

М. В. Егоров, Р. В. Неронский

АО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств», Калуга, Россия

СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ ПРИЕМНОГО ТРАКТА АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

В статье приведены схемные решения, предлагаемые для преобразования и усиления электрического сигнала, принятого из рассеянного атмосферой оптического излучения при построении атмосферной оптической линии связи со скоростью передачи 1–4 Мбит/с. Рассмотрены трансимпедансный и зарядочувствительный предварительные усилители, а также схема АРУ на микросхемах операционных усилителей повышенного быстродействия.

Ключевые слова: АОЛС, рассеянный свет, УФ-С оптический диапазон.

Для цитирования: Егоров М. В., Неронский Р. В. Схемные решения отдельных каскадов приемного тракта атмосферной оптической линии связи // Радиопромышленность. 2017. № 3. С. 60–67.

M. V. Egorov, R. V. Neronskey

Joint-stock Company Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices, Kaluga, Russia

CIRCUIT SOLUTIONS OF SEPARATE CASCADES OF THE RECEIVE PATH OF THE ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINE

The article contains the circuits proposed for converting and amplifying of electrical signals while receiving the dissipated by air optical emission for the purposes of constructing Atmosphere Optical Connection Line with the transfer rate 1–4 M bit per second. Discussed the application of trans-impedance and charge-sensitive preamplifier with the addition of AGC-circuit by the IC of high speed Operational Amplifiers.

Keywords: trans-impedance preamplifier, charge-sensitive preamplifier, AGC-amplifier.

For citation: Egorov M. V., Neronskey R. V. Circuit solutions of separate cascades of the receive path of the atmospheric optical communication line. Radiopromyshlennost, 2017, no. 3, pp. 60–67 (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2017-3-60-67

Обсуждаемые схемные решения прорабатываются в качестве перспективных вариантов доработки электронной части оптического модуля системы связи ОКР «Вилка», разработанного в Государственном оптическом институте (ГОИ).

В приемной части системы основным вариантом сотрудники ГОИ выбрали фотоумножитель с солнечно-слепой спектральной характеристикой чувствительности, анод которого работает на высокоомную

нагрузку, с которой снимается полезный сигнал в виде напряжения, которое затем усиливается до уровня регистрации. Такое решение достаточно очевидно, но обладает некоторыми неприятными нюансами, не позволяющими достичь максимально возможных параметров работы:

- Емкость анода ФЭУ и сопротивление нагрузки включены параллельно, что при больших номи-

налах сопротивления нагрузки – 200 кОм – приводит к ограничению полосы пропускания сигнала (постоянная времени $\tau = 12 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot 200 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, из чего следует, что фронт импульса полезного сигнала будет не менее $5 \div 7,2 \text{ мкс}$).

- Линия связи с высокоомным источником напряжения подвержена влиянию помех в виде наводок в соединительных проводах между источником и предварительным усилителем.
- Размещение предварительного усилителя должно быть непосредственно вблизи источника сигнала (внутри, а не снаружи цокольного стакана фотоприемника), поскольку любые длинные провода являются паразитными емкостями и индуктивностями, ухудшающими частотные характеристики системы.
- Важной функцией предварительного усилителя в данном случае является согласование по выходу с коаксиальным кабелем, нагруженным на согласованную низкоомную нагрузку.
- Еще одной важной функциональной характеристикой усилителя ФЭУ, которую не удалось получить, но желательно иметь, является наличие АРУ. Этот элемент можно разместить после предварительного усилителя, в отдельном конструктиве, приняв специальные меры по экранированию и предотвращению самовозбуждения.

Несмотря на все перечисленные недостатки, способ включения ФЭУ, выбранный сотрудниками ГОИ, – высоковольтный источник питающего напряжения отрицательной полярности на катоде и заземленный через сопротивление нагрузки анод – позволяет применить и другие схемные решения.

Первое возможное улучшение схемы – обойтись без анодного резистора, преобразующего ток анода фотоумножителя в напряжение перед тем, как усиливать сигнал. Для этого ток анода ФЭУ надо направить непосредственно в точку искусственного нулевого потенциала схемы – суммирующий узел инверсного входа операционного усилителя, чтобы нагрузкой аноду стал резистор обратной связи ОУ. Эта конфигурация известна как трансимпедансный усилитель. Эта схема одновременно преобразует ток в напряжение и усиливает сигнал по мощности, позволяя осуществлять его дальнейшее усиление в рядом расположенных ОУ либо передать по кабелю в специальный блок усилителя.

В соответствии с рекомендациями по применению [1] схема трансимпедансного усилителя на микросхеме ОУ будет сконфигурирована следующим образом: входной сигнал от анода ФЭУ будет поступать в точку искусственной земли на инвертирующий вход ОУ, к этой же точке подключен резистор обратной связи R_{oc} с выхода ОУ. Прямой вход ОУ соединяется

с землей схемы через резистор 120 Ом [1]. Резистор обратной связи зашунтирован конденсатором, емкость которого рекомендуется [1] определять по формуле

$$C_{oc} = \sqrt{\frac{2\omega_0 C_{bx} R_{oc} - 1}{\omega_0^2 R_{oc}^2}},$$

где ω_0 – круговая частота единичного усиления ОУ данного типа (рад/с), а C_{bx} – суммарная емкость всего, что подключено к инверсному входу ОУ (сама входная емкость ОУ, анод ФЭУ, монтажные провода, печатная плата, а также все паразитные емкости). Для наглядности влияния параметров, входящих в формулу, в таблице приведено несколько вычисленных величин C_{oc} в зависимости от возможных комбинаций значений ω_0 , C_{bx} и R_{oc} .

Количество вариаций параметра входной емкости, представленное в таблице, выбрано исходя из грубых оценок возможных величин, поскольку в справочниках не приводится емкость анода ФЭУ.

Как видно из представленной таблицы, требуемая емкость уменьшается с ростом скорости работы операционного усилителя от минимальной к типовой и максимальной, поэтому при настройке, возможно, понадобится замена или подбор емкости для получения оптимальной формы сигнала. Величину R_{oc} необходимо оценить и принять конкретное значение на этапе проектирования. Для этого зададимся минимальным током анода ФЭУ при минимальной рабочей освещенности: пусть за время, равное длительности одной посылки информации – в нашем случае 250 нс, – фотокатодом равномерно принято 25 фотонов, вызвавших фотоэффект, прошедших сквозь усилительные каскады ФЭУ и породивших заряд на аноде, равный $25 \bar{e} K_{ycФЭУ} = 25 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^6 = 4 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} = 4 \text{ пКл}$, который, в свою очередь, вызовет ток анода, $I_a = Q/t = 4 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} / 250 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 16 \text{ мкА}$.

Для различных вариантов величины R_{oc} на выходе ОУ будет разное напряжение:

- при $R_{oc} = 10 \text{ кОм}$ – $U_{вых} = I_a R_{oc} = 16 \text{ мкА} \cdot 10 \text{ кОм} = 0,16 \text{ В}$;
- при $R_{oc} = 4,7 \text{ кОм}$ – $U_{вых} = I_a R_{oc} = 16 \text{ мкА} \cdot 4,7 \text{ кОм} = 75 \text{ мВ}$;
- при $R_{oc} = 1 \text{ кОм}$ – $U_{вых} = I_a R_{oc} = 16 \text{ мкА} \cdot 1 \text{ кОм} = 16 \text{ мВ}$,

которое необходимо будет далее усилить до уровня 2 В, пригодного для обработки в АЦП, при этом коэффициент усиления последующих каскадов составит 12,5; 27 и 125 соответственно. Однако выбор величины R_{oc} сверху ограничивает постоянная времени цепи этого резистора и входной емкости $\tau = R_{oc} C_{bx}$, которая будет определять длительности

Таблица. Вычисленные значения емкости C_{oc}

$C_{вх}, \text{пФ}$	$C_{oc}, \text{пФ}$								
	$R_{oc} = 10 \text{ кОм}$			$R_{oc} = 4,7 \text{ кОм}$			$R_{oc} = 1 \text{ кОм}$		
	$\omega_0 = 800 \cdot 10^6$	$\omega_0 = 1260 \cdot 10^6$	$\omega_0 = 1760 \cdot 10^6$	$\omega_0 = 800 \cdot 10^6$	$\omega_0 = 1260 \cdot 10^6$	$\omega_0 = 1760 \cdot 10^6$	$\omega_0 = 800 \cdot 10^6$	$\omega_0 = 1260 \cdot 10^6$	$\omega_0 = 1760 \cdot 10^6$
5	1,1	0,9	0,75	1,6	1,3	1,	3,3	2,7	2,3
12	1,7	1,4	1,2	2,5	2,0	1,7	5,3	4,3	3,6
20	2,2	1,8	1,5	3,3	2,6	2,2	7,0	5,6	4,4
30	2,7	2,2	1,8	4,0	3,2	2,7	8,6	6,8	5,8

фронтов импульса посылки. Чтобы краевые искажения не превышали 30% при длительности посылки 250 нс, нужно, чтобы величина 3τ не превышала 80 нс, тогда R_{oc} для разных величин $C_{вх}$ составит: 5,3 кОм для 5 пФ; 2,2 кОм для 12 пФ; 1,3 кОм для 20 пФ; 887 Ом для 30 пФ.

Таким образом, следует положить, что номиналы компонентов схемы следующие: микросхема ОУ 1432УД16; $R_{вх} = 120 \text{ Ом}$; $R_{oc} = 1 \text{ кОм}$; $C_{oc} = \text{от } 1,1 \text{ пФ до } 6,8 \text{ пФ}$ с начальным значением 3,3 пФ; $R_{ввых} = 75 \text{ Ом}$. Номиналы конденсаторов цепей питания ОУ: два электролитических оксидно-полупроводниковых конденсатора 22 мкФ 6,3 В; по два керамических конденсатора 2,2 и 0,1 мкФ; один керамический конденсатор 0,33 мкФ. Предварительный [1] вариант схемы представлен на рис. 1.

В зависимости от решения о конструктивном размещении следующих каскадов усиления схема может быть дополнена выходным буферным усилителем 1432УЕ1В специально для работы на нагрузку в виде коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом с последовательным согласованием на передающей стороне и параллельным согласованием на приемной стороне.

В случае, если притока зарядов на анод ФЭУ, равномерно распределенного по длительности посылки, получить не удастся и говорить о токе анода будет затруднительно, есть возможность пренебречь формой фототока и ориентировать каскад усиления на срабатывание от суммарно полученного анодом ФЭУ заряда. Такая конфигурация известна как зарядочувствительный усилитель [2] (рис. 2а, 2б).

Идея состоит в том, чтобы как можно меньше заряда потерять во входной цепи усилителя и чтобы по возможности весь полученный от анода заряд рассасывался только через цепь отрицательной обратной связи входного каскада. В настоящее время для этого на вход ставится специальный полевой транзистор с каналом n -типа и затвором на основе p - n -перехода с нормированным током утечки затво-

ра, обычно помечаемый в справочниках как предназначенный для применения в зарядочувствительных усилителях и устройствах ядерной спектрометрии – к примеру, 2П303Г, имеющий ток утечки не более 100 пА. Этот транзистор включается по схеме, например, с общим истоком, выходной сигнал с резистора стоковой нагрузки подается на быстродействующую усилительную схему.

Если быстродействующий усилитель выполнен на ОУ, то сигнал со стока подается на неинвертирующий вход ОУ; с выхода ОУ берется обратная связь в виде субгигаомного резистора, шунтированного конденсатором емкостью около 1,1 пФ (рис. 3).

Промышленность выпускает микросхемы для таких применений ОУ, например, гибридная ИС А250F или А250NF (фирма AMPTEC, США), а также КМ1432УП1 («Пульсар», Москва) [5]. В случае А250F транзистор встроен в микросхему, в случае А250NF и КМ1432УП1 транзистор внешний и обычно размещается внутри термостата криогенной установки и охлаждается вместе с ФЭУ. В последнее время промышленность освоила выпуск ОУ, специализированных для применений с малыми токами утечек по входам – например, АДА4350 (ток утечки $\pm 25 \text{ пА}$), АДА4530-1 (ток утечки $\pm 250 \text{ фА}$) и АДА4817-1 (ток утечки не более 100 пА) (фирма Analog Devices, США). В случае применения таких ОУ схема будет аналогична схеме трансимпедансного усилителя, но в цепи обратной связи большую роль будет играть не резистор R_{oc} , а конденсатор C_{oc} , то есть $U_{ввых} \approx \approx Q/C_{oc}$ ($4 \text{ пКл} / 1,1 \text{ пФ} = 3,6 \text{ В}$). При этом выходной сигнал по форме будет выглядеть, как резкий всплеск по переднему фронту и более плавный экспоненциальный спад по заднему фронту, длительность которого будет определяться временем разряда емкости C_{oc} , получившей почти весь заряд Q , через R_{oc} . В нашем случае длительность импульса $3\tau = 3 R_{oc} C_{oc} = 3 \cdot 0,3 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot 1,1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 0,99 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ получается весьма большой. Для ее сокращения необходимо уменьшать резистор R_{oc} либо расцеплять

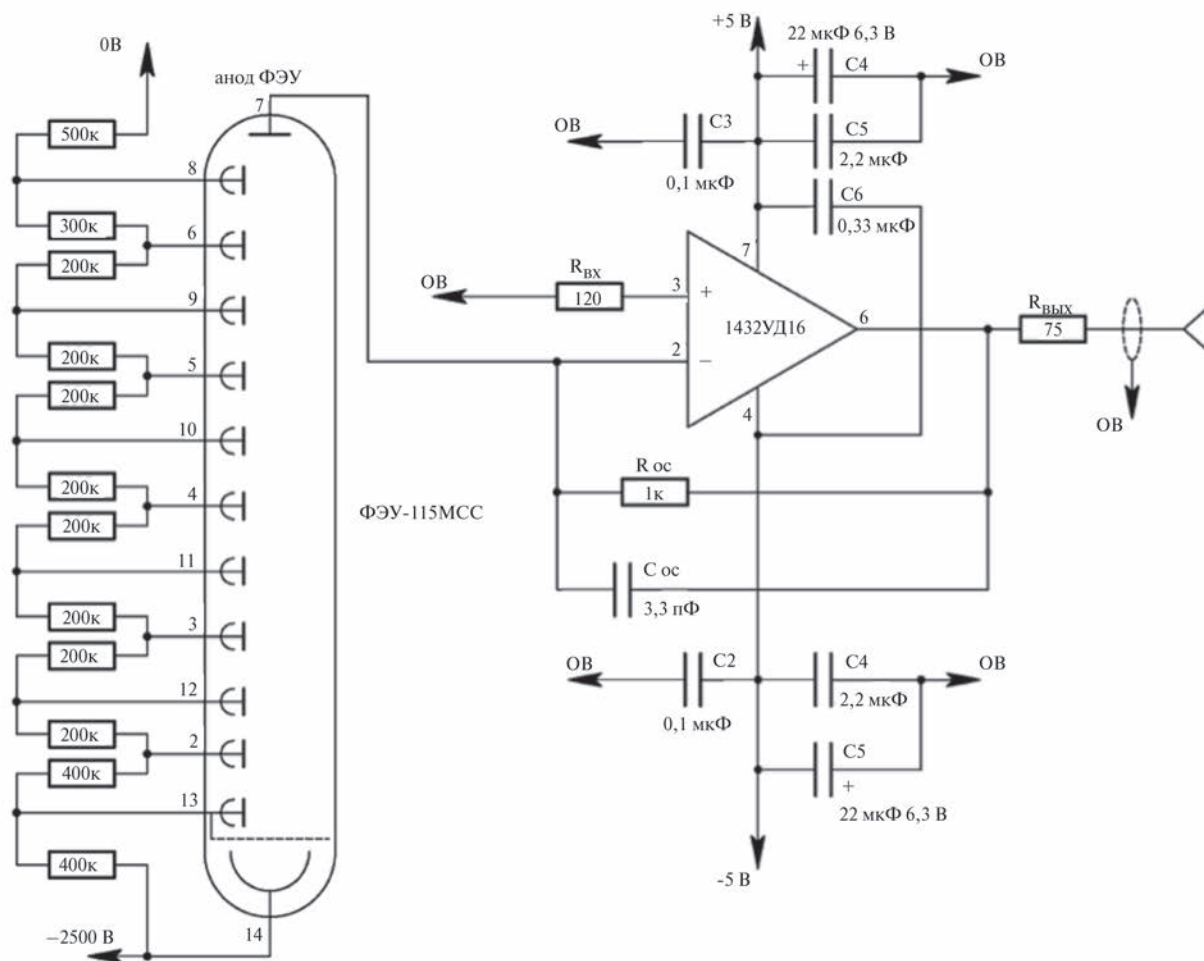


Рисунок 1. Трансимпедансный усилитель на ОУ повышенного быстродействия

его на быстродействующую и медленнодействующую составляющие, как показано на рис. 2б, где резистор R_{oc} (R_{16} по схеме) подключен к более дальнему от входа каскаду усиления, что обеспечивает некоторую задержку вступления в действие обратной связи по постоянному току. Тогда резистор R_{oc} можно уменьшить в 100 000 раз с 300 мОм до 3 кОм, сократив длительность спада импульса 3τ до 10 нс. При этом длительность самого импульса будет определяться величиной задержки на каскаде усиления.

Независимо от выбранного варианта предварительного усилителя, для дальнейшей обработки сигнала в приемнике схема нуждается в каскаде, который бы осуществлял автоматическую регулировку усиления всего приемного тракта. Это связано как с неопределенным характером прохождения сигнала сквозь турбулентности и неоднородности атмосферы, так и с большими различиями в длине трассы прохождения сигнала из-за неопределенности высоты расположения рассеивающего слоя. Увеличение длины трассы сильно уменьшает уровень принимаемого сигнала из-за поглощения УФ-излучения на молекулах озона и воды.

Существует несколько схемотехнических решений для изменения коэффициента усиления усилителя. Пробное макетирование показало, что при малых уровнях входного сигнала возможно применение полевого транзистора с изолированным затвором (2П301, 2П304, 2П305, 2П7209) в качестве элемента цепи ОС, задающей коэффициент усиления ОУ в инвертирующем включении – вместо резистора, соединяющего инверсный вход ОУ и землю. Однако регулировка коэффициента усиления более чем в 8–11 раз не получилась. Был опробован вариант применения резисторной оптопары (ОЭП-2, ОЭП-14) вместо резистора, соединяющего инверсный вход ОУ и выход. Однако и этот вариант не показал удовлетворительного результата – на постоянном токе и низких частотах коэффициент усиления схемы обладал хорошим запасом регулировки, но на рабочих частотах АОЛС регулирование практически не наблюдалось. Рассматривалось также применение специализированных микросхем аналоговых умножителей и балансных модуляторов, работающих на изменении режимов работы токозадающих цепей входных дифференциальных

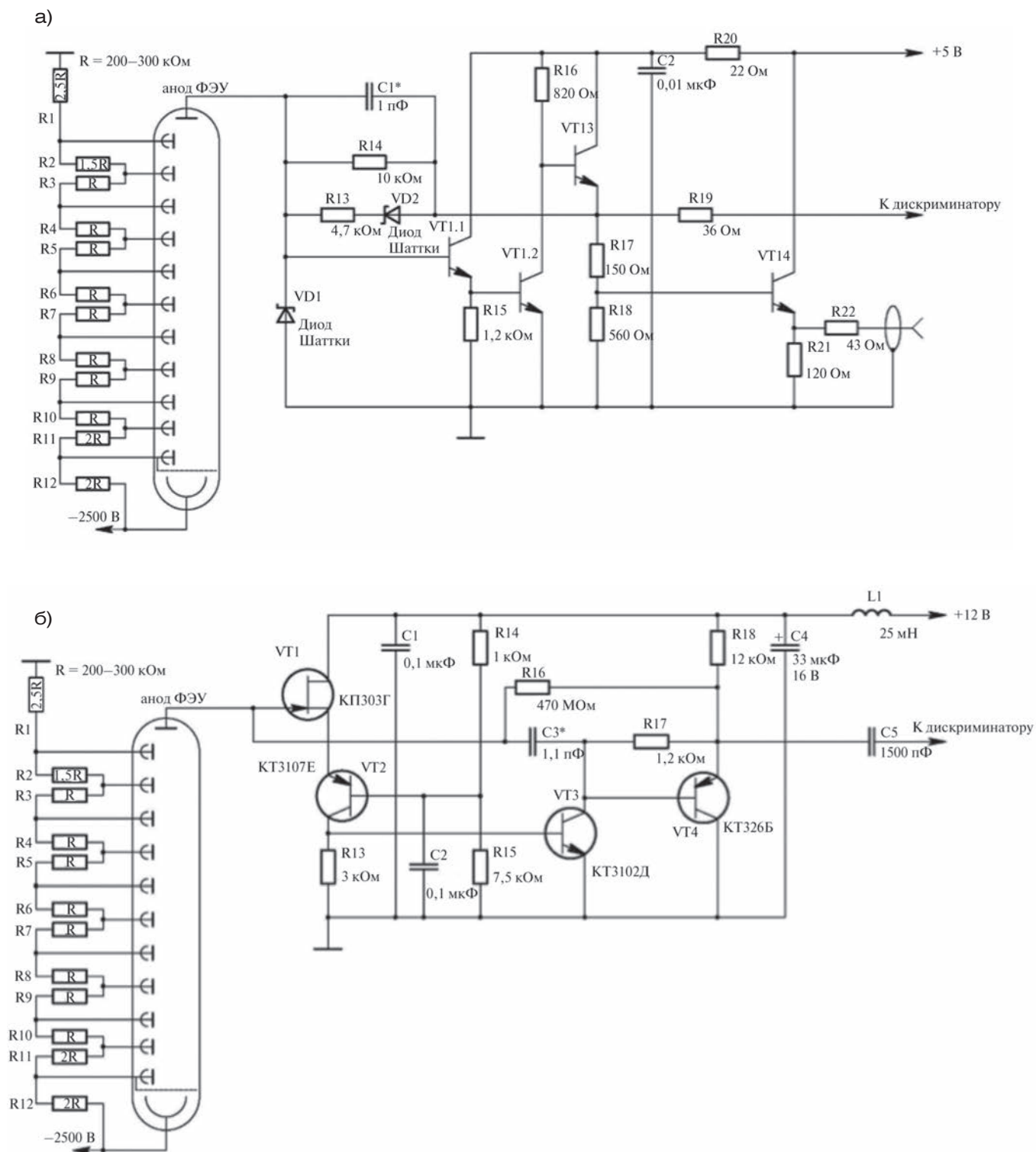


Рисунок 2. Зарядочувствительные усилители на дискретных элементах: а – из книги [2] Хоровца и Хилла «Искусство схемотехники», § 13.27, часть схемы с рис. 13.60; б – рекомендована сообществом инженеров-физиков на одном из форумов [3] по спектрометрии [4] как проверенный и устойчиво работающий вариант зарядочувствительного усилителя (часть схемы)

каскадов усилителей, но это направление было отложено, поскольку (как и ПТ с изолированным затвором) работает при очень малых уровнях входного сигнала. Наиболее перспективным представляется применение специализированных микросхем ОУ с

регулируемым коэффициентом усиления. В настоящее время промышленностью выпускаются подобные микросхемы – 1432УВ3, 1463УУ1, 1463УУ2, 1432УУ1. Для наших целей подходят первые две. Заявленной полосы частот – 87 и 90 МГц – нам

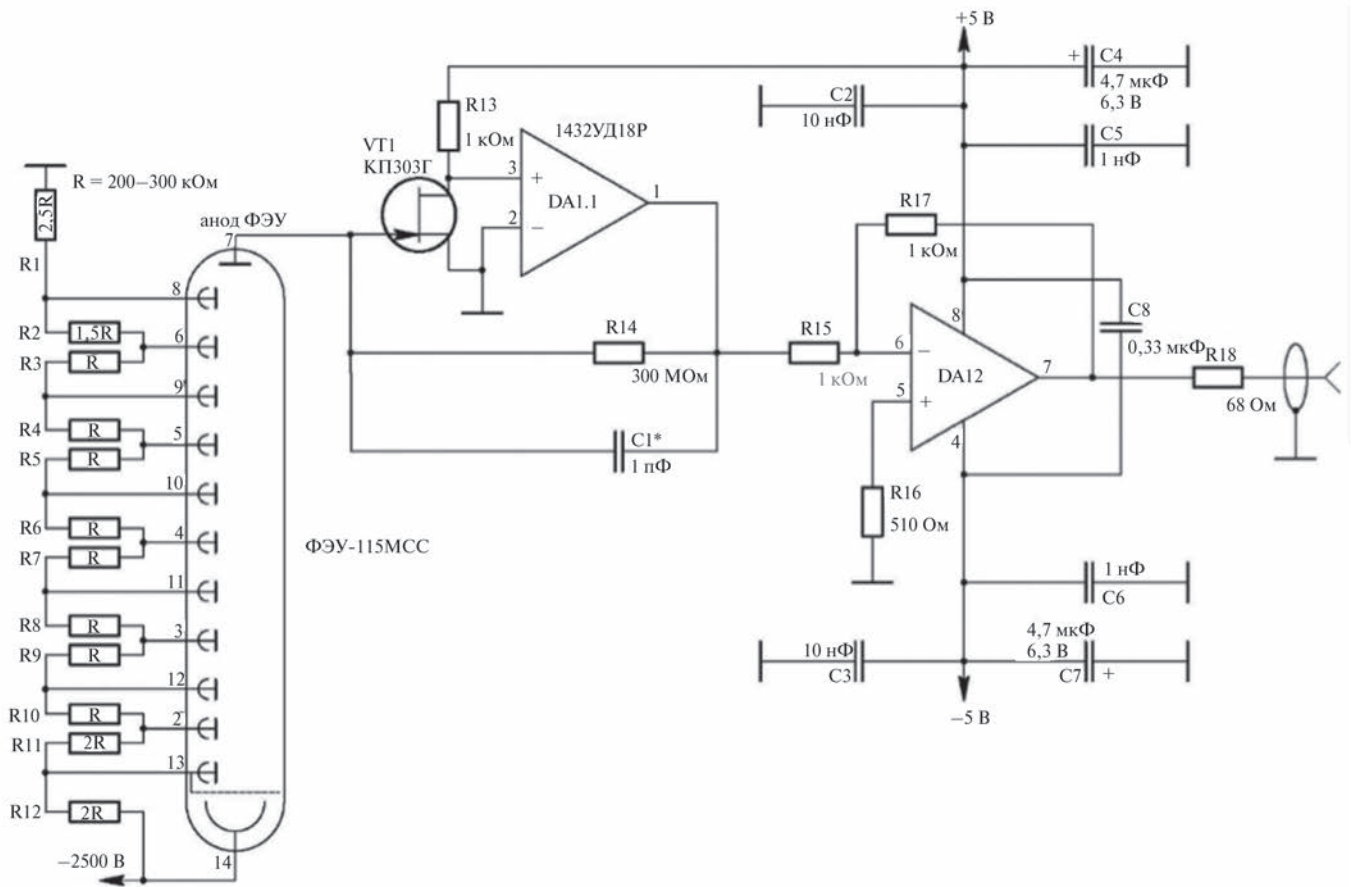


Рисунок 3. Зарядочувствительный усилитель на ОУ повышенного быстродействия

также должно хватить для решения задачи. На рис. 4 представлена схема типового применения микросхемы 1432УВ3 из справочных листов [6, 7], а также предварительный вариант схемы получения управляющего напряжения, осуществляющей АРУ, которая подлежит окончательной проработке в процессе отладки.

Как уже отмечалось выше, для усиления сигнала, получаемого от трансимпедансного предусилителя, основной усилитель должен обладать коэффициентом усиления порядка 125, при этом, в случае работы ФЭУ в режиме регистрации отдельных ярких вспышек, сигнал с выхода предусилителя в дальнейшем усилении может и не нуждаться, а в сложных атмосферных условиях (большая высота рассеивающего слоя) необходим некоторый запас по коэффициенту усиления приблизительно в 2–3 раза. Таким образом, АРУ должно иметь диапазон регулировки коэффициента усиления от 1 до 375 (51,5 дБ). Один усилитель 1432УВ3 обеспечивает регулировку в диапазоне до 40 дБ; предусмотрено каскадное включение нескольких микросхем с общей цепью управляющего напряжения. Для нашего случая достаточно двух микросхем в каскадном включении. Согласно спецификации, наибольшая полоса пропускания у микросхемы при установке

диапазона регулировки усиления от –10 до +30 дБ; двухкаскадное включение будет давать диапазон усиления от –20 до +60 дБ. Схема построена так, что управляющее напряжение действует в пределах от 0 до +2 В и в процессе регулировки сначала, при росте от 0 до +1 В, увеличивает усиление первого усилителя, а затем, при росте от +1 до +2 В, воздействует на второй усилитель; первый усилитель при этом имеет максимальный коэффициент усиления. Цепь получения управляющего напряжения может претерпеть изменения, в частности, вывод «канал-подложка» полевого транзистора может быть переподключен с –5 В на землю; на схеме грубо проставлен номинал резистора R_{11} , значение которого определит время задержки срабатывания АРУ, и совсем не проставлен номинал резистора R_6 , значение которого определит скорость перестройки АРУ (микросхемы допускают перестройку коэффициента усиления в течение 1 мкс).

Выход схемы рассчитан на работу с низкоомной нагрузкой, то есть на подключение коаксиального кабеля, согласованного с нагрузкой по волновому сопротивлению, но при длинном кабеле и большой емкостной нагрузке схема, как и в случае с предусилителем, может быть дополнена выходным буферным каскадом на микросхеме 1432УЕ1В.

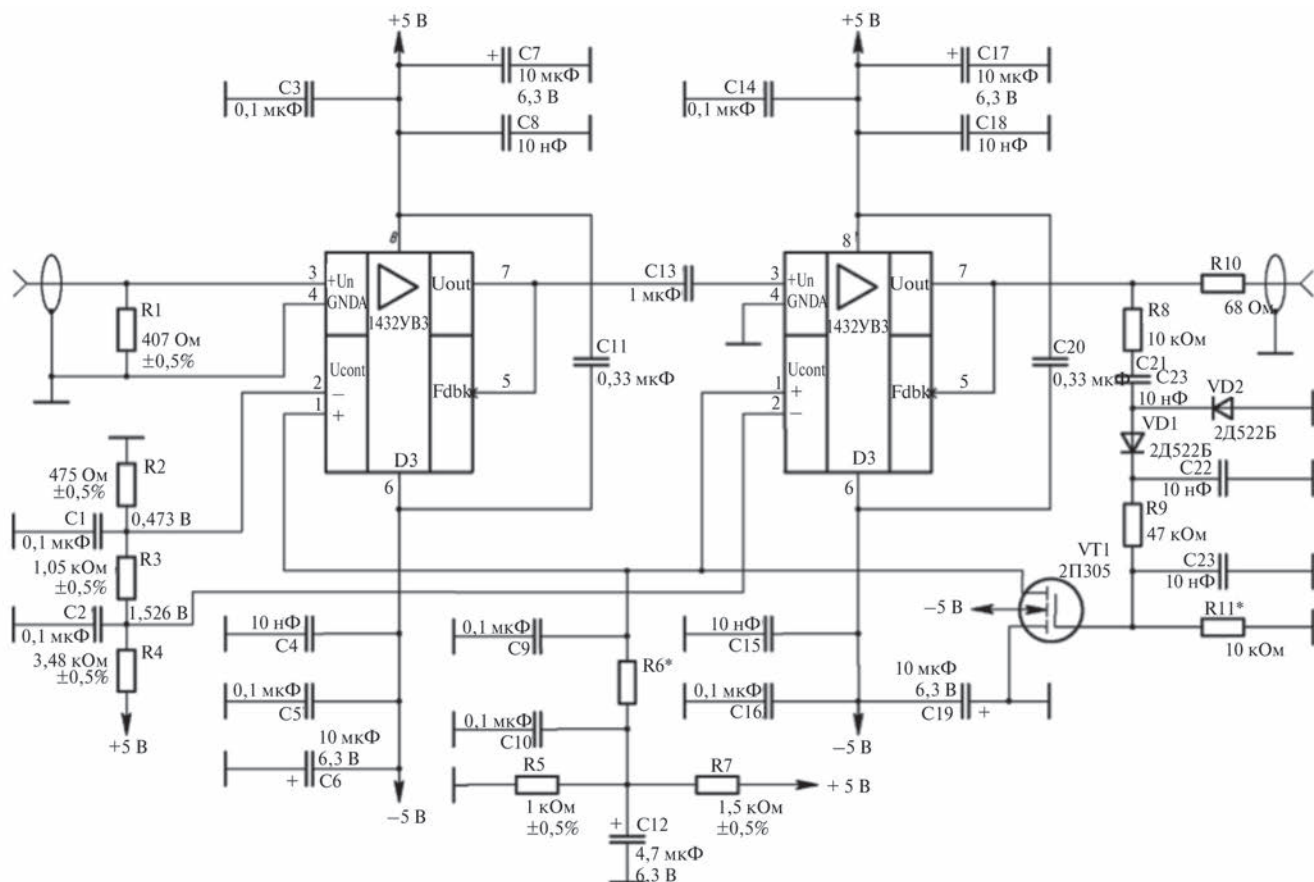


Рисунок 4. Схема усилителя с АРУ

Как уже замечалось ранее, очень важно не потерять полезный сигнал из-за недостатков конструкции приемного блока, вносящих паразитные индуктивности и емкости в схему. Поэтому предварительный усилитель необходимо разместить непосредственно внутри оправы ФЭУ, а усилитель с АРУ – как можно ближе к месту расположения ФЭУ в закрытой экранированной коробке. Дальнейшая обработка (оцифровка, фильтрация, детектирова-

ние, регистрация и битовая синхронизация) может происходить на некотором расстоянии от ФЭУ в пределах модуля АОЛС.

Повышенное внимание следует также обратить на трассировку цепей питания и площади электродов земли и питающих напряжений печатной платы, а также минимизацию расстояния от выводов питания и заземления микросхем до выводов фильтрующих конденсаторов по питанию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Data Sheet AD9631/AD9632 Ultralow Distortion, Wide Bandwidth Voltage Feedback Op Amps. Rev. D. Analog Devices, 2014. Available at: www.analog.com
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3 т. / пер. с англ.; 4-е изд., перераб. и доп. М.: Мир, 1993. Т. 3. С. 178–180.
3. Форум инженеров-физиков [Электронный ресурс]. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/electronics/index.html>
4. Гаврилов Л. Е. Основы ядерной электроники: учеб. пособие. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.
5. Дьячков И. А. Зарядочувствительные усилители сигналов детекторов ионизирующих излучений. Диссертация по специальности ВАК 05.13.05. Москва, 2002.
6. Data Sheet AD603 Low Noise, 90 Variable Gain Amplifier. Rev. K. Analog Devices, 2012. Available at: www.analog.com
7. Data Sheet VCA810 High Gain Adjust Range, Wideband, Voltage-Controlled Amplifier. Texas Instruments, 2004. Available at: www.ti.com

REFERENCES

1. Data Sheet AD9631/AD9632 Ultralow Distortion, Wide Bandwidth Voltage Feedback Op Amps. Rev. D. Analog Devices, 2014. Available at: www.analog.com

2. Horowitz P., Hill W. *Iskusstvo shemotehniki* [The art of circuitry]. Trans. From Eng; 4-e izd., pererab. i dop. Moscow, Mir Publ., 1993, vol. 3, pp.178–180 (In Russian).
3. [Forum engineers physicists] (In Russ). Available at: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/electronics/index.html>
4. Gavrilov L. E. *Osnovy jadernoj jelectroniki: uchebnoe posobie*. Ch. 1 [The base of nuclear electronics. Part 1]. Moscow, NIYAU MIFI, 2010 (In Russian).
5. Dyachkov I. A. *Charge sensitive amplifiers of signals of ionizing radiation detectors*. Dissertatsiya po spetsialnosti VAK 05.13.05. Moscow, 2002 (In Russian).
6. [Data Sheet AD603 Low Noise, 90 Variable Gain Amplifier] Rev. K. Analog Devices, 2012. Available at: www.analog.com
7. [Data Sheet VCA810 High Gain Adjust Range, Wideband, Voltage-Controlled Amplifier] Texas Instruments, 2004. Available at: www.ti.com

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Егоров Максим Владимирович, начальник отдела, АО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств», 248000, Калуга, ул. К. Маркса, д. 4, тел.: 8 (4842) 74-35-00, e-mail: kniitmu@kaluga.net.

Неронский Роман Валентинович, ведущий инженер, АО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств», 248000, Калуга, ул. К. Маркса, д. 4, тел.: 8 (4842) 74-35-00, e-mail: kniitmu@kaluga.net.

AUTHORS

Egorov Maksim, head of department, JSC Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices, 4, ulitsa K. Marksa, Kaluga, 248000, Russian Federation, tel.: +7 (4842) 74-35-00, e-mail: kniitmu@kaluga.net.

Neronskey Roman, lead engineer, JSC Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices, 4, ulitsa K. Marksa, Kaluga, 248000, Russian Federation, tel.: +7 (4842) 74-35-00, e-mail: kniitmu@kaluga.net.