

# ГОЛОВНОЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ ПОРТАТИВНОГО ДОЗИМЕТРА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОГО ДЕТЕКТОРА "ДО-РА.МОДУЛЬ"

А.Воронин<sup>1</sup>, В.Елин<sup>2</sup>, И.Кудряшов<sup>3</sup>, М.Меркин<sup>4</sup>

УДК 539.1.074  
ВАК 05.11.00

В рамках проекта "ДО-РА", проводимого при поддержке Фонда "Сколково" и кластера ядерных технологий Технопарка "Сколково", было создано семейство портативных дозиметров-радиометров, сопрягаемых с сотовыми телефонами и другими мобильными устройствами. Перспективным решением для портативных дозиметров такого класса является применение кремниевых детекторов, которые позволяют повысить эффективность регистрации различных видов излучений и уменьшить габариты устройства. Для считывания и преобразования сигнала кремниевого детектора необходим головной усилитель, который обеспечивает требуемый динамический диапазон и чувствительность дозиметра. Авторы предлагают два схемотехнические решения для головного усилителя с биполярным и однополярным питанием и анализируют характеристики созданных на их базе прототипов.

Свойства кремниевых детекторов позволяют регистрировать различные виды ионизирующих излучений, а также нейтронное излучение. В частности, использование кремниевых детекторов в дозиметре "ДО-РА.Модуль" дает возможность с достаточной эффективностью измерять дозы альфа-, бета- и гамма-излучений. Преимуществом кремниевых детекторов являются минимальные габаритные размеры по сравнению с другими видами датчиков. Кроме того, для питания кремниевых детекто-

ров требуется относительно низкое напряжение (от 20 до 60 В). Для согласования кремниевых детекторов с последующей низковольтной электроникой не требуется сложных схем защиты, а малая потребляемая мощность и малое напряжение смещения снижают требования к блоку питания детектора.

Современная элементная база позволяет создать простое и компактное схемотехническое решение для головного усилителя для считывания сигнала с кремниевых детекторов. Рассмотрим архитектуру головного усилителя и выберем элементную базу, в максимальной степени отвечающую требованиям к этой схеме.

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ГОЛОВНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Головной усилитель для считывания сигналов с кремниевых детекторов обычно содержит несколько каскадов. Первый (подключенный к кремниевому датчику) каскад представляет собой преобразователь заряда (тока) детектора в импульс напряжения. После первого каскада следует активный фильтр, который осуществляет фильтрацию шумов

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцина МГУ имени М.В.Ломоносова, voronin@silab.sinp.msu.ru.

<sup>2</sup> ОАО "Интерсофт Евразия", elin@intersofteurasia.ru.

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцина МГУ имени М.В.Ломоносова, ilya.kudryashov.85@gmail.com.

<sup>4</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцина МГУ имени М.В.Ломоносова, merkinm@silab.sinp.msu.ru.

и формирование удобного для дальнейшей обработки сигнала заданной формы. В схеме головного усилителя после активного фильтра включен дополнительный широкополосный малозумящий усилитель напряжения, после которого следует согласующий аналоговый драйвер, обеспечивающий работу усилителя на низкоомную нагрузку. Кроме того, на выходе драйвера обычно включают компаратор для регистрации сигнала.

Как правило, первый каскад выполняют по схеме зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ), который представляет собой усилительный каскад, охваченный общей емкостной связью. Поскольку импеданс кремниевого детектора носит емкостной характер, для согласования датчика и ЗЧУ необходимо минимальное применение шумящих элементов, таких как резисторы и полупроводниковые приборы. В этом случае, при правильно выбранной схеме обратной связи ЗЧУ, шумовые свойства каскада определяются главным образом активным сопротивлением первого транзистора усилительного каскада. Для МОП-транзистора – это активное сопротивление канала  $R_k = 1/S$  (где  $S$  – крутизна МОП-транзистора в его рабочей точке), для биполярного транзистора – активное сопротивление базы  $R_b$ . Минимальное значение среднеквадратичного напряжения шума  $e_N$  (в случае МОП-транзистора) может быть достигнуто в области, где спектральная плотность шума имеет равномерный характер:

$$e_N^2 = 4kTR_k \Delta F_N,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура, а  $\Delta F_N$  – шумовая полоса фильтра.

Дополнительный шум, который вносит ток утечки транзистора, минимален для МОП-транзистора и, для современных малозумящих транзисторов в интегральном и дискретном исполнении, может не учитываться. Для биполярного транзистора, имеющего входной ток существенно выше МОП-транзистора, токовый шум увеличивает суммарный шум усилителя.

Остальные характеристики МОП- и биполярного транзисторов, от которых зависят шумовые характеристики схемы, в первую очередь  $R_k$ ,  $R_b$ , а также входная емкость, сравнимы по величине, поэтому наиболее предпочтительным для работы с кремниевыми детекторами являются операционные усилители (ОУ) с МОП-транзистором на входе. Шумовая спектральная плотность малозумящих МОП ОУ имеет величину 1–6 нВ/√Гц. Емкость обратной связи для дискретного ОУ с учетом снижения влияния паразитных емкостей печатной платы выбирается в диапазоне 1–10 пФ, амплитуда выходного импульса ЗЧУ при этом составляет порядка нескольких мВ.

Первый каскад может быть выполнен также по схемам усилителя тока или напряжения, но в этом случае трудно добиться малых шумов из-за наличия резистивных элементов схемы.

Импульс ЗЧУ в общем случае имеет короткий фронт и длинный экспоненциальный спад, возникающий при работе схемы обратной связи, которая, кроме интегрирования импульса тока детектора, должна поддерживать рабочую точку каскада в линейной области передаточной характеристики. Коэффициент преобразования заряда в напряжение равен  $1/C_{fb}$ , где  $C_{fb}$  – емкость обратной связи ЗЧУ.

Активный фильтр для схем дозиметрического контроля в первую очередь выполняет фильтрацию шумов предыдущих каскадов, а также помех, возникающих в детекторе и в последующих за ним каскадах. Поскольку шумы содержат широкополосную и  $1/f$  (фликкер-шум, где  $f$  – частота) составляющие, а различные помехи имеют спектр в области как низких, так и высоких частот, надежную фильтрацию шумов и помех обеспечивает только полосовой фильтр. Однако спектр импульса ЗЧУ имеет форму, аналогичную форме передаточной характеристики фильтра низких частот

$$\text{вида } S(i\omega) = \frac{1}{1+i\omega}.$$

Поэтому одновременно с фильтрацией в полосовом фильтре шумов и помех происходит падение коэффициента передачи амплитуды полезного сигнала на низких частотах. Оптимизация характеристик фильтра по всей совокупности параметров сигнала, шумов и помех требует поиска компромиссного решения и учета конкретных параметров используемых компонентов. Чтобы снизить аттенюацию сигнала фильтром, его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) должна иметь пологие скаты за полосой пропускания.

Второй функцией активного фильтра является преобразование формы импульса ЗЧУ из экспоненциальной в несимметричную квазиколоколообразную (с плоской вершиной). Такая форма оптимальна для последующего аналого-цифрового преобразования или формирования импульса при помощи компаратора.

Наиболее часто используют полосовой фильтр первого порядка, построенный на RC-цепочках. Такой фильтр имеет два звена – дифференцирующее (CR) и интегрирующее (RC). Сигнал на выходе фильтра при воздействии на входе импульса ЗЧУ представляет собой импульс, длительность которого определяется постоянными времени RC-звеньев. Увеличение порядка интегрирования фильтра обеспечивает симметрирование формы выходного импульса и повышает подавление шумов. Для CR-RC-фильтра четвертого порядка по сравнению с фильтром первого порядка

шумовая полоса сужена в 4,2 раза, при этом аттенюация амплитуды примерно равна 2, то есть улучшение отношения сигнал-шум составляет не более 2,1 раза. Но реализация более высокого порядка интегрирования требует дополнительных аппаратурных затрат. Абсолютная аттенюация амплитуды в фильтре первого порядка CR-RC равна 0,37 от амплитуды входного сигнала. Таким образом, во многих случаях падение коэффициента передачи фильтра компенсируется дополнительным усилением. При этом возникает риск повышения уровня шумов, если параметры каскадов, следующих за ЗЧУ, имеют высокий шумовой коэффициент, поскольку коэффициент передачи для напряжения шумов в полосе фильтра не подвержен ослаблению.

Дополнительный малозумящий широкополосный усилитель напряжения предназначен для масштабирования напряжения импульсов на выходе головного усилителя для согласования его с динамическим диапазоном АЦП, порогом компаратора или другими устройствами, следующими за головным усилителем.

Для построения широкополосного усилителя напряжения наиболее приемлем ОУ с токовой обратной связью, который, как правило, имеет спектральную плотность шумов на уровне 1–4 нВ/√Гц, единичную полосу усиления порядка нескольких сотен МГц, высокую устойчивость (не склонен к самовозбуждению) и высокую нагрузочную способность (до 25 Ом).

Выходной драйвер является буферным согласующим элементом и также может быть построен на ОУ с токовой обратной связью.

На основе приведенного выше анализа была выбрана оптимальная структура головного усилителя, содержащая следующие каскады (рис.1):

- первый каскад – зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ);
- второй каскад – малозумящий широкополосный усилитель, состоящий из двух ОУ с возможностью юстировки усиления в широких пределах от 1 до 200. Точность юстировки определяется характеристиками резисторов обратной связи ОУ. Использование двух ОУ позволяет сохранять достаточно широкую (не менее 20 МГц) полосу пропускания при высоких значениях усиления (т.е. учитывается параметр "произведение усиления на полосу" – чем выше усиление, тем уже полоса пропускания). Применение

дополнительного усилителя перед фильтром снижает требования к параметрам ОУ, на базе которого построен следующий каскад – активный фильтр;

- третий каскад – активный фильтр, который, кроме функции формирования формы сигнала и фильтрации шумов и помех, выполняет функцию стабилизации базовой линии (отсекает флуктуирующую постоянную составляющую, усиленную в первых каскадах);
- четвертый каскад – драйвер, который служит для снижения влияния последующих устройств и линий связи на характеристики фильтра. Он обеспечивает низкий выходной импеданс головного усилителя для снижения воздействия помех на линию связи и (или) позволяет согласовать импеданс на обоих концах линии связи с помощью резистора, включенного последовательно с выходом драйвера.

### ВЫБОР И ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

Для выбора и экспериментальной проверки элементов и разработки базовой схемы головного усилителя устройства "ДО-РА.Модуль" был создан лабораторный стенд на основе тестовой платы (рис.2). На стенде отрабатывались различные варианты схемотехники и топологии головного усилителя с детектором либо его эквивалентом.

Лабораторный стенд позволяет выполнять следующие задачи:

- выбор типов ОУ для ЗЧУ и активного фильтра;
- оптимизацию параметров активного фильтра (минимизацию шумовых характеристик головного усилителя);
- измерение электрических характеристик головного усилителя с кремниевыми детекторами;

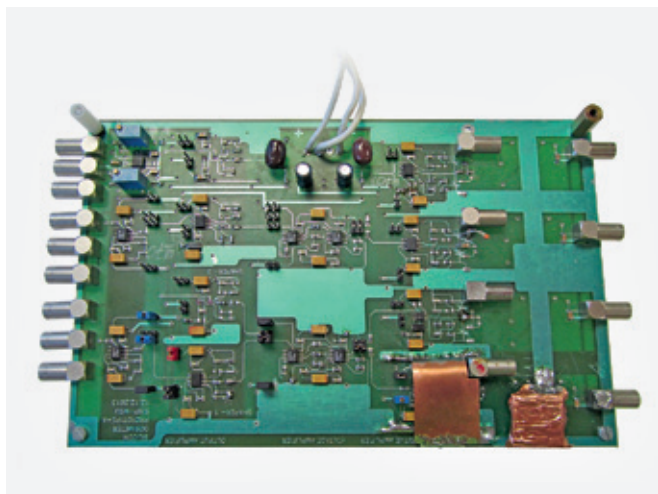


Рис.2. Тестовая плата с экранами для детектора и ЗЧУ

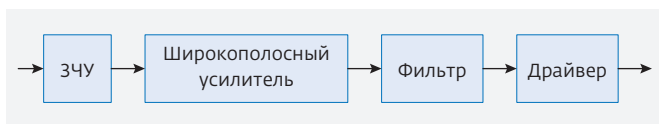


Рис.1. Структурная схема головного усилителя

- проверку работы детекторов "ДО-РА.Си" (DoRaSi) с подключенным головным усилителем при регистрации гамма-, бета- и альфа-излучения;
- оптимизацию базовой схемы и сравнение разных вариантов головного усилителя.

Для использования в схемах ЗЧУ и активного фильтра тестировались следующие микросхемы ОУ: ADA4817, AD8652 и MAX4489. Эти операционные усилители были выбраны по следующим основным критериям: спектральная плотность шумов не более  $6 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , полоса единичного усиления не менее 50 МГц, входной ток не более 0,1 нА.

Широкополосные усилители были собраны на операционных усилителях с токовой обратной связью MAX4181, коэффициент усиления которых задавался резистивной обратной связью. Активные CR-RC-фильтры первого порядка были выполнены на тех же типах ОУ, что и ЗЧУ. Выходные драйверы, собранные на ОУ MAX4181, обеспечивают подключение к измерительным приборам кабелями, согласованными на нагрузку 50 Ом.

В блоке компараторов используется микросхема LM393, содержащая два компаратора в корпусе, что позволяет сравнить частоту срабатывания компараторов с разными предустановленными порогами.

Тестирование ЗЧУ с выбранными типами ОУ показало следующие результаты.

MAX4489 подтвердил технические данные по спектральной плотности шумового напряжения на уровне  $5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , но при входной емкости 10 пФ интегральное шумовое напряжение оказалось выше примерно на 20%, чем у ADA4817 и AD8652. MAX4489 может быть применен в каскаде фильтра, но для использования в ЗЧУ он по измеренным параметрам уступает ADA4817 и AD8652.

ADA4817 наиболее приемлем в качестве базового усилителя для ЗЧУ, поскольку он обладает уровнем шума  $4 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  и входной дифференциальной емкостью 0,1 пФ, что подтверждено испытаниями. Его работоспособность гарантируется в диапазоне питающих напряжений 5–10 В.

AD8652 является компромиссным решением для ЗЧУ для напряжения питания в диапазоне 3–4 В, поскольку его функционирование гарантируется при напряжении питания 2,7–5,5 В. Этот ОУ имеет шум на уровне  $4,5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  и входную дифференциальную емкость 6 пФ. В результате, его интегральное шумовое напряжение получается на 10% выше, чем у ADA4817.

Таким образом, для построения каскада ЗЧУ были выбраны ОУ ADA4817 и AD8652 от Analog Devices, которые обеспечивают наиболее высокие характеристики ЗЧУ для применения в дозиметрах.

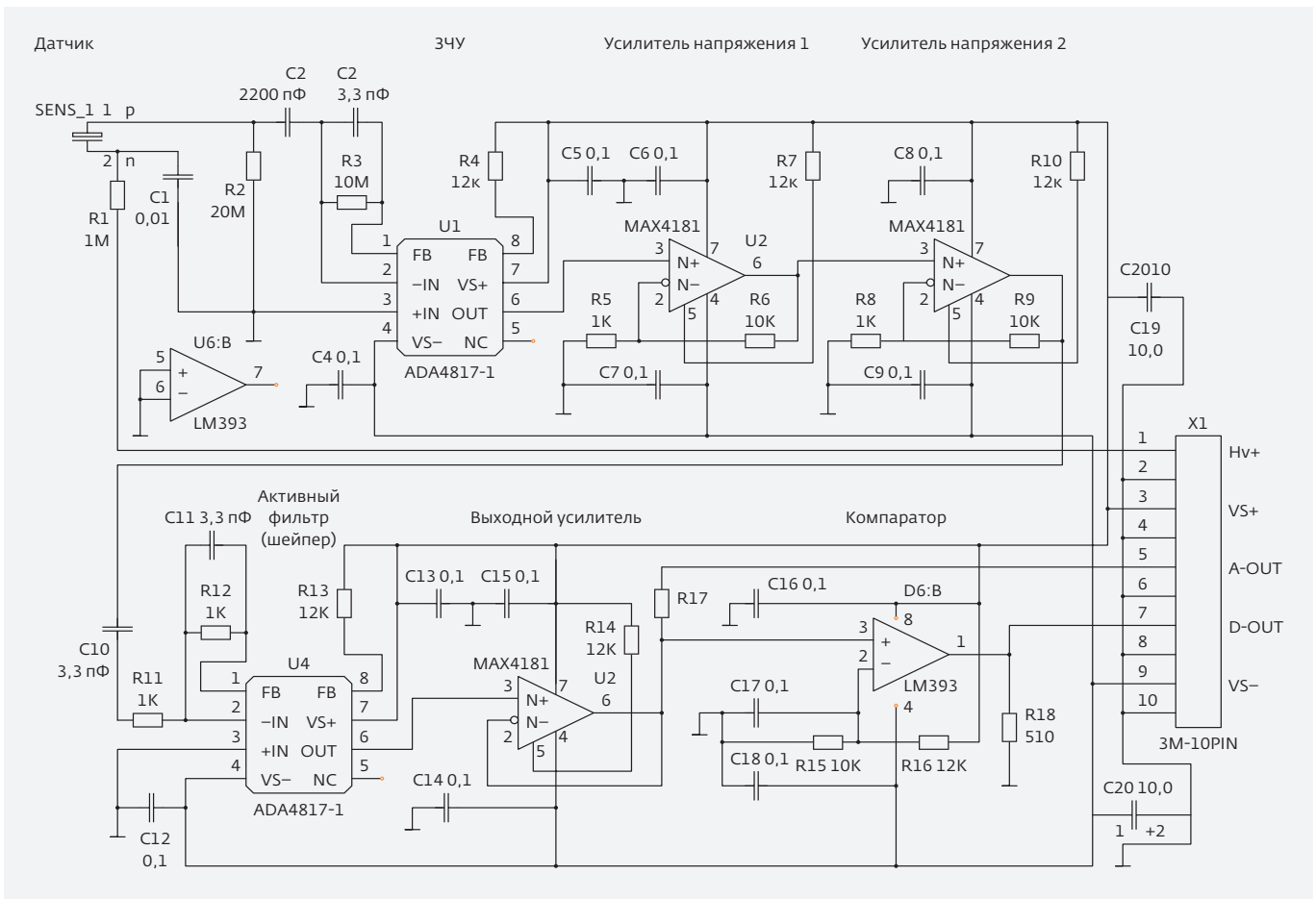


Рис.3. Схема головного усилителя на базе ОУ ADA4817

### ГОЛОВНОЙ УСИЛИТЕЛЬ С БИПОЛЯРНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ ±5 В

После выбора элементов и отработки базовой архитектуры была разработана электрическая схема головного усилителя на базе ОУ ADA4817 с биполярным напряжением питания ±5 В (рис.3). В этой схеме цепь обратной связи ЗЧУ на ОУ ADA4817 (U1) образуют резистор R3 (10 МОм) и конденсатор C3 (3,3 пФ). Элементы R1, C1, R2, C2 образуют цепь подключения детектора к ЗЧУ. На ОУ MAX4181 (U2 и U3) построен широкополосный усилитель, резисторы R5, R6, R8 и R9 позволяют регулировать коэффициент передачи усилителя. На ОУ ADA4817 (U4) собран

активный фильтр; элементами дифференцирующей цепи являются R11 (510 кОм), C10 (6,8 пФ); интегрирующую цепь образуют R12 (510 кОм), C11 (6,8 пФ). Аналоговый драйвер – MAX4181 (U5), компаратор – LM393 (D6).

В сравнительных испытаниях головной усилитель на ADA4817 показал наилучшие характеристики, поэтому на основе этой схемы была спроектирована и изготовлена печатная плата (рис.4) для компактного дозиметра-радиометра "ДО-РА.Модуль 1".

При проектировании печатной платы основное внимание было уделено минимизации площади платы и борьбе с помехами. Для снижения уровня шума применялось экранирование поверхности печатной платы за счет использования полигонов максимальной площади и регулярным расположением точек подключения полигонов к земле. Кроме того, на плате использовалась минимальная длина проводников сигнальных цепей и равномерное расположение фильтрующих элементов вдоль шин питания активных компонентов – операционных усилителей.

Эти меры позволили снизить общий уровень шумов и помех. Эквивалентный шумовой заряд в тракте

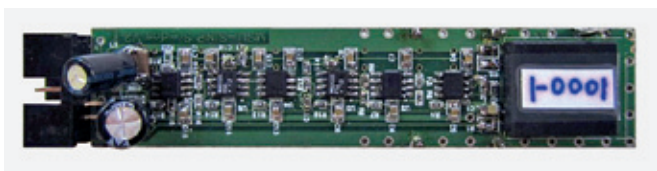


Рис.4. Печатная плата головного усилителя на базе ОУ ADA4817





Основные электрические параметры головного усилителя с биполярным питанием ±5 В

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	±5
Коэффициент усиления каскадов по напряжению, мВ/мВ:	
ЗЧУ	1,05
1-й промежуточный каскад усилителя	10,43
2-й промежуточный каскад усилителя	10,83
Усилитель-формирователь	0,32
Выходной каскад	2,01
Время достижения максимума сигнала активного фильтра (шейпера), мкс	3
Коэффициент передачи, мВ/пК	12,12
Максимальная выходная амплитуда, мВ	1400
Ток потребления, мА	0,05
Эквивалентный шумовой заряд, приведенный ко входу, электронов ( $C_d=0$ )	722

усиления составил около 800 электронов при отсутствии детектора на входе, что на 200 электронов ниже, чем на тестовой плате (рис.2).

В ходе испытаний платы головного усилителя были сняты осциллограммы откликов ЗЧУ, активного фильтра и драйвера на тестовый прямоугольный импульс на входе ЗЧУ (рис.5), а также измерены основные параметры усилителя (см. табл.). Был также измерен уровень шума в тракте усиления для трех смонтированных плат головного усилителя (рис.6).

Работоспособность головного усилителя с биполярным питанием ±5 В была проверена с детектором компании First Sensor и детектором DoRaSi проекта "ДО-РА.Модуль1" с помощью источника β-излучения Fe55 (рис.7). Как показали измерения, эквивалентный шумовой заряд тракта усиления с каждым из этих детекторов составил не более 1020 электронов.

### ГОЛОВНОЙ УСИЛИТЕЛЬ С ОДНОПОЛЯРНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ 3,7 В

Альтернативный вариант решения для головного усилителя – схема с однополярным напряжением питания 3,7 В. При создании ЗЧУ на базе ОУ с однополярным питанием необходимо обеспечить смещение на его неинвертирующем входе для того, чтобы каскад работал на линейном участке передаточной характеристики. Шум цепи смещения в этом случае имеет тот же коэффициент передачи  $K$ , что и коэффициент передачи напряжения шумов входного транзистора инвертирующего входа:  $K=1+C_d/C_{fb}$ , где  $C_d$  и  $C_{fb}$  – емкости детектора и цепи обратной связи ЗЧУ соответственно. Очевидно, что шум цепи смещения должен быть существенно ниже, чем шум инвертирующего входа, чтобы вклад шума цепи смещения в общий шум ЗЧУ был минимален. Эти рассуждения применимы и к внешним помехам, возникающим в цепи смещения. При использовании биполярного источника питания неинвертирующий вход ОУ подключен к очищенной от помех

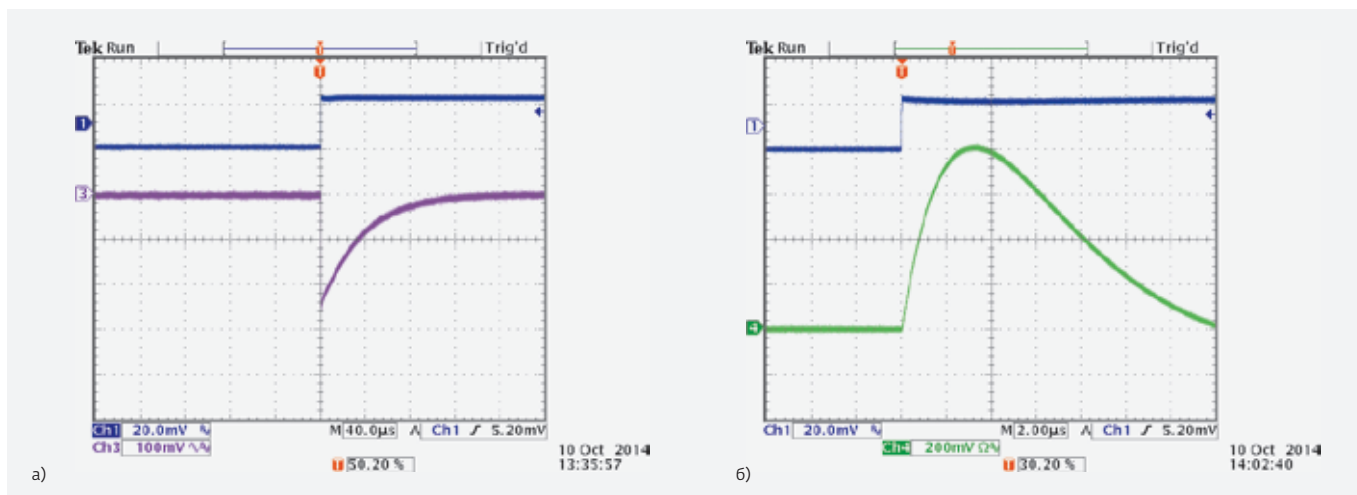


Рис.5. Отклик ЗЧУ (а) и активного фильтра (б) на прямоугольный тестовый импульс

земле, что минимизирует шумы и помехи в широком частотном диапазоне, включая ультранизкие и высокие частоты.

Смещение на неинвертирующем входе ОУ можно создать при помощи простого резистивного делителя, к средней точке которого подключена достаточно большая емкость, образующая вместе с резисторами делителя фильтр низких частот.

Другим способом создания смещения является применение активных опорных источников, однако, они, так же, как и резисторы, являются шумящими элементами и требуют дополнительной фильтрации напряжения смещения.

Снижение величины питающего напряжения усилителя до величины 3...3,7 В негативно влияет на характеристики этого устройства. Как правило, при таких напряжениях питания характеристики аналоговых микросхем и, в частности ОУ, хуже, чем при питающих напряжениях порядка 10 В, что и было показано при сравнительном тестировании. В общем случае следует ожидать роста уровня шумов в схеме с однополярным источником питания по сравнению со схемой, использующей биполярный источник питания.

При разработке усилителя с напряжением питания 3,7 В за основу была взята базовая архитектура версии с биполярным питанием: ЗЧУ, широкополосный усилитель, фильтр (шейпер) и аналоговый драйвер. Схема была дополнена блоком опорного источника и блоком источника смещения кремниевого детектора (рис.8). Чтобы снизить склонность усилителя к самовозбуждению, в этой схеме используются два опорных источника.

Электрическая схема головного усилителя с напряжением питания 3,7 В практически не изменилась по сравнению со схемой с биполярным питанием за исключением двух элементов: ОУ ADA4817 заменен на ADA8652, а ОУ MAX4181 на LT6210 (см. рис.3). Блок источника смещения кремниевого детектора включает в себя источник смещения и схему его запуска, как в автономном режиме, так и от внешнего контроллера (рис.9). Блок опорного источника содержит собственно опорный регулируемый источник и драйвер-фильтр низкой частоты второго порядка, построенный по схеме Саллена-Кея (рис.10).

Источник смещения детектора работает в циклическом режиме для снижения помех, создаваемых



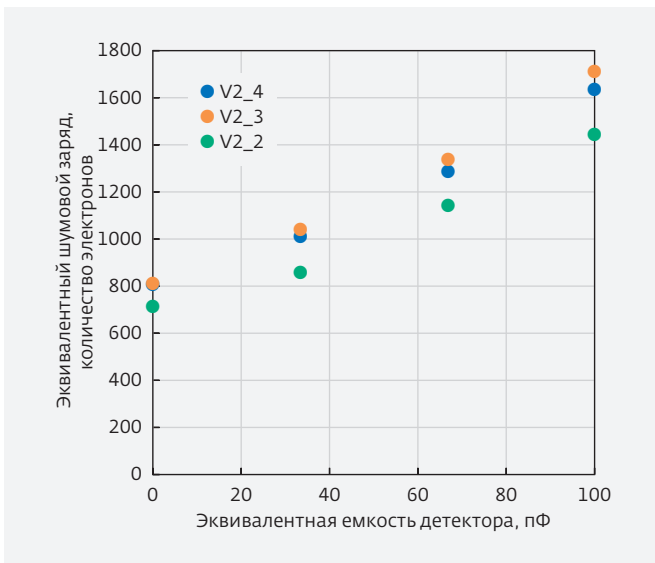


Рис.6. Зависимость эквивалентного шумового заряда образцов усилителя от эквивалентной емкости детектора

импульсной схемой преобразования низкого (3,7 В) в высокое (40...60 В) напряжение. Схема запуска сначала включает схему преобразования напряжения и заряжает накопительный конденсатор, подключенный к детектору, а затем выключает схему преобразования. Накопительный конденсатор медленно разряжается током смещения детектора (~ 1-10 нА). Далее следует новый цикл подзарядки накопительного конденсатора.

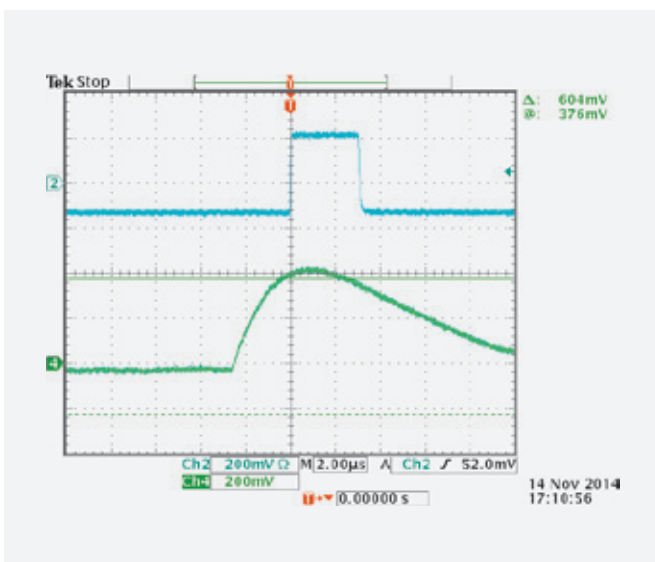


Рис.7. Отклики аналогового драйвера (канал 4) и компаратора (канал 2) при воздействии на детектор источника излучения Fe55

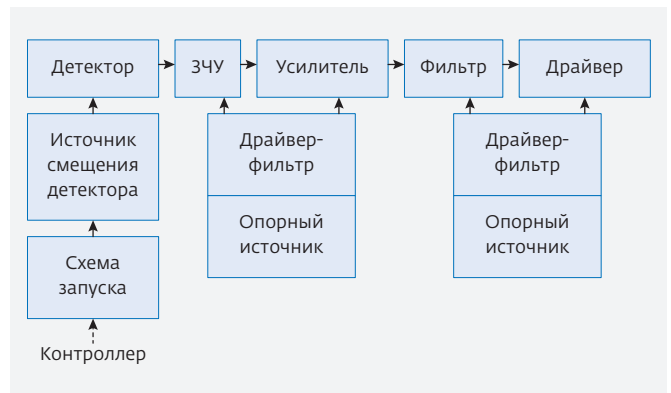


Рис.8. Структурная схема усилителя с напряжением питания 3,7 В

Экспериментальная проверка головного усилителя с напряжением питания 3,7 В показала соответствие основных характеристик расчетным значениям. Осциллограммы контрольных точек на выходах ЗЧУ и активного фильтра аналогичны осциллограммам

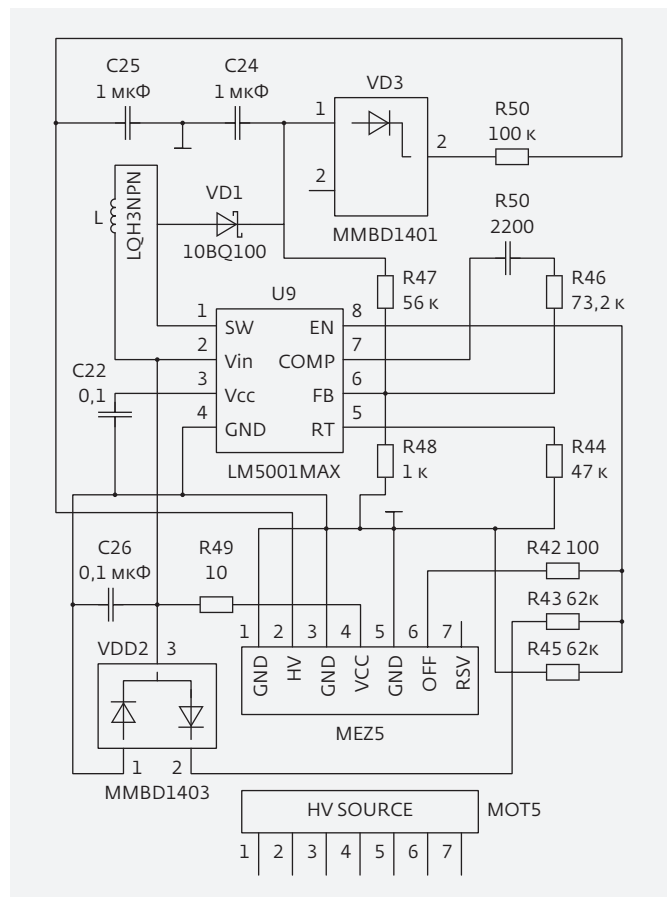


Рис.9. Схема источника питания кремниевого детектора

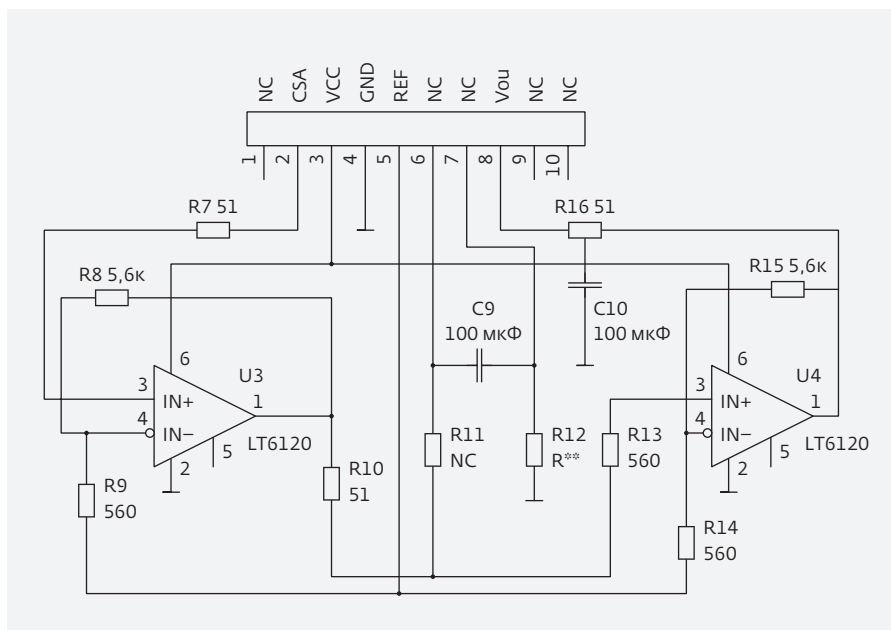


Рис.10. Схема опорного источника с фильтром Сайлена-Кея

для усилителя с биполярным питанием (см. рис.5). Отклик усилителя с детектором на воздействие излучения от источника Fe55 также соответствует отклику усилителя с биполярным питанием (см. рис.7).

Шумовые свойства этого варианта усилителя хуже, чем у усилителя с биполярным питанием: эквивалентный шумовой заряд соответствует 1800 электронам с детектором и 1400 электронам без детектора. Увеличение шумов связано с усилением шумов в цепи смещения ЗЧУ. Величина измеренного эквивалентного шумового заряда, тем не менее, приемлема для использования усилителя в приборах дозиметрического контроля.

\*\*\*

Экспериментальная проверка предложенных авторами вариантов схемы головного усилителя дозиметра "ДО-РА.Модуль 1" с кремниевым детектором подтвердила расчетные параметры.

Все технические решения, описанные в данной статье, либо защищены патентами, либо по отдельным решениям поданы авторские заявки на получение патентов на полезные модели и изобретения. ●