СИМС НУКЛОН связано также с оптимизацией динамического диапазона и отношения сигнал-шум. Известно, что малошумящий усилитель должен иметь максимальный коэффициент усиления первого каскада, что улучшает работу усилителя при малом сигнале и высоком общем уровне шума на входе. В этом случае шумы второго каскада (Amp 2) можно не учитывать.

Используя полулогарифмическую зависимость (линейная шкала усиления в дБ) на выходе от логарифма частоты со спадающим участком -6 дБ/октаву или -20 дБ/декаду (один доминирующий полюс), приведенную к коэффициенту передачи разомкнутого усилителя (рис. 9), можно показать, что усилитель с высоким усилением менее

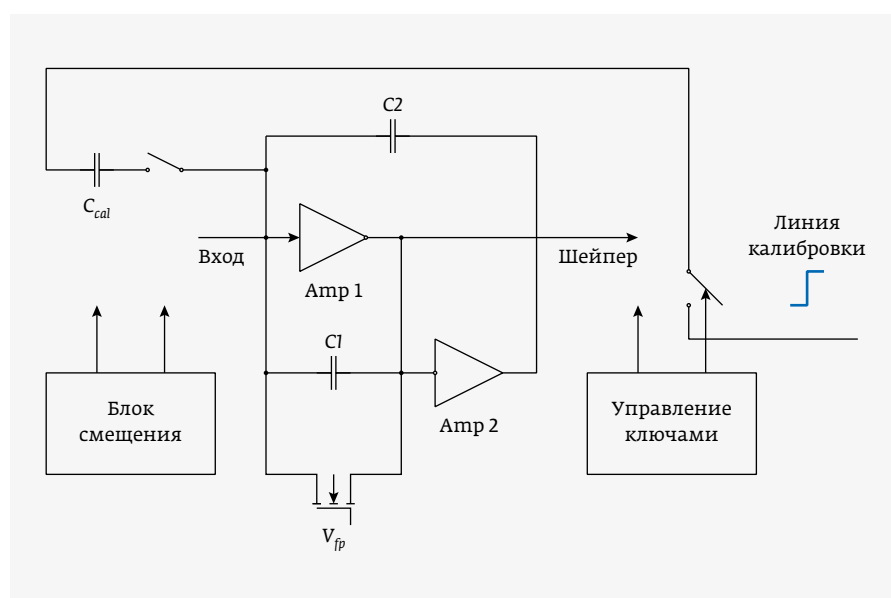


Рис. 7. Входной каскад СИМС НУКЛОН

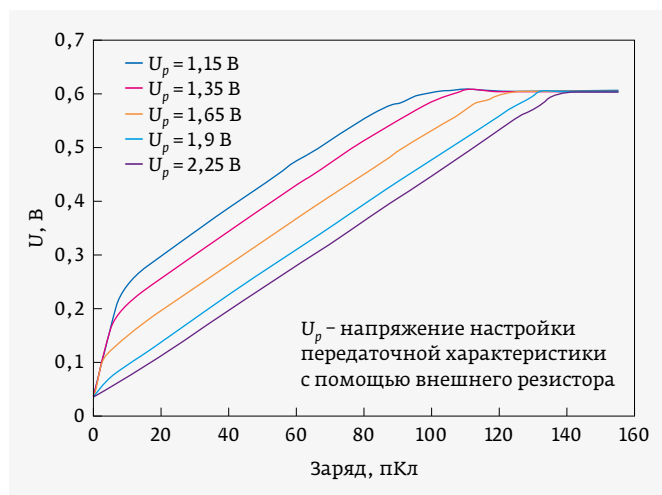


Рис. 8. Экспериментальная передаточная характеристика СИМС НУКЛОН

шумящий, чем усилитель с малым усилением. Если усилитель A_{mp} 2 широкополосный, то при заданных коэффициентах усиления для доказательства разницы в уровне шума на участках с малым и большим усилением (см. рис. 8) можно использовать в первом приближении амплитудно-частотные характеристики A_{mp} 1, представленные на рис. 9.

Отношение A коэффициентов усиления k_1 и k_2 в полосах усиления f_2 и f_1 составляет 10,6, такое же соотношение имеют и полосы частот: $k_1/k_2 = f_2/f_1 = A$, то есть ($k_1 = Ak_2$). Обозначим коэффициенты усиления по напряжению через k_{u1} и k_{u2} . Шум напряжения на выходе e_n соответственно равен $(S_0 \Pi_1 (1+k_1)^2)^{1/2}$ и $(S_0 \Pi_2 (1+k_2)^2)^{1/2}$, где S_0 – спектральная плотность входного шума, $\Pi_1 = 1,57f_1$ и $\Pi_2 = 1,57f_2$ – шумовые полосы (если считать, что f_2 и f_1 соответствуют полосам усилителей по уровню -3 дБ от максимума усиления); $(1+k_1)^2 = (1+Ak_2)^2$ и $(1+k_2)^2$ – коэффициенты передачи шумов

ЗЧУ по мощности сигнала. Отсюда можно получить выигрыш C_{vin} в отношениях сигнал-шум для k_1 и k_2 :

$$C_{vin} \approx (\Pi_2 / \Pi_1)^{1/2}.$$

Для СИМС НУКЛОН выигрыш по отношению сигнал-шум участка передаточной характеристики с высоким усилением по сравнению с участком с малым усилением составляет не более $C_{vin} \approx 3,26$.

В зависимости от реализации конкретного усилителя по предложенной схеме (рис. 7), спад на графике зависимости усиления от частоты может иметь сложную форму и состоять из участков -12 дБ/октаву, -18 дБ/октаву, то есть с шагом 6 дБ на октаву. В этом случае, кроме шумовой полосы, следует учитывать усиление на данном участке.

Для снижения помех при калибровке перед входом усилителя предусмотрен ключ, соединяющий только те каналы, которые калибруются (СИМС НУКЛОН содержит 32 канала). На кристалле СИМС рядом с блоком управления (на противоположной стороне от входов) расположены дополнительные ключи, отключающие некалибрующиеся каналы (линии калибровочных сигналов), что также снижает перекрестные помехи.

При широком динамическом диапазоне возможны значительные перекрестные помехи между каналами (до сотен м. и. ч). Снизить их на 30–50 дБ позволяет размещение отдельных блоков смещения транзисторов в каждом канале ближе к входному усилителю.

ЗЧУ с автоматической регулировкой коэффициента передачи и последовательным соединением каскадов (разработан для прототипа проекта УНК) построен на усилительных каскадах, имеющих жесткое ограничение (например, на базе дифференциального усилителя) [11]. Каждый каскад имеет передаточную характеристику, состоящую из линейного и горизонтального участков, с переходом от одного участка к другому в точке, положение которой

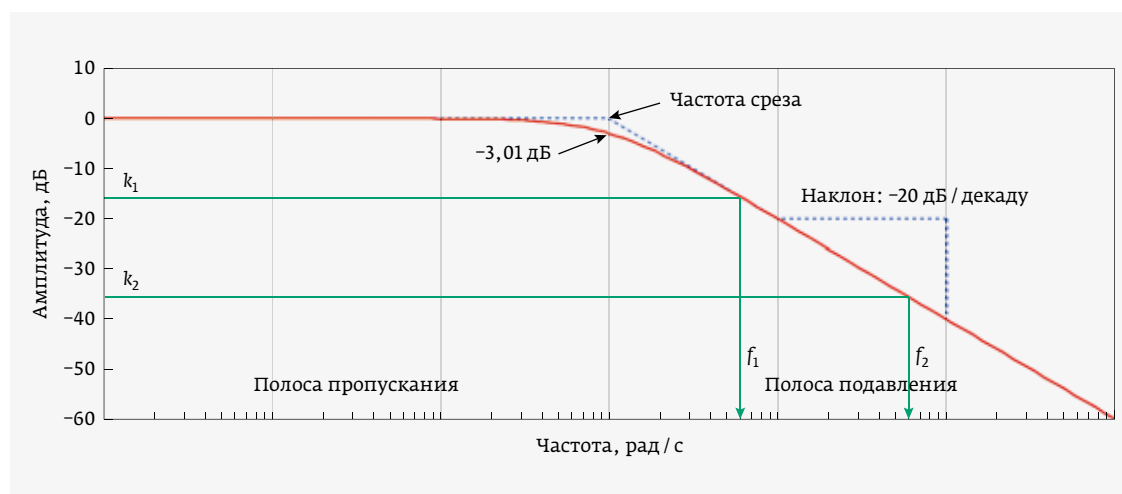


Рис. 9. Зависимость усиления от частоты входного усилителя СИМС НУКЛОН

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-
МОРСКОЙ
САЛОН



INTERNATIONAL
MARITIME
DEFENCE
SHOW



Организатор:



При участии:



Министерство
обороны



Министерство
иностраных
дел



Федеральная служба
по военно-техническому
сотрудничеству



Администрация
Санкт-Петербурга



РОСОБОРОНЭКСПОРТ

IMDS
2021

23-27 июня
РОССИЯ
Санкт-Петербург

Устроитель:



ООО «Морской Салон»
www.navalshow.ru

“Через сотрудничество — к миру и прогрессу!”

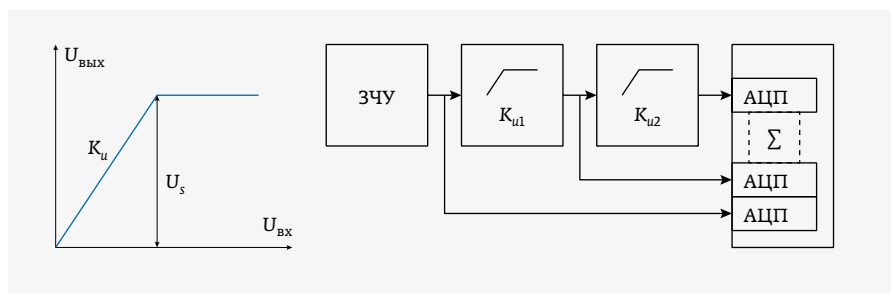


Рис. 10. Передаточная характеристика каскада с жестким ограничением и структура усилителя с линейно-ломаной передаточной характеристикой

зависит от величин входного сигнала, коэффициент усиления в которой желательно изменить (точка U_s на графике рис. 10). Структура ЗЧУ, показанная на рис. 10, позволяет создать линейно-ломаную передаточную характеристику с коэффициентом усиления $K_U = K_{зчу} \cdot K_{u1} \cdot K_{u2}$, $K_{зчу} \cdot K_{u1}$ и $K_{зчу}$, где коэффициенты K с индексами соответствуют усилению каждого каскада в отдельности.

Если сложить цифровые эквиваленты выходного напряжения каждого каскада и преобразовать цифровую сумму в аналоговое напряжение, то получим передаточную характеристику усилителя, показанную на рис. 11.

Создание ЗЧУ с умножителем величины резистора обратной связи (СИМС GASPLEX) связано с тем, что в интегральной технологии трудно реализовать резисторы с сопротивлением 10 МОм и более [12]. МОП-транзисторы, используемые в качестве резисторов (см. рис. 8, участок с низким усилением), вносят нелинейность и шум, поэтому могут не удовлетворять техническим требованиям. Чтобы устранить этот недостаток, в ЦЕРНе предложена активная схема умножителя величины сопротивления для разряда емкости обратной связи (рис. 12). Усилитель использовался в проекте СВД-2. Номинал резистора $R = 50$ кОм умножается на коэффициент 400, в результате эквивалентный разрядный резистор R_b достигает 20 МОм, снижая параллельный шум [3]. Собственно усилителем с емкостной обратной связью является первый каскад,

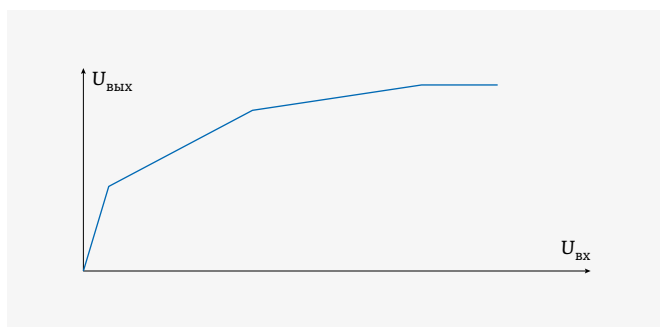


Рис. 11. Результирующая характеристика усилителя с линейно-ломаной передаточной характеристикой

к выходу которого через истоковый повторитель подключен один вывод резистора R_b , одновременно являясь выходом схемы U_{out} . Второй вывод R нагружен на истоки двух транзисторов, добавляя в цепь вертикальной цепочки транзисторов ток $I = U_{out}/R$. Воздействие дополнительного тока смещения, протекающего через эту цепочку, компенсируется в разрядной цепи в соотношении 1:400, и на выходе второго усилителя формируется ток разряда емкости обратной

связи, в 400 раз меньший, чем ток через R .

На рис. 13 показана структурная схема ЗЧУ с компенсацией и измерением темнового тока детектора, способная работать с обеими полярностями входного сигнала [13]. При гальванической связи ЗЧУ и кремниевого детектора возможно изменение рабочей точки на входе за счет тока утечки детектора. Изменение смещения на входе приводит к изменению смещения на выходе повторителя напряжения. Путем сравнения на ОУ опорного потенциала и выходного постоянного напряжения повторителя (для этого полосу цепи компенсации выбирают равной примерно 1 Гц), производится регулировка источника тока для компенсации тока утечки без влияния на постоянную времени разряда емкости C_{oc} .

Рабочие точки транзисторов усилителя выбраны таким образом, чтобы ЗЧУ мог преобразовывать входной сигнал обеих полярностей.

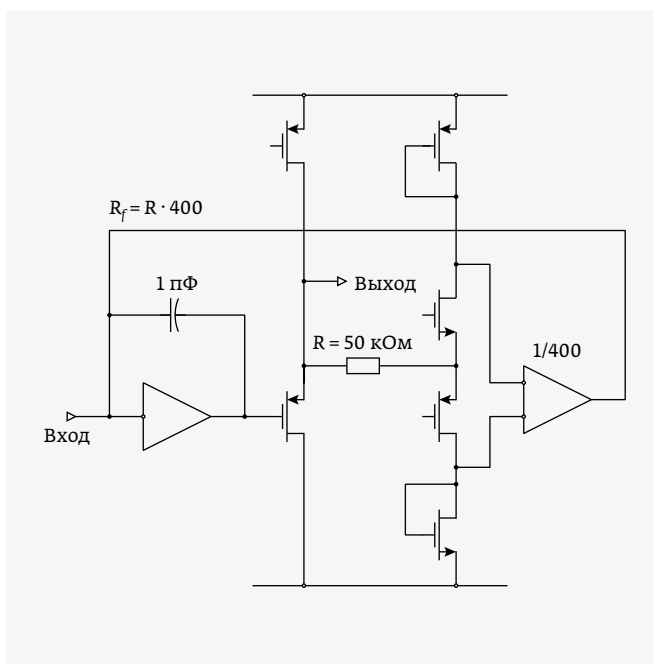


Рис. 12. ЗЧУ с умножением величины резистора разряда

18-я Международная выставка технологий,
оборудования и материалов для производства
изделий электронной и электротехнической
промышленности

13–15 апреля 2021

Москва, Крокус Экспо

electrontechexpo.ru

Получите Ваш
бесплатный билет
по промокоду **ee21print**



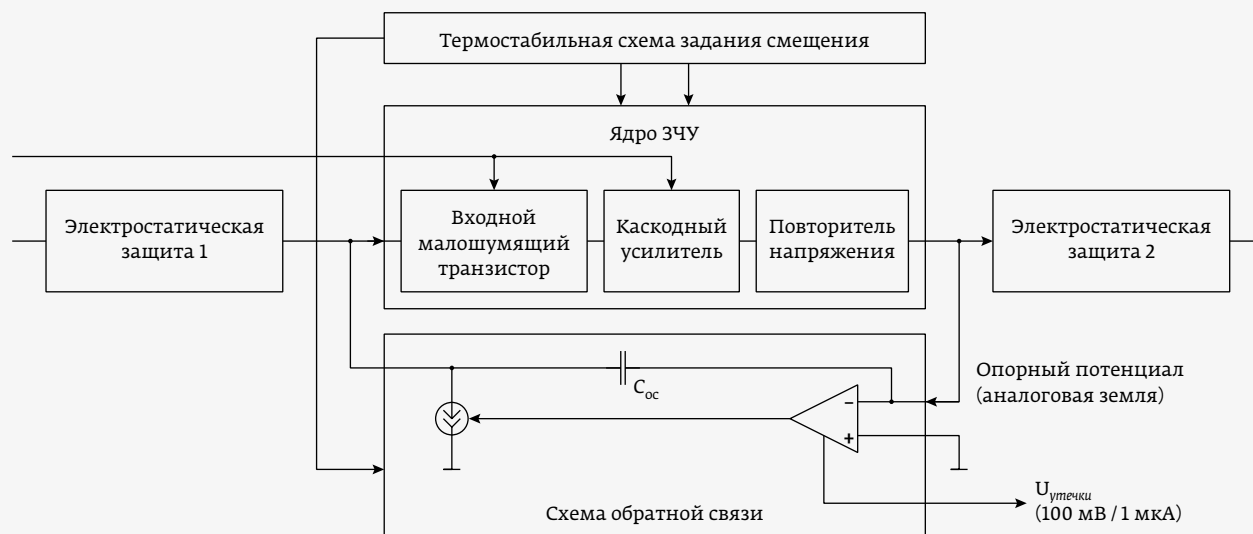


Рис. 13. ЗЧУ с компенсацией тока утечки кремниевого детектора

Схема ЗЧУ с линейным разрядом конденсатора обратной связи представлена на рис. 14 [14].

Линейный разряд достигается тем, что параллельно конденсатору обратной связи подключен источник постоянного разрядного тока:

$$U_c = A_0 - \frac{1}{C} \int i(t) dt = A_0 - \frac{i \cdot (t - t_0)}{C},$$

где A_0 – амплитуда импульса, i – постоянный ток разряда, C – емкость обратной связи.

Такой способ используется для метода оцифровки TOT (Time Over Threshold), который заключается в сравнении импульса с порогом. Линейный разряд конденсатора обратной связи позволяет получить линейную зависимость между длительностью импульса над порогом и амплитудой сигнала.

Рассмотренные структурные варианты схем позволяют выбрать оптимальную архитектуру ЗЧУ для конкретной задачи – в координатных, зарядовых или калориметрических приложениях. Следует отметить, что большинство

схем лично протестировано автором, и их работоспособность доказана. При необходимости можно применять комбинации предложенных схем ЗЧУ.

ЗЧУ и преобразователь тока в напряжение

Известная базовая схема преобразователя тока в напряжение показана на рис. 15.

Идеальный преобразователь на выходе имеет импульс напряжения такой же формы, как входной ток, однако, при высокой нагрузке детектора, на выходе получим напряжение огибающей наложенных импульсов потока частиц. Заметим, что ЗЧУ при высокой нагрузке не работает без периодического разряда емкости обратной связи, поскольку емкость обратной связи не успевает разряжаться и ЗЧУ переходит в режим насыщения. В физике высоких энергий (ФВЭ) и физике космических лучей (ФКЛ) сегментация детектора стараются выбрать таким образом, чтобы минимизировать наложения импульсов детектора для нормальной работы ЗЧУ.

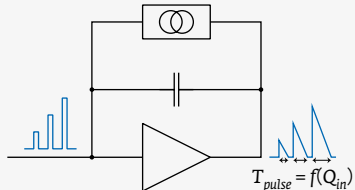


Рис. 14.
ЗЧУ с линейным разрядом

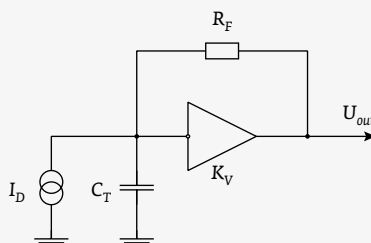


Рис. 15.
Схема токового усилителя

С 23 февраля!
С Днём Защитника Отечества!

Сердечно поздравляем и желаем вам и
вашим семьям крепкого здоровья и
счастья, любви!



БЕЗМАСОЧНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Многоканальные лазерные генераторы изображений
- Проектная норма 0.35, 0.6 μm
- Высокая точность совмещения
- $\varnothing 200, 150, 100 \text{ мм}$



ГЕНЕРАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Диапазон UV, DUV
- Проектная норма 90, 130 нм
- 16/32-лучевая архитектура
- Фазосдвигающие шаблоны
- Быстрая переналадка пластина — шаблон



КОНТРОЛЬ ФОТОШАБЛОНОВ

- Проектная норма 90, 130, 250 нм
- Твердотельный лазер
- Контроль методом D2DB, D2D
- Высокая производительность
- Контроль неплоскостности



РЕМОНТ ФОТОШАБЛОНОВ

- Фемтосекундный лазер
- 0.15/ 0.3/ 0.5 μm min элемент
- Размер шаблона до 9"x9"
- Ремонт копированием
- Ремонт через пелликл
- Прозрачные / непрозрачные дефекты



КОНТАКТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Ручная и автоматизированная загрузка
- Двусторонняя литография
- Высокая точность совмещения
- Низкий уровень генерации дефектов
- Высокая энергоэффективность



СТЕПЛИНГ

- Проектная норма 0.35, 0.8 μm
- Автоматический масштаб
- Двустороннее совмещение
- $\varnothing 200, 150, 100 \text{ мм}$
- Твердотельный источник света



КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ

- Контроль привносимых дефектов пластин без топологии
- Автоматический микро и макро контроль дефектов пластин с топологией
- Высокая производительность



АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ

- Контроль микроразмеров
- Контроль неплоскостности
- Контроль координат
- Контроль толщин
- Контроль рассовмещения



ЗОНДОВЫЕ КОНТРОЛИ

- $\varnothing 200, 150, 100 \text{ мм}$
- $\pm 4 \mu\text{m}$ погрешность контактирования
- Ручное / полуавтоматическое / автоматическое оборудование



РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК

- $\varnothing 300, 200, 150, 100 \text{ мм}$
- 2 независимые зоны разделения в одной установке
- 2.4 кВт мощность электрошпинделя
- Полуавтоматическое / автоматическое оборудование



Создаем традиции будущего!



- Единое таможенное пространство
- 59 лет опыта в разработке и производстве прецизионного оптико-механического и сборочного оборудования
- Высокий уровень применяемых технологий и современного оборудования
- Полный цикл разработки и производства, высококвалифицированный персонал
- Высокое качество изделий подтверждено национальными и международными стандартами
- Возможность комплексной поставки оборудования, адаптированного для Российского рынка, программного обеспечения для поддержки процессов изготовления фотошаблонов и 3D-моделирования для фотолитографии компании GenlSys (Германия)

Республика Беларусь
220033, г. Минск
Партизанский пр-т, 2

тел: (+375 17) 226 09 82
(+375 17) 223 22 26
факс: (+375 17) 226 12 05

office@kbtem-omo.by
kbtem.omo@gmail.com
www.planar.by



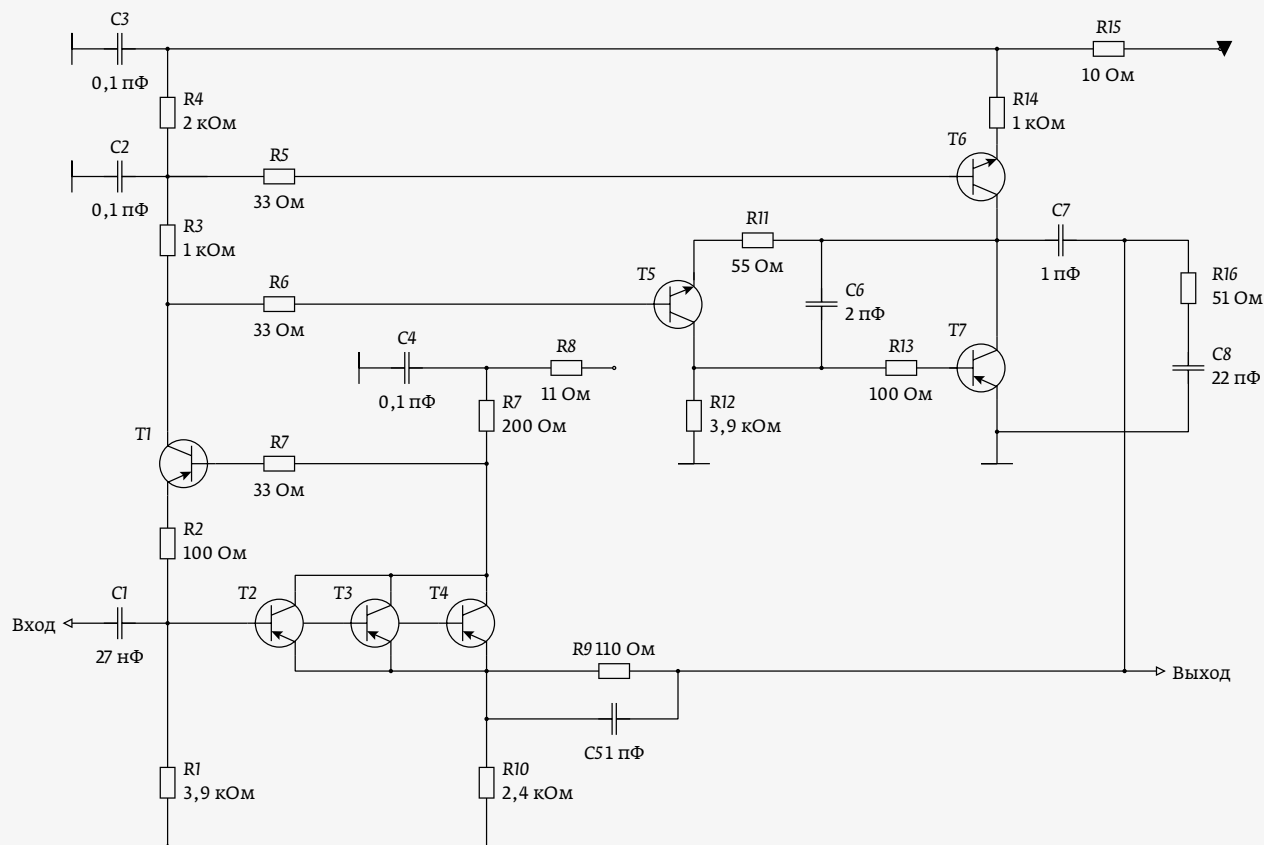


Рис. 16. Электрическая схема согласующего преобразователя тока в напряжение для установки ATLAS

Для кремниевых детекторов схема преобразователя тока в напряжение является наиболее быстродействующей и применяется в ФВЭ и ФКЛ только при высокой нагрузке детектора или когда необходимо получить форму выходного напряжения, близкую к форме тока детектора. Коэффициент передачи по току идеального усилителя равен $1/R_{fb}$. Если входное сопротивление каскада R_{in} не равно нулю (не идеальный усилитель), то его быстродействие снижается, при этом постоянная времени определяется, как $R_{in} \cdot C_t$, где C_t – суммарная емкость, подключенная к входу усилителя. Характеристики параллельных шумов преобразователя тока в напряжение аналогичны ЗЧУ [3].

Согласующий усилитель для кремниевого детектора

Один из вариантов преобразователя тока в напряжение для кремниевых детекторов в гибридном исполнении был разработан на базе усилителя для газовых детекторов экспериментальной установки ATLAS (рис. 16) [15].

Основная особенность этого усилителя – возможность согласовать импеданс линии подключения (кабеля) с входным импедансом усилителя, поскольку, например, в экспериментах DO и STS/CBM применяются соединительные кабели между кремниевыми детекторами и СЭ (рис. 17).



Рис. 17. Соединение кремниевого детектора и СЭ с помощью плоского кабеля (эксперимент D0)



★ ARMY 2021

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ
ОПЕРАТОР



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

22–28 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО

WWW.RUSARMYEXPO.RU

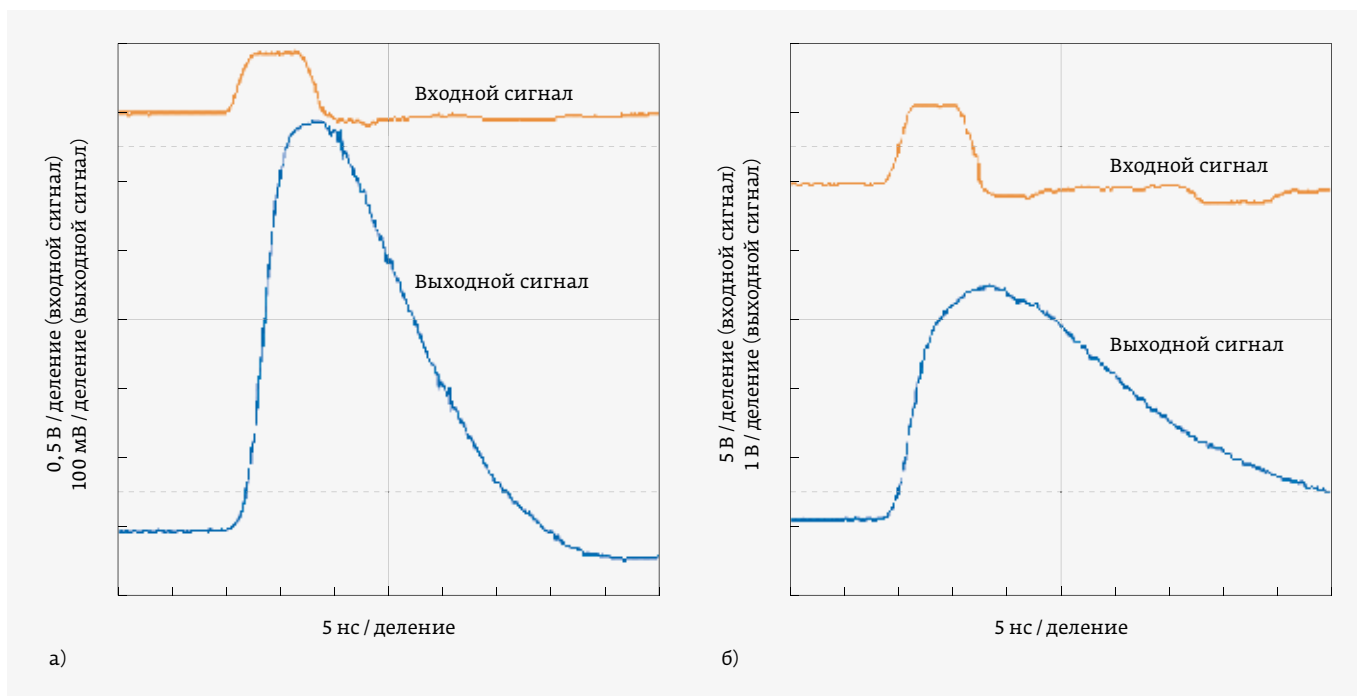


Рис. 18. Отклик усилителя на квазипрямоугольный импульс: а – в режиме малого сигнала; б – в режиме большого сигнала

Эффект регулировки виртуального входного импеданса R_{inv} определяется общей обратной связью усилителя и резистором, подключенным к эмиттеру транзистора $T1$ (см. рис. 16). Для этой схемы: $R_{inv} \approx R3 \cdot (R10 / (R9 + R10))$.

Поскольку реальное сопротивление усилителя является низкоомным, то к его входу возможно подключать емкость до 1500 пФ.

В усилителе применен сложный входной каскад $T1$ – $T4$, охваченный местной обратной связью и обеспечивающий низкий шум усилителя. Местная обратная связь, заведенная с коллекторов $T2$ – $T4$ на базу $T1$, улучшает линейность усилителя. Снижение шума обеспечивают транзисторы $T2$ – $T4$, включенные параллельно. Таким образом, снижается эквивалентное активное сопротивление базы, являющееся основным источником шума

в биполярном транзисторе. Спектральная плотность шума усилителя имеет характер белого шума с уровнем 0,43 нВ / Гц^{1/2}.

Второй каскад $T5$ – $T7$ является повторителем напряжения и обеспечивает эффективную работу цепи общей обратной связи, а также низкий выходной импеданс усилителя. Общая обратная связь, образованная резисторами $R9$ и $R10$ (емкость $C5$ является корректирующей), позволяет получить желаемое входное сопротивление. Диапазон входных токов составляет 4 мА, а потребляемая мощность – 50 мВт.

Типовой выходной сигнал усилителя в режиме малого и большого сигналов показан на рис. 18. Тестовое воздействие на входе усилителя имеет вид короткого импульса квазипрямоугольной формы длительностью 8 нс. Время нарастания выходного сигнала не превышает 2 нс.

На рис. 19 показан выходной сигнал усилителя, имитирующий форму тока кремниевого детектора.

Усилитель был протестирован с реальными кремниевыми детекторами емкостью 30 и 300 пФ. Альфа-частицы с энергией 5 МэВ воздействовали на детектор, подключенный к входу усилителя. Выходные сигналы усилителя для емкостей детектора 30 и 300 пФ представлены на рис. 20. При увеличении емкости детектора несколько увеличивается длительность выходного импульса, в данном случае на 10 нс. Приведенные на рис. 20 отклики усилителя на реальный сигнал детектора от α -частиц подтверждают возможность использования схемы усилителя

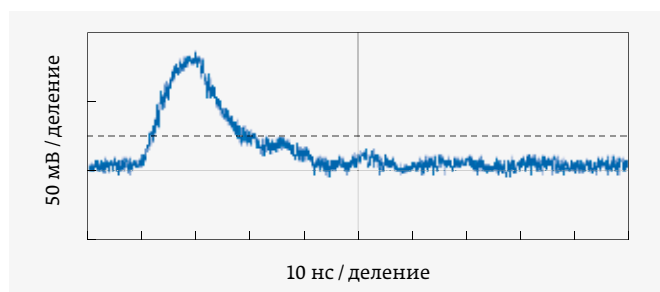


Рис. 19. Отклик усилителя на импульс тока, имитирующий сигнал кремниевого детектора

19-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ

ChipEXPO-2021

КОМПОНЕНТЫ | ОБОРУДОВАНИЕ | ТЕХНОЛОГИИ

ВЫСТАВКА ПРОЙДЕТ

14-16.09

В ТЕХНОПАРКЕ ИННОВАЦИОННОГО ЦЕНТРА

СКОЛКОВО



ТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭКСПОЗИЦИИ:

- Экспозиция Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, включая:
 - экспозицию предприятий, являющихся изготовителями изделий, включенных в единый реестр российской радиоэлектронной продукции [Постановление Правительства РФ №878]
 - экспозицию разработок, созданных в рамках государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013-2025 годы» [Постановление Правительства РФ №109]
 - экспозицию разработок, обеспечивающих выполнение приоритетных национальных проектов.
- Дивизионы кластера «Радиоэлектроника» ГК «Ростех»
- Стартапы в электронике
- Квалифицированные поставщики ЭКБ
- Консорциумы и дизайн-центры по электронике
- Участники конкурса «Золотой Чип»
- Корпорация развития Зеленограда

ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА:



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



ОРГАНИЗАТОРЫ:

ЗАО «ЧипЭКСПО» Москва, 121351, ул. Ярцевская, д.4. Тел.: +7 (495) 221-50-15
E-mail: info@chipexpo.ru <http://www.chipexpo.ru>

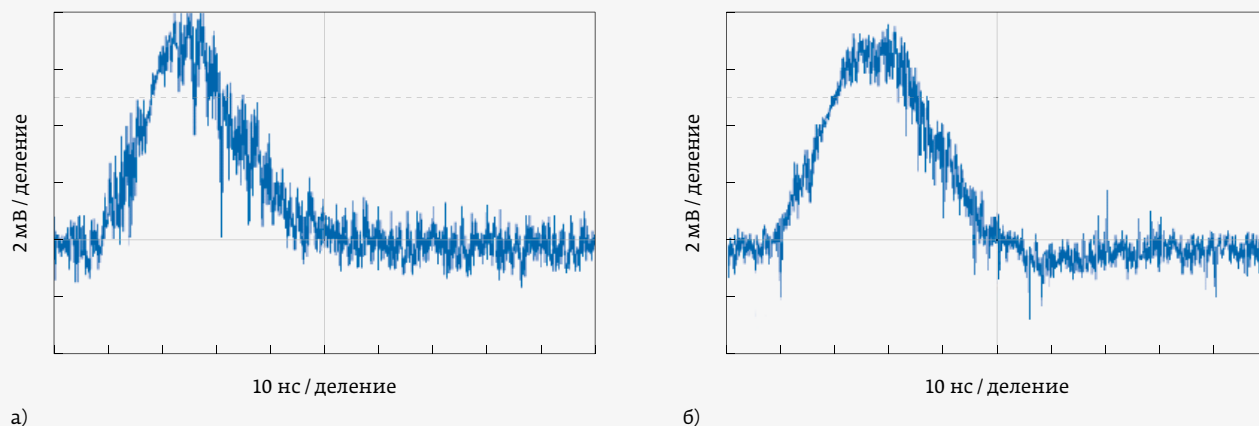


Рис. 20. Отклик усилителя на сигнал детектора от α -частиц с энергией 5 МэВ: а – при емкости детектора 30 пФ; б – при емкости детектора 300 пФ

для съема сигналов с кремниевых детекторов для формирования быстрых сигналов, сравнимых по длительности с временем сбора носителей в детекторе.

Разработанный усилитель можно использовать в качестве прототипа в СИМС для кремниевых детекторов, дополнительную фильтрацию шума обеспечит узкополосный шейпер, расположенный на выходе усилителя.

ШЕЙПЕРЫ

Термин «шейпер», широко используемый в ядерной электронике, применяется для функционального блока считывающей электроники, который выполняет задачу оптимизации амплитудных и / или временных измерений сигналов детектора. В других разделах электроники шейпер называют фильтром или усилителем-формирователем. В данной статье мы отметим особенности применения фильтров для схем с кремниевыми детекторами. Задачи, которые решает шейпер – это формирование оптимального для измерений отклика сигнала на выходе шейпера

при достижении наилучшего отношения сигнал-шум и уменьшение полосы сигнала для исключения наложения спектров, а также другую полезную обработку сигнала [3, 4, 5]. Очевидно, что достичь совместной оптимизации формы отклика и шумов возможно при некотором компромиссе требований, предъявляемых к устройству. Например, при максимизации отношения сигнал-шум может быть не обеспечена требуемая форма сигнала. Изменение формы сигнала и подавления шумов (помех) требует использования частотно-зависимых схем, что говорит о том, что шейпер можно отнести к классу электрических фильтров.

В общем случае, в измерительном канале может использоваться несколько шейперов, первые из которых, как правило, расположены сразу за головным усилителем и реализуются для кремниевых детекторов в аналоговом варианте. Различают несколько видов фильтров (шейперов), которые можно применять в СИМС для СЭ кремниевых детекторов:

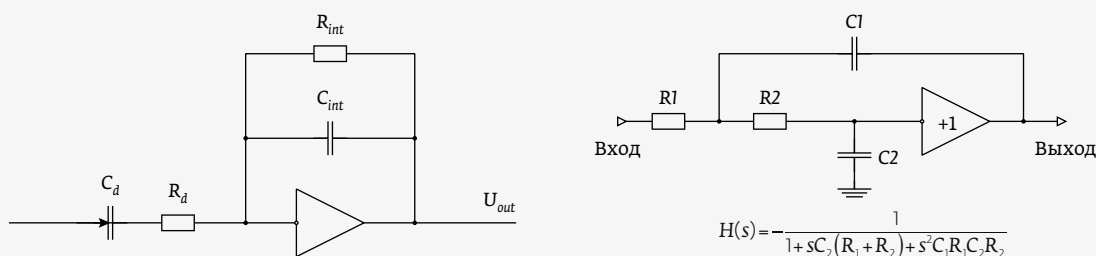


Рис. 21. Схемы инвариантных фильтров первого (слева) и второго (справа) порядков (а также передаточная функция для фильтра второго порядка)

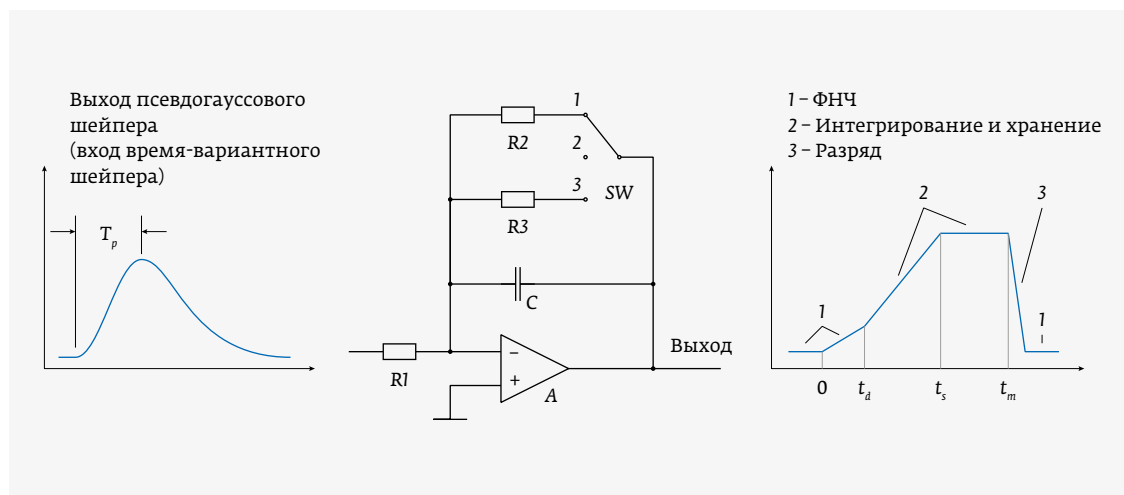


Рис. 22. Время-вариантный шейпер с «идеальным» интегрированием

- по схемотехнической реализации: аналоговые, аналогово-цифровые и цифровые фильтры;
- по форме импульсной характеристики для цифровых фильтров: конечная (КИХ) или бесконечная (БИХ) во времени импульсная характеристика;
- по изменению характеристик фильтра во времени: неизменяемые, или время-инвариантные, и изменяемые (например, работающие только во временном окне), или время-вариантные, фильтры [2];
- адаптивные фильтры, которые автоматически или по внешней команде могут изменять форму отклика, оптимизируя при этом отношение сигнал-шум.

Исследованию схемотехнических решений и алгоритмов фильтрации сигналов различных детекторов посвящено множество публикаций ([2] и библиография к [2]). Однако, для многоканальных СИМС для кремниевых детекторов существенным ограничением является площадь, занимаемая шейпером на кристалле или плате, и его потребляемая мощность.

В настоящее время наибольшее распространение для кремниевых детекторов получили инвариантные аналоговые шейперы с бесконечной импульсной характеристикой вида CR-RC. Используются также шейперы с Т-модем (проект ZEUS) и шейперы с положительной обратной связью. Схемы фильтров первого [7] и второго порядков с положительной обратной связью, а также передаточная функция для фильтра второго порядка приведены на рис. 21. Более высокие порядки шейпера (более третьего) достигаются каскадированием шейперов низкого порядка для обеспечения устойчивости и стабильности его параметров. Шейпер состоит из одной-двух дифференциальных CR-цепочек и n RC-интегрирующих цепочек (интегрирующее звено получается путем исключения конденсатора C_d на рис. 21).

Время-вариантный шейпер изменяет свой алгоритм работы на отдельных отрезках времени в процессе выполнения фильтрации. Этот тип шейперов не нашел

широкого применения для кремниевых детекторов, но в случае его установки, как правило после основного CR-RC-шейпера, может улучшить характеристики измерительного канала. В основном используются три типа время-вариантного шейпера: схема интегрирования в ограниченном по времени окне, схема мультикорреляционной выборки и свертка импульсной характеристики (использование отсчетов импульсной характеристики и весовых функций различных типов фильтров, например, фильтра Бесселя). Работу время-вариантных шейперов удобнее рассматривать во временной области, то есть когда выходной сигнал U_{out} связан с входным U_{in} через импульсную характеристику $h(t-\tau)$ ($-\infty < \tau < t$) и интеграл Дюамеля $U_{out} = \int_{-\infty}^t U_{in}(\tau)h(t-\tau)d\tau$, а время-инвариантных шейперов – в частотной области через преобразование Фурье.

Интегрирование в окне времени с трапецеидальной весовой функцией первым предложил Радека [2], используя «идеальное» интегрирование. Принцип работы фильтра схематично представлен на рис. 22. Входным сигналом фильтра является псевдогауссовый импульс предыдущего фильтра. Ключ SW в отсутствии сигнала и на начальном

ООО "Руднев-Шляев"

Разработка и производство:

- платы сбора данных
- измерительные приборы
- виброакустические системы
- инструментальные решения задач заказчика

Москва (495) 787-63-67
(495) 787-63-68

www.rudshel.ru
adc@rudshel.ru

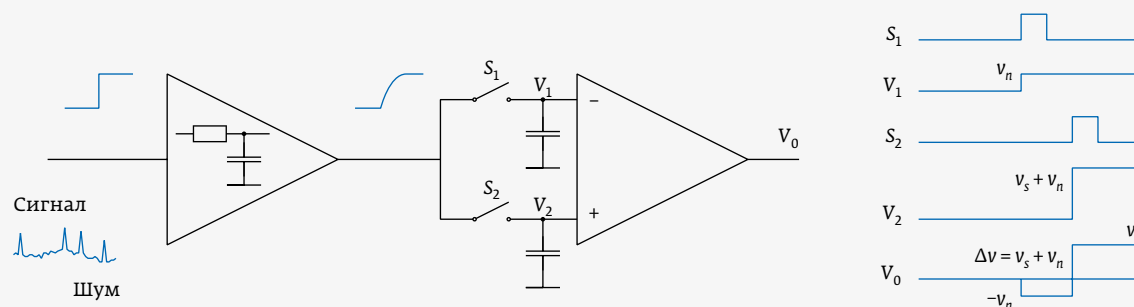


Рис. 23. Двойная корреляционная выборка (v_1 – первая выборка (пьедестал), v_2 – вторая выборка (сигнал плюс пьедестал), v_s – разность между выборками, которая соответствует амплитуде чистого сигнала)

его участке t_d (на котором в реальном интеграторе снижается точность) обеспечивает работу схемы в режиме фильтра низкой частоты. На участке $t_d t_s$ производится интегрирование сигнала и на участке $t_s t_m$ интегратор переводится в режим хранения; в момент t_m производится сброс интегратора.

Отметим несколько свойств интегратора со сбросом в канале с кремниевым детектором. Коэффициент передачи равен $k(s) = -1/(sRC)$ (RI на рис. 22). Это означает, что падение коэффициента усиления с частотой составляет -20 дБ/декаду, то есть происходит подавление высоких частот. Базовая линия более стабильна,

чем у CR-RC-шейпера и устанавливается значительно быстрее. Плоская вершина уменьшает баллистический дефицит и его разброс, что позволяет получить более высокую точность измерений (возможно усреднение по нескольким точкам). Длинный спад сигнала резко сокращается. Форма сигнала на выходе не соответствует форме на входе. Стационарный процесс шума на входе превращается в нестационарный. Это означает, что при одной и той же выходной амплитуде шум может быть разным. Собственный шум интегратора равен $e_n \approx (4kTR/2C)^{1/2}$, где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

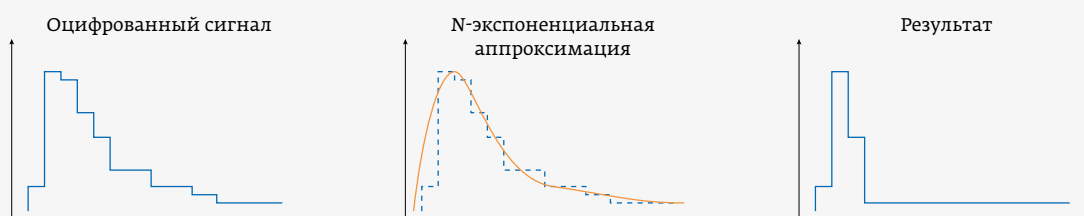
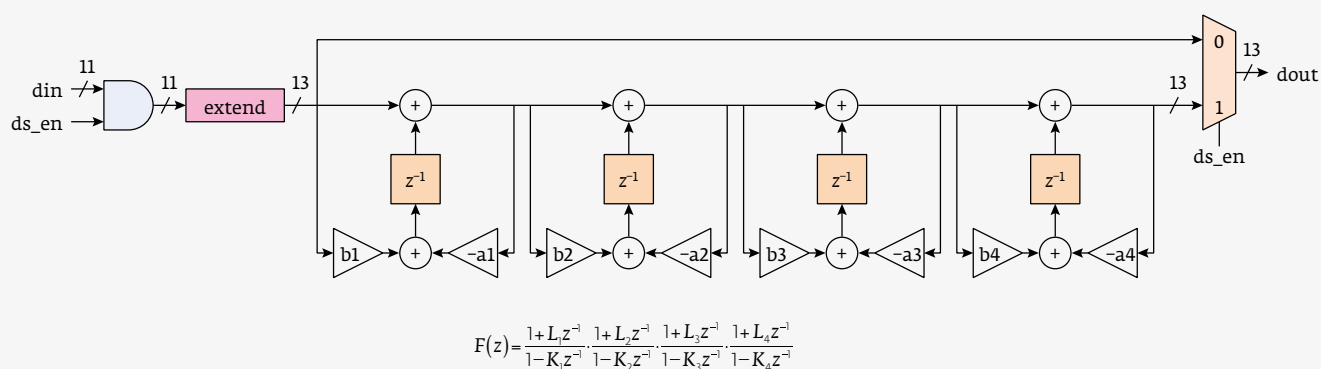


Рис. 24. Структура цифрового фильтра СИМС SAMPA, передаточная функция и результат фильтрации

Схему интегратора легко реализовать в цифровом виде. В этом случае схема представляет собой сумматор, на один вход которого поступает входной сигнал, а на второй вход – задержанный на такт выходной сигнал.

Схема двойной корреляционной выборки [2] выполняет функции стабилизации базовой линии и хранения аналоговых выборок сигнала (рис. 23). Поскольку работа ускорителя синхронизована с электроникой, то сначала берется выборка базовой линии, затем выборка сигнала с базовой линии и происходит вычитание базовой линии. На выходе фильтра появляется «чистый» сигнал. Для кремниевых систем редко встречается случай, когда отсутствует CR-RC-шейпер в реальном эксперименте, а присутствует только фильтр низкой частоты. Следует отметить, что если загрузка канала высока и электроника имеет высокое быстродействие, то в схеме возможен подъем высокочастотных шумов за счет изменения фазы и сложения ВЧ шумовых выбросов. Схема на основе подобного принципа работы была использована в проекте D0 (СИМС SVX).

Примером время-вариантного фильтра служит фильтр на переключаемых конденсаторах (аналогично СИМС APV25), в которых емкости конденсаторов играют роль весовых коэффициентов [16].

Следует отметить, что время-вариантные фильтры могут занимать значительную площадь на кристалле, поскольку в них нужно предусмотреть управление ключами, что ограничивает их применение в кремниевых системах. В некоторых случаях обработка сигналов во время-вариантном фильтре требует больше времени, чем во время-инвариантном фильтре с теми же параметрами.

В современных СИМС существует тенденция применения аппаратных цифровых фильтров, поскольку современные интегральные технологии позволяют выполнить требования по потребляемой мощности, быстродействию и размерам шейпера. Цифровой фильтр, симметрирующий форму отклика, использован в СИМС SAMPА (ALTRO) (рис. 24) [17].

Фильтр содержит четыре каскада первого порядка с коэффициентами L_i и K_i ($i=1...4$), которые определяют фильтрующие свойства каждого каскада и создают на входе сумматоров отсчеты a_i и b_i . Элемент задержки z^{-1} обеспечивает суммирование предыдущего значения с последующим, тем самым, в соответствии с функцией $F(z)$, ускоряя спад входного сигнала.

Приведенные примеры иллюстрируют базовые варианты реализации шейперов для систем с кремниевыми детекторами.

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. **Воронин А.** Аналого-цифровое преобразование в измерительном канале с кремниевым детектором // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 4.
2. **Spieler H.** Semiconductor Detector Systems. – John Wiley Oxford University Press, New York U. S. A., 2005.
3. **Воронин А.** Шумовые свойства и параметры сигналов в головной части канала считывающей электроники для кремниевых детекторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 10.
4. **Воронин А.** Структура каналов для считывающей электроники кремниевых детекторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 2.
5. **Grybos P.** Front-end Electronics for Multichannel Semiconductor Detector Systems. Warsaw: Institute of Electronic Systems. Warsaw University of Technology. 2010.
6. **Kaplon J.** Challenges and advantages making analog front-ends (for Silicon Strip Detectors) in deep submicron technology // <https://slideplayer.com/slide/7081227/>.
7. **Atkin E., Bulbakov I., Gusev A., Malankin E., Voronin A. et al.** Development of the read-out ASIC for muon chambers, Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 675. No. 4. P. 042030.
8. **Adams J. H., Voronin A. et al.** The CR-1 chip: custom VLSI circuitry for cosmic rays. – Proceedings of the 26th ICRC, 1999. V. 5, Salt Lake City, P. 69.
9. **Bonvicini V., Orzan G., Zampa G., Zampa N.** CASIS1.0: A prototype VLSI front-end ASIC with ultra-large dynamic range and integrated ADC for silicon calorimetry in space experiments. – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007) 340–344.
10. **Atkin E., Voronin A., Karmanov D., Kudryashov I., Podorozhniy D., Shumikhin V.** The read-out ASIC for the Space NUCLEON project JINST 10 (2015) 04, C04005.
11. **Arodzero A. A., Bashindzhagyan G. L., Ermolov P. F., Khlynov E. A., Kuznetsov E. N., Savin A. A., Voronin A. G.** Electromagnetic Silicon Module Calorimeter. – Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 23A (1991) 45–50 45.
12. **Santiard J. C., Beusch W., Buytaer S., Enz C. C., Heijne E., Jarron P., Krummenacher F., Maren K.,**

ООО
СМП



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

**электронные
для поверхностного
монтажа**

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

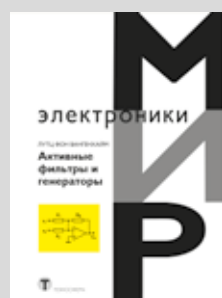
- Керамические конденсаторы до 100 мкф
- Синфазные дроссели на ток 10 А




Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
 Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

- Piuz F.** GASPLEX, a low noise analog signal processor for readout of gaseous detectors. – CERN-ESP/94–17.
13. **Аткин Э. В., Волков Ю. А., Воронин А. Г., Ильющенко И. И., Силаев А. С., Феденко А. Ю.** Многоканальный зарядово-чувствительный усилитель для регистрации сигналов двухсторонних кремниевых детекторов трековой системы проекта CBM // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 3, С. 1–4.
 14. **Kasinski K.** Ph.D. Thesis Multichannel Integrated Circuits for Silicon Strip Detectors Readout with Timestamping and Amplitude Pulse Measurement. – Kasinski AGH University of Science and Technology.
 15. **Аткин Э. В., Воронин А. Г., Клюев А. Д., Меркин М. М.** Быстрый токовый предусилитель для кремниевых детекторов // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6, С. 1–4.
 16. **Frencha M. J., Jonesa L. L., Morrisseya Q., Neviania A., Turchetta R. et al.** Design and results from the APV25, a deep sub-micron CMOS front-end chip for the CMS tracker. – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 466 (2001). PP. 359–365.
 17. The ALICE Collaboration Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Read-out & Trigger System. – CERN-LHCC-2013-019 / LHCC-TDR-015 2014. PP. 45–55.
 18. **Atkin E., Malankin E., Samsonov V., Shumikhin V., Voronin A. et al.** 32-channel self-triggered ASIC for GEM detectors // 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL), Nis, 2017, pp. 225–228.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 840 руб.

АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ И ГЕНЕРАТОРЫ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СХЕМОТЕХНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МИКРОСХЕМ

Лутц фон Вангенхайм

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2010. — 416 с.,
ISBN 978-5-94836-247-2

Эта книга, посвященная активным фильтрам, знакомит читателя с современными методами обработки аналогового сигнала. Материал изложен в таком объеме и настолько подробно, как никогда ранее в немецкой специализированной литературе.

Основные темы книги: системно-теоретические основы, схемотехника активных цепей с использованием обычных и новых усилителей I_C (усилители, интеграторы и преобразователи полного сопротивления), проектирование, расчет и сравнение различных схем фильтров, использование компьютерных программ при проектировании фильтров, проектирование и модулирование фильтров с переключаемым конденсатором; генераторы синуса с интегрированными усилителями.

Книга является удобным справочником для инженеров и исследователей, желающих освежить свои знания о технике фильтров, а также познакомиться с новыми методами и элементами. Но данное издание может стать и учебником для людей, изучающих технику передачи информации и связи, а также сходных направлений, которые, обладая общей системно-теоретической базой, хотят работать в области фильтров.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

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



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ СЕРИЮ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Уникальность этой серии в том, что в редакционный совет вошли крупнейшие специалисты в данной области, которые в силу своих профессиональных обязанностей хорошо представляют как направление развития современных технологий, так и их востребованность в нашей стране. Члены редакционного совета принимают участие и в отборе книг для серии, и в научном редактировании, обеспечивая их высокий уровень. В настоящий момент в серии вышло более 30 книг.



Издательство «ТЕХНОСФЕРА» совместно с Департаментом РЭП Минпромторга РФ приглашает руководителей и специалистов предприятий радиоэлектронной промышленности к участию в издании серии «Мир радиоэлектроники».



Если у Вас есть желание издать свою книгу или принять участие в научном редактировании переводного издания, направляйте Ваши предложения по адресу redsovet_knigi@electronics.ru

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: +7 495 956-33-46
E-mail: knigi@technosphaera.ru
sales@technosphaera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphaera.ru