

Владимир Баканов,

главный конструктор ЧП «АРТОН»

Для создания фотоусилителей, обладающих максимальной обнаружительной способностью в условиях изменяющегося фоновых сигнала, в оптических пожарных извещателях широко используются операционные усилители (ОУ). Необходимо отметить, что современный операционный усилитель — это усилитель постоянного тока с дифференциальным входом, обладающий очень большим коэффициентом усиления (до 100 дБ), широкой полосой пропускания (от постоянного тока до 100 МГц), высоким (до 1000 МОм) входным сопротивлением и низким (десятки Ом) выходным сопротивлением.

Необходимо также отметить, что подключение фотодиода к ОУ осуществляется с учетом его вольт-амперных характеристик, которые приведены на рис. 1 [1].

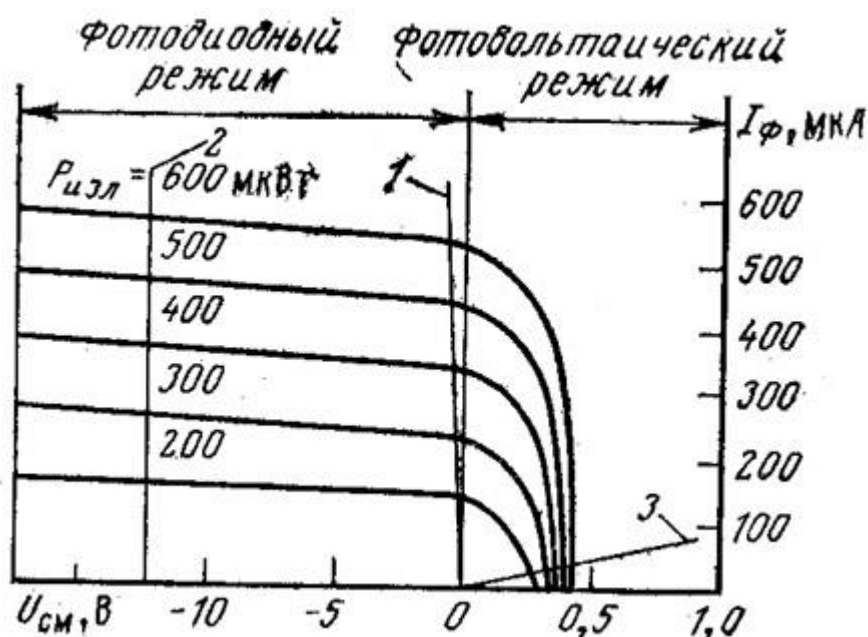


Рис. 1

На рис. 1 отмечены нагрузочные характеристики:

1. - несмещенного фотодиода при почти нулевом сопротивлении нагрузки;
2. - при смещении напряжением 12 В и при почти нулевом сопротивлении нагрузки;
3. - несмещенного фотодиода при большом сопротивлении нагрузки.

Использование низкоомной нагрузки позволяет увеличить быстродействие фотодиода, так как исключается влияние собственной его емкости. При низкоомной нагрузке повышается также линейность световой характеристики фотодиода. Если ОУ будет создавать для фотодиода высокое

сопротивление, то при отсутствии напряжения смещения нагрузочная характеристика пересечет нелинейную область вольт-амперных характеристик, соответствующую работе фотодиода в фотовольтагическом режиме (прямая 3).

Для построения высокоточных схем необходимо учитывать, что температурный коэффициент интегральной токовой чувствительности кремниевого диода составляет $\pm 0,05\%/^{\circ}\text{C}$.

При монотонном повышении температуры чувствительность фотодиода сначала увеличивается, затем уменьшается, потом снова увеличивается. Однако ее изменение не превышает 5% в диапазоне возможных значений рабочих температур пожарных извещателей (от минус 10 до 55 $^{\circ}\text{C}$) [2].

Классическая литература по усилителям для фотодиодов [3, 4] рекомендует типовые схемы подключения ОУ для преобразования оптического сигнала в электрический. На рис. 2 показана схема подключения смещенного фотодиода к преобразователю ток-напряжение, выполненному на ОУ. Нужно не забывать, что при классическом включении ОУ предполагается, что его электропитание осуществляется от двух источников с разнополярным напряжением относительно общего провода устройства. Если ОУ охвачен отрицательной обратной связью, то на его выходе устанавливается такое напряжение, чтобы между инвертирующим и неинвертирующим входами устанавливалась нулевая разница потенциалов. Соблюдая указанное правило можно сразу сказать, что на выходе этого ОУ будет наблюдаться отрицательное напряжение, которое будет пропорционально интенсивности светового потока, направленного на фотодиод. На рис. 3 показана схема подключения к ОУ несмещенного фотодиода. В этом случае на выходе ОУ будет наблюдаться уже положительный потенциал при освещении фотодиода.

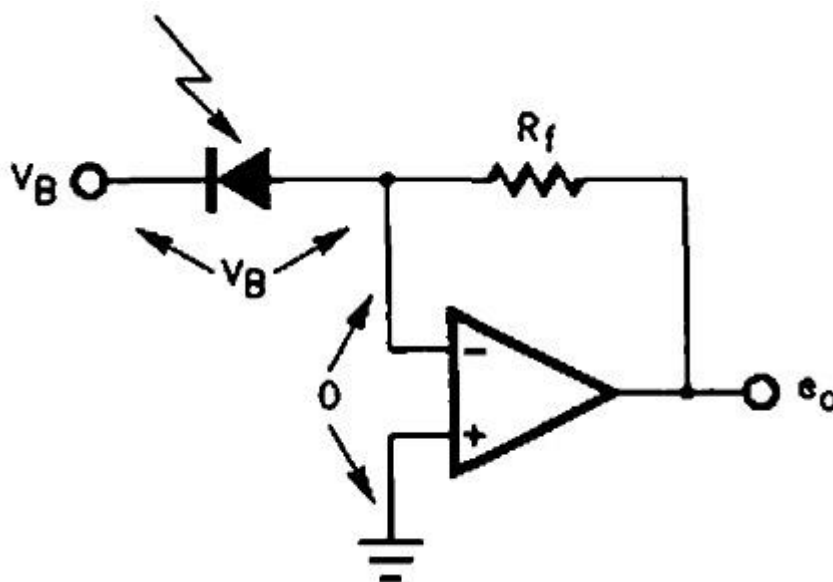


Рис. 2

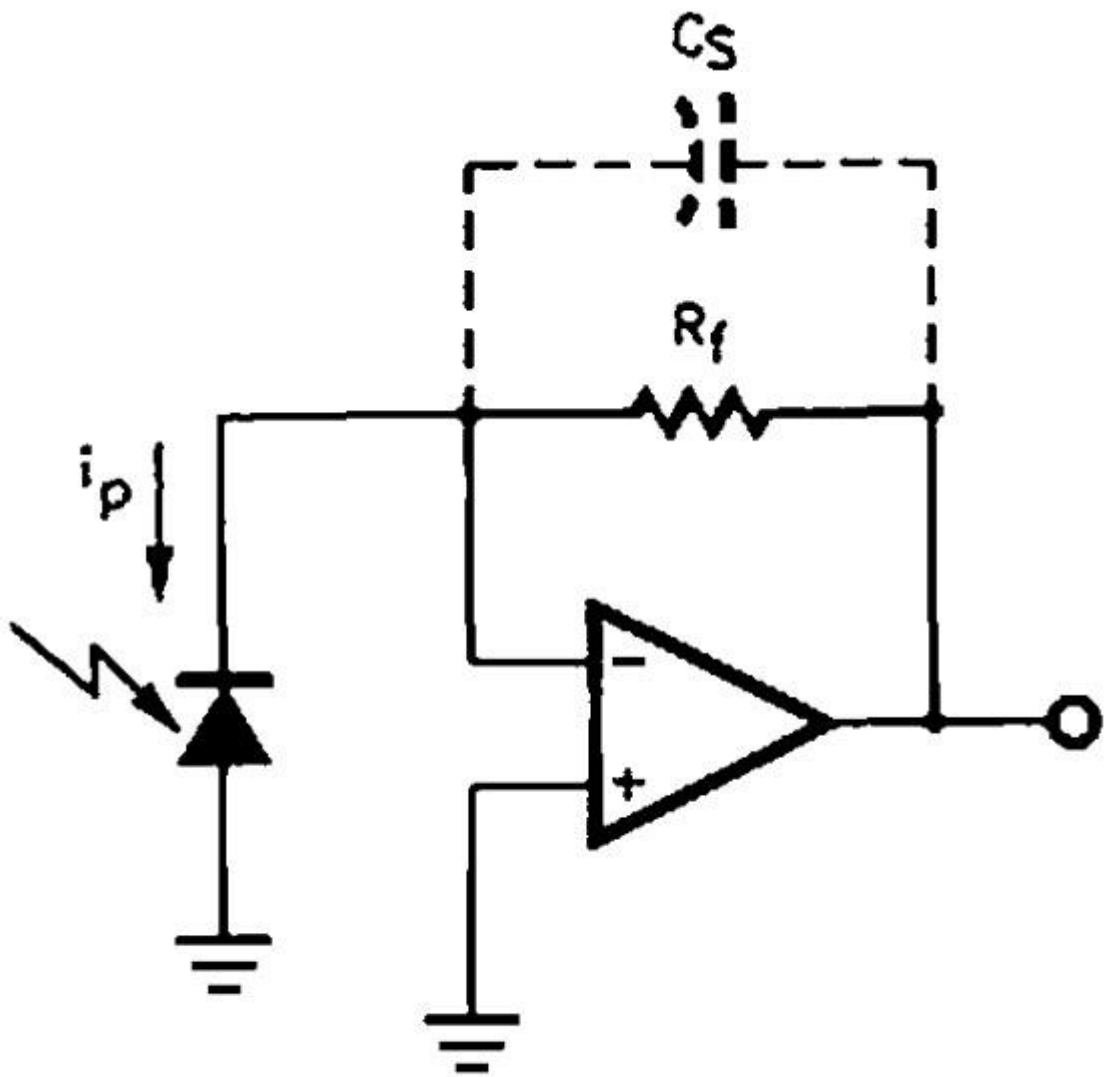


Рис. 3

Увеличить выходной сигнал в два раза при том же уровне оптического сигнала можно применив схему, представленную на рис. 4.

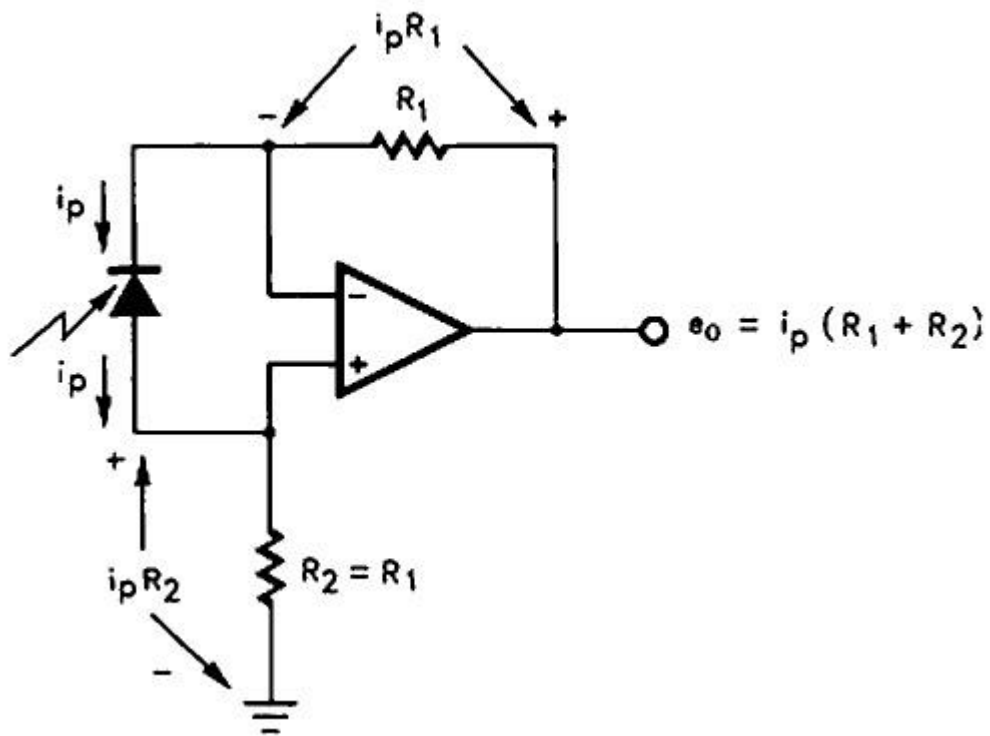


Рис. 4

Существенно повысить качество принимаемого сигнала, исключить синфазные помехи позволяет схема с использованием измерительного усилителя, которая приведена на рис. 5. На этом рисунке наглядно показано, каким образом исключается влияние синфазных токов, наводимых на выводах фотодиода.

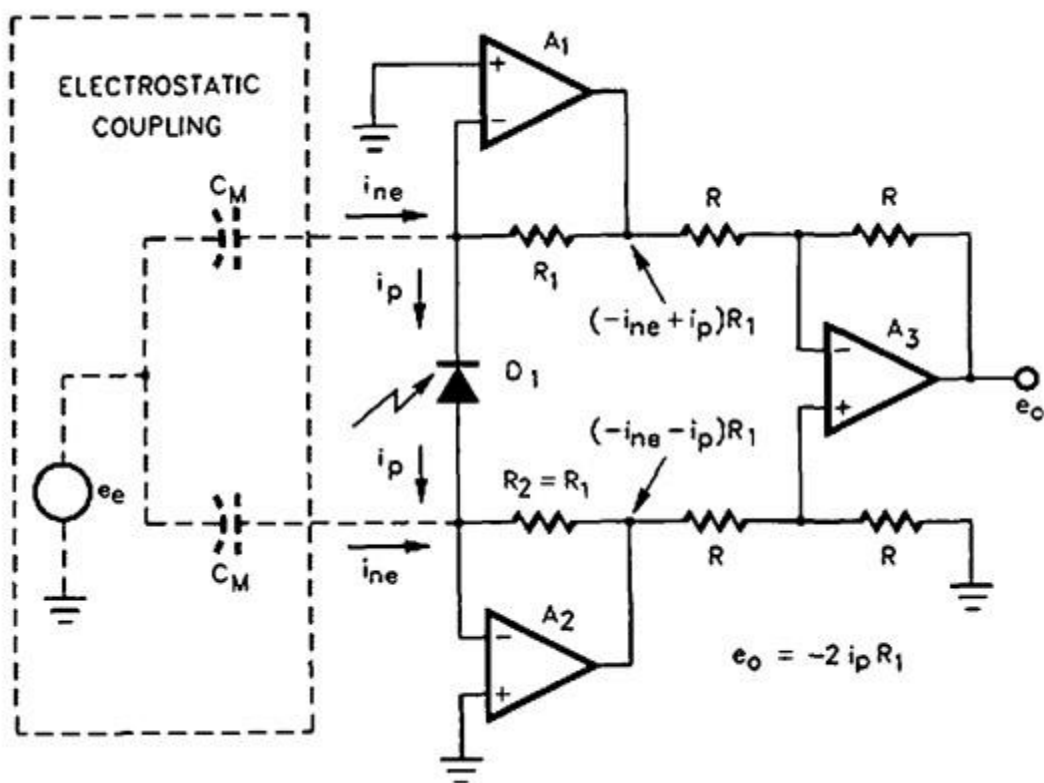


Рис. 5

Практическая схема фотосилителя на одном ОУ представлена в статье [5]. Для усиления сигнала фотодиода применена схема, приведенная на рис. 6, усилителя фототока на основе ОУ TLV2780. При выборе этого ОУ разработчик руководствовался стоимостью и временем установления. У данного ОУ время установления составляет до 3 мкс, что позволило не использовать поддерживаемую им возможность перехода в дежурный режим работы, а взамен этого - управлять питанием усилительного каскада с выхода микроконтроллера. Таким образом, после отключения усилительного каскада он вообще не потребляет никакого тока, а достигнутая экономия тока составляет около 1,4 мкА. Особенностью этого решения является весьма низкое питающее напряжение: от 1,8 до 3,6 В. А использование 10 разрядного аналогово-цифрового преобразователя в микроконтроллере позволяет анализировать достаточно малые по амплитуде сигналы на выходе фотосилителя.

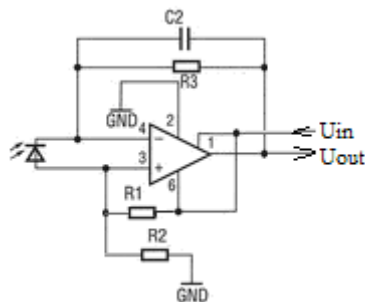


Рис. 6

Так как данная схема предназначена для работы с микроконтроллером, то здесь не предусматриваются определенные меры по установке состояния при включении питающего напряжения. В простейших же устройствах, где с выхода фотоусилителя сигнал подается непосредственно на управляющий электрод тиристора или иного бистабильного элемента, то необходимо принимать меры по первоначальной установке выходного сигнала, как это реализовано в канадском патенте CA1242256 [6], по схеме, представленной на рис. 7.

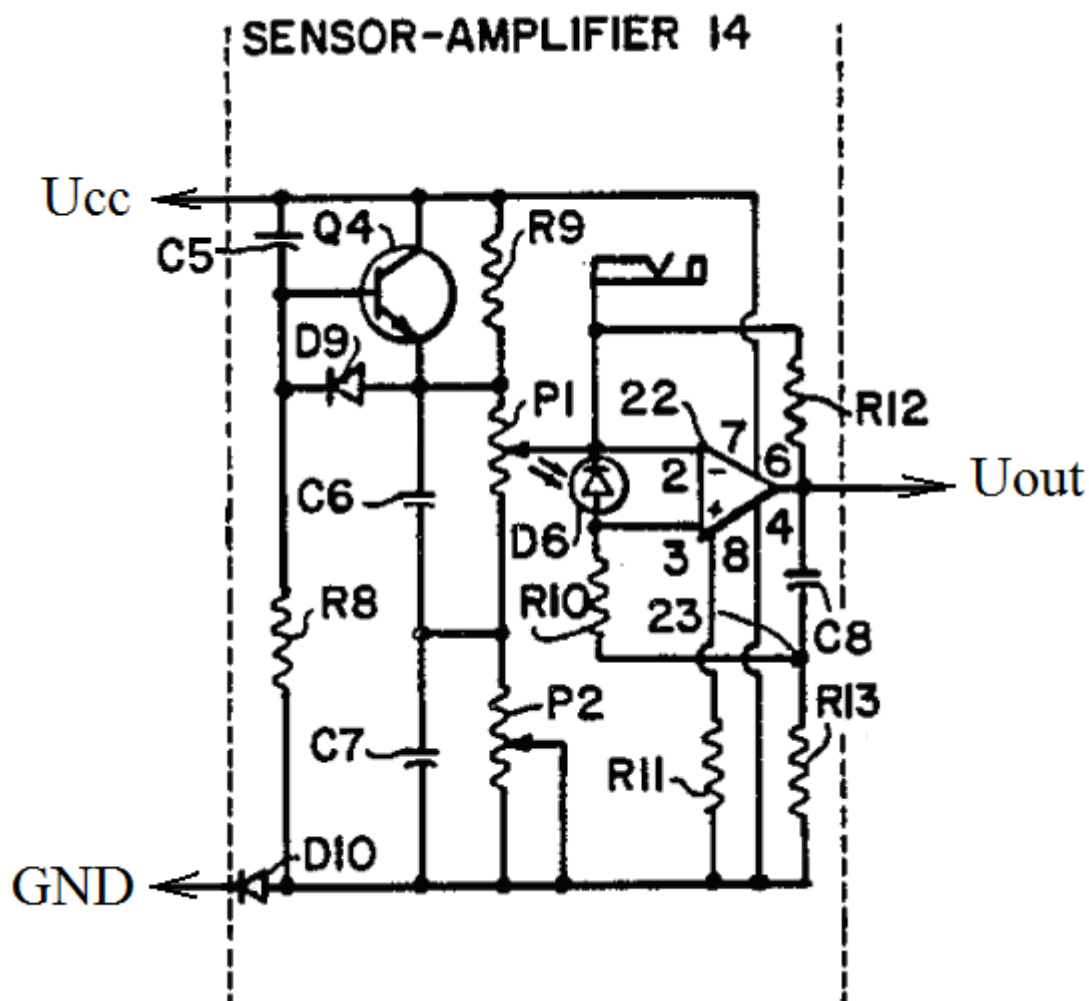


Рис. 7

Схема включения ОУ близка к техническому решению, раскрытому на рис. 4. Но резистор, соединяющий неинвертирующий вход ОУ с общим проводом устройства разбит на две части (R10 и R13) и сюда же подключена емкостная положительная обратная связь с выхода ОУ (C8). На инвертирующий вход ОУ подано опорное напряжение с переменного резистора P1. Транзистор Q4 совместно с конденсатором C5 обеспечивает возрастание потенциала на инвертирующем входе ОУ в момент включения питающего напряжения. Благодаря этому скачку потенциала на входе выходное напряжение всегда будет оставаться низким, если интенсивность оптического излучения падающего на фотодиод будет также низкой. Если импульсы фото-ЭДС появляющиеся на фотодиоде D6 будут меньше того отрицательного смещения, которое будет установлено на неинвертирующем входе

относительно инвертирующего входа, то на выходе ОУ будет низкий потенциальный уровень сигнала. С ростом амплитуды импульсов фото-ЭДС будут появляться импульсы на выходе ОУ. Благодаря положительной обратной связи на конденсаторе С8 в какой-то момент времени произойдет ускорение роста выходного напряжения и напряжение на выходе ОУ достигнет своего максимального значения. По мере спада амплитуды импульсов фото-ЭДС процесс повторится в обратном направлении.

Однако получить необходимый коэффициент усиления, для должной чувствительности пожарного извещателя на одном каскаде, даже выполненном на ОУ не просто. Начинают сказываться частотные ограничения. Так как импульсы, подлежащие усилению достаточно короткие, то анализ диаграммы Боде [7] показывает, что устойчивое (без самовозбуждения) усиление таких сигналов может быть обеспечено при фиксированном низком значении коэффициента усиления. Обеспечить необходимый суммарный коэффициент усиления может применение дополнительного каскада усиления. Не обязательно такой каскад тоже должен быть выполнен на ОУ и не обязательно такой каскад должен обеспечивать линейное усиление сигнала, если речь идет о пороговых пожарных извещателях. Коэффициент усиления $K = 20$ и более можно получить и на транзисторе, при этом обеспечив надлежащую амплитуду выходного сигнала. Эту функцию легко выполнит однотранзисторный компаратор (усилитель-дискриминатор), о котором говорилось в статьях про транзисторные фотоусилители [8]. Примером построения такого комбинированного фотоусилителя может служить схема, приведенная в канадском патенте СА1079381 [9] и представленная на рис. 8.

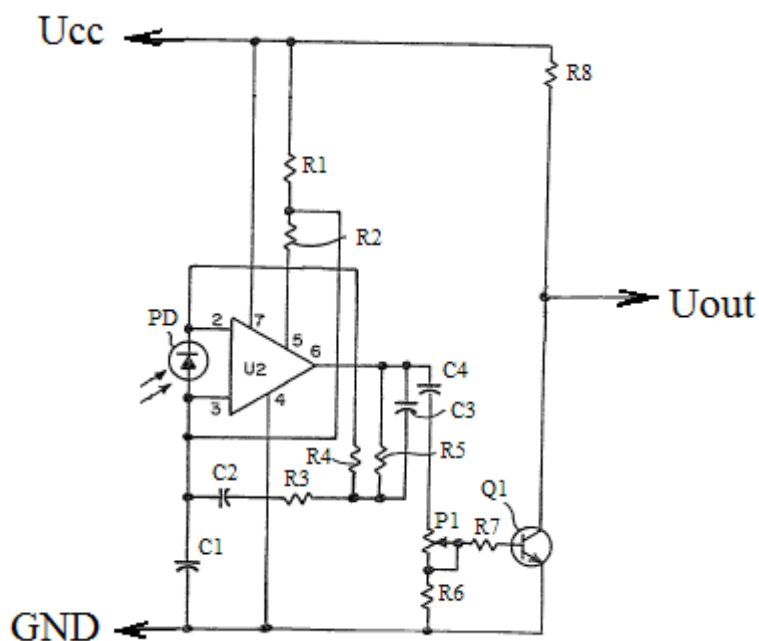


Рис.8

Сам ОУ охвачен как отрицательной резистивной обратной связью и емкостной (частотнозависимой) положительной обратной связью. С помощью переменного резистора Р1 устанавливается порог срабатывания пожарного извещателя. А в результате срабатывания на коллекторе транзистора Q1

изменится напряжение так, как меняется логический сигнал: от максимального значения до минимального - от U_{cc} до GND.

В российском патенте № 2032225 [9], патентообладателем которого является Шакиров Виктор Абдулович, предлагалось использовать фотоусилитель на основе ОУ по схеме, приведенной на рис. 9. Это решение отличалось от схемы, приведенной на рис.2, только организацией виртуального нуля с помощью делителя напряжения на двух резисторах, к выходу которого подключен неинвертирующий вход ОУ. Выход этого фотоусилителя подключался непосредственно к входу логического элемента. А электропитание логических элементов и ОУ осуществлялось от одного и того же источника стабилизированного однополярного питания U_{dd} .

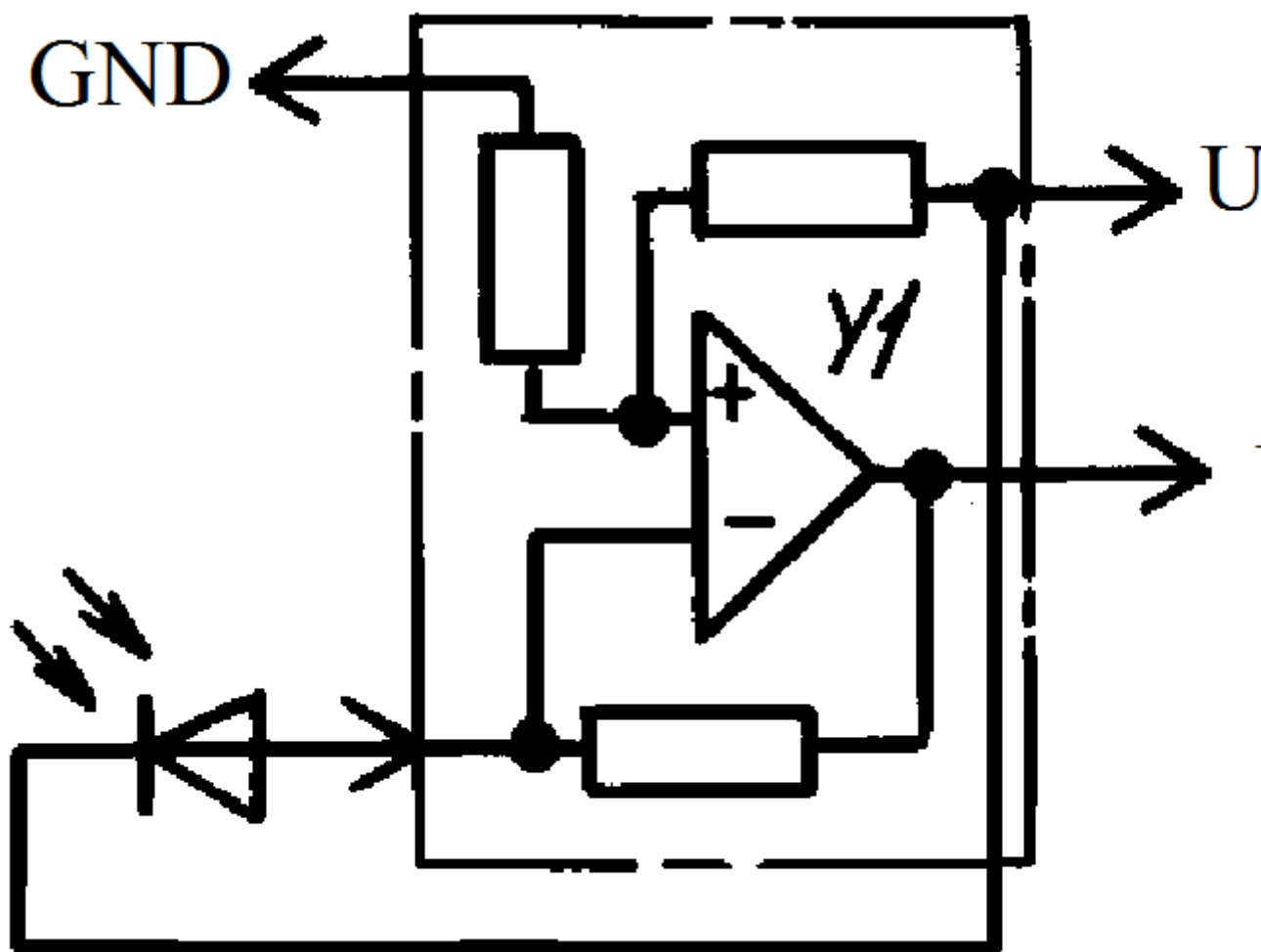


Рис. 9

В процессе разработки пожарных извещателей с применением интегральных микросхем, которая проводилась в середине 80-х годов прошлого столетия, отечественными разработчиками уже применялись быстродействующие отечественные ОУ с малым током потребления. Так, при разработке извещателя ИП 212-5 Шакировым В. А. была применена микросхема КР1407УД2 с дополнительным транзисторным каскадом, который одновременно выполнял три функции:

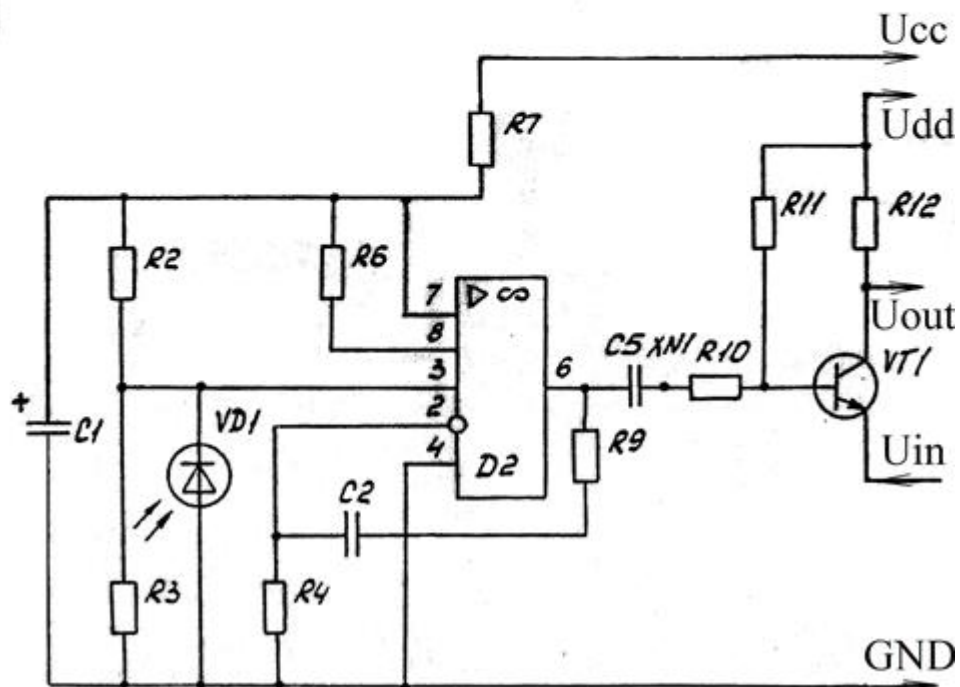


Рис. 10

Необходимо отметить, что в книге академиков МЧС [10] схема усилителя этого извещателя приведена с ошибкой. Там неправильно указаны проводимость транзистора VT1 и точки подключения его коллектора и эмиттера.

В процессе модернизации дымовых пожарных извещателей, которую провел Маслов И. А., был создан извещатель ИП 212-5М. Он отличался от предыдущей модели не только логическим блоком, но и схемой фотоусилителя, представленной на рис. 11. Фотодиод VD1 подключался уже между неинвертирующим входом ОУ и плюсовым выводом конденсатора C1, а транзисторный компаратор был выполнен на р-п-р транзисторе VT1. Но, как и в предыдущей схеме, в дежурном режиме работы этот каскад находился в насыщении, увеличивая тем самым общий ток потребления извещателем. В этом изделии рекомендовалось экранировать выводы фотодиода VD1, как зону наиболее благоприятную для приема сигналов помех.

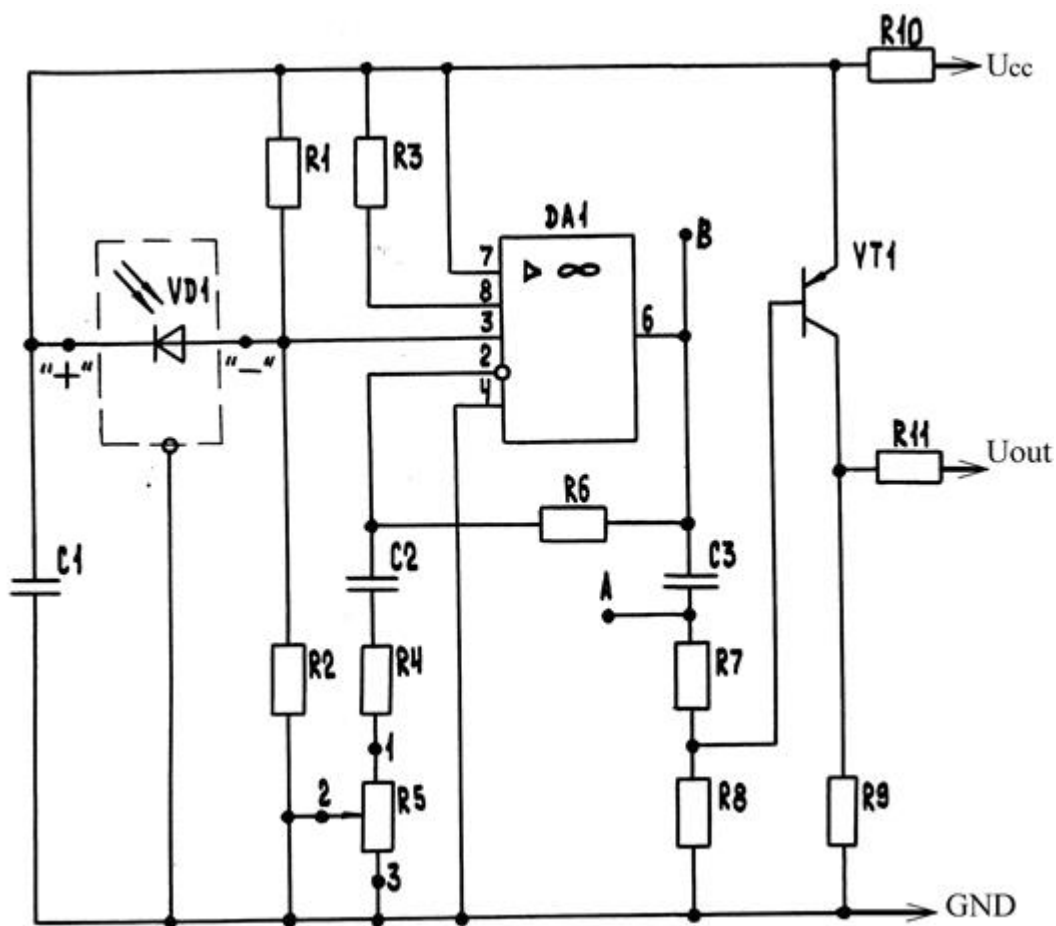


Рис. 11

Абсолютно такое же схемное решение фотоусилителя был использовано в украинском извещателе «Дым-1» фирмы «Алай», только с применением микросхемы КФ1407УД2 для поверхностного монтажа и других комплектующих SMD изделий. Такой извещатель в дежурном режиме работы потребляет 140 мкА, причем, практически треть этой величины «съедает» фотоусилитель.

В фотоусилителе, представленном на рис. 12, который применялся в пожарном дымовом извещателе ИП 212-66, была улучшена фильтрация напряжения питающего фотодиод с помощью двух цепочек R10C4 и R11C1, а транзисторный компаратор был выполнен по типовой схеме на n-p-n транзисторе VT1. Переменным резистором R5, как и предыдущей схеме, регулируется коэффициент усиления фотоусилителя (чувствительность извещателя).

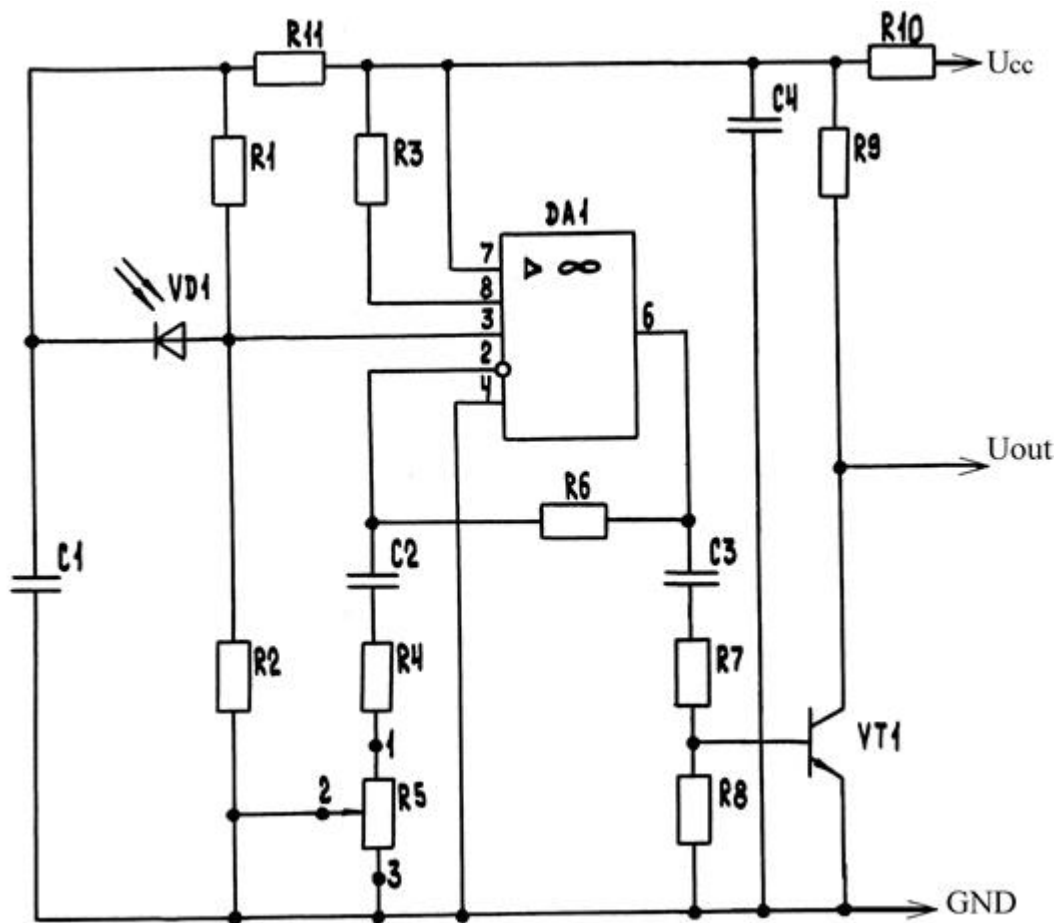


Рис. 12

В техническом решении фотоусилителя по патенту RU 2134907 [11], схема которого приведена на рис. 13, изменена входная цепь по сравнению с предыдущей схемой.

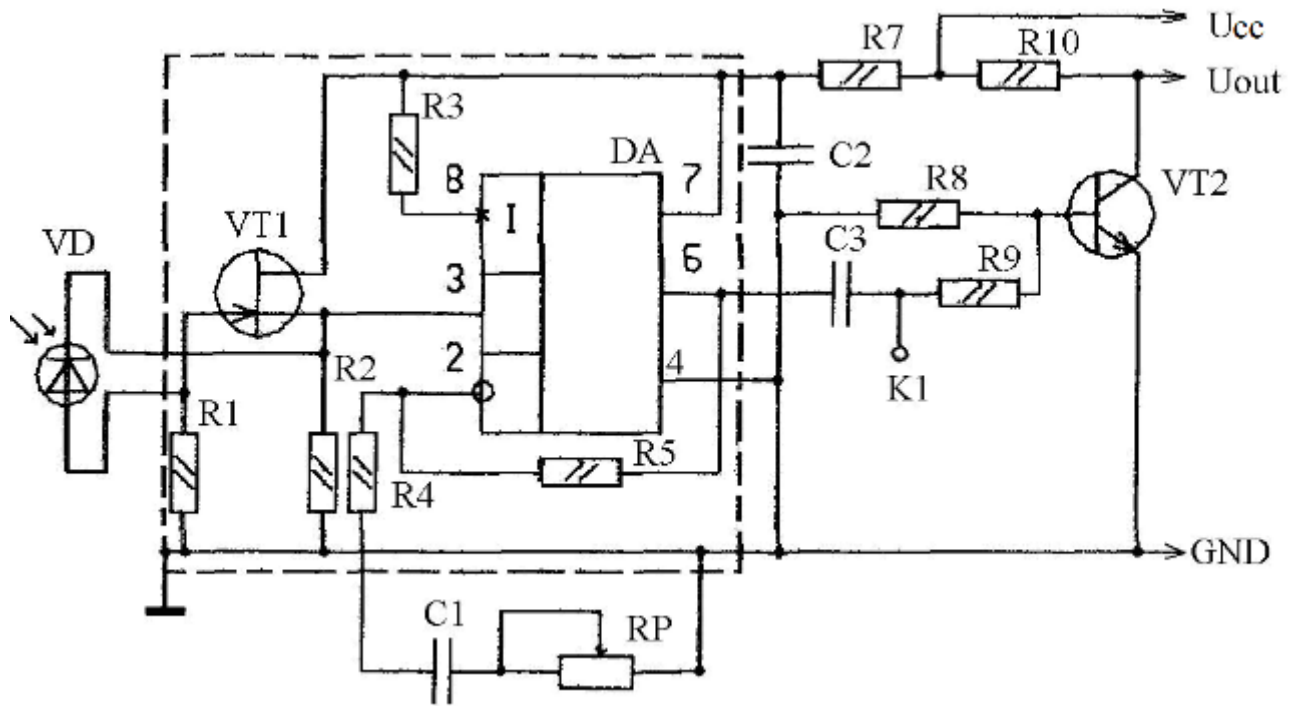


Рис. 13

Как утверждают авторы этого изобретения, полевой транзистор VT1 с двумя резисторами R1 и R2 обеспечивает усиление сигнала, поступающего с фотодиода VD. Но правильнее было бы сказать, что этот полевой транзистор обеспечивает согласование высокого выходного сопротивления фотодиода VD с входным сопротивлением неинвертирующего усилителя переменного напряжения на ОУ. Однако известно, что эта величина даже для ОУ с биполярными транзисторами на входе превышает 10^9 Ом. А ток утечки затвора широко распространенного полевого n-канального транзистора, например КП303Е, может достигать значения 1 мкА в диапазоне рабочих температур. Таким образом, применение полевого транзистора в фотоусилителе на ОУ трудно назвать технически и экономически обоснованным решением. И становится вовсе непонятно, почему фотодиод вынесен за пределы экранировки фотоусилителя, если выводы этого элемента являются весьма эффективной антенной для приема шумового сигнала. Необходимо отметить, что в схеме, приведенной в описании самого изобретения, имеется ошибка – отсутствует 4 вывод питания ОУ, который должен быть соединен с общим проводом устройства. Из этого необходимо сделать главный вывод, что далеко не все схемы, приводимые в описаниях изобретения, являются пригодными для их практического применения, скорее всего они являются только иллюстрацией в обобщенном виде без инженерно-технической конкретизации.

В конце прошлого века автор при разработке микроконтроллерного комбинированного пожарного извещателя серии ИПК, который до настоящего времени производится украинским предприятием СКБ Электронмаш, применил фотоусилитель по схеме, приведенной на рис. 14.

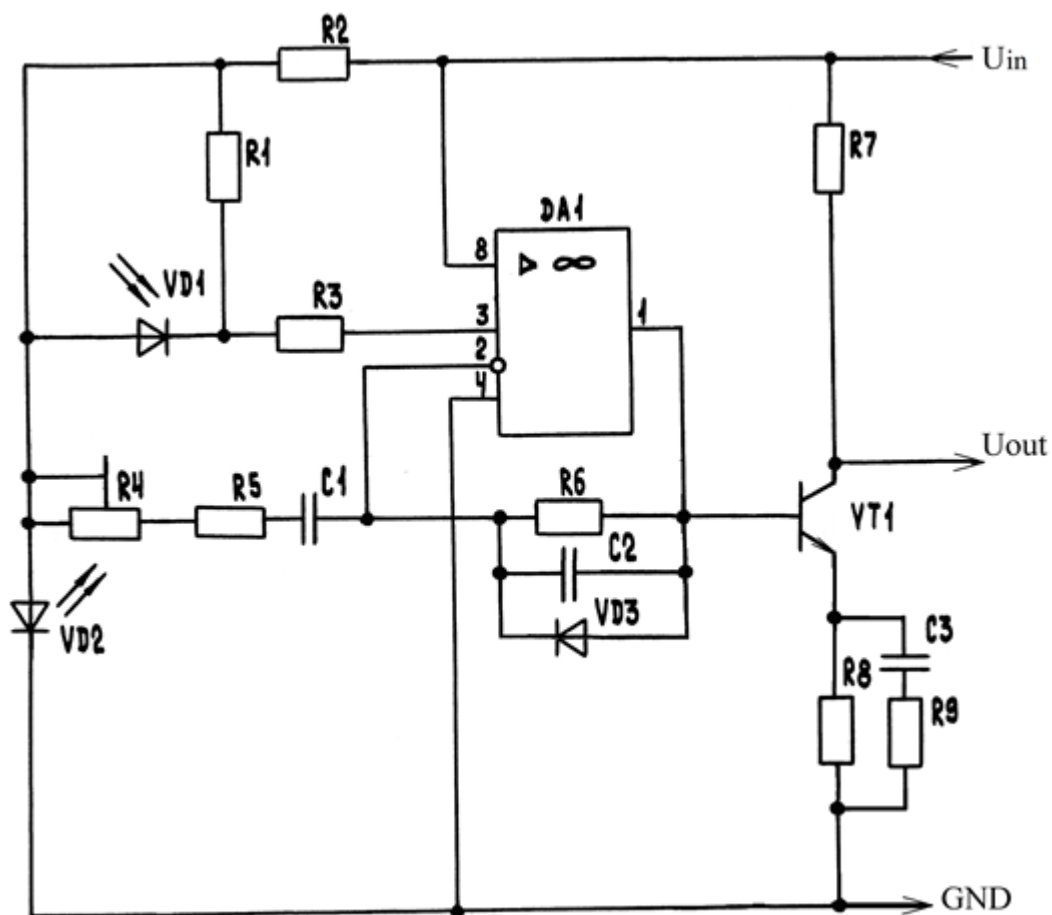


Рис. 14

Электропитание фотоусилителя осуществлялось от того же вывода микроконтроллера, который управлял индикацией дежурного режима работы с помощью красного светодиода VD2. Импульсный потенциал на нем использовалось в качестве виртуального нуля для ОУ AD8542. Фотодиод VD1 подключался к усилителю в фотовольтатическом режиме. Этот фотоусилитель работал в линейном режиме во всем диапазоне необходимых коэффициентов усиления. Выходной каскад имел достаточно низкое выходное сопротивление, что обеспечивало надежное согласование его с входным сопротивлением аналогового входа микроконтроллера. Диод VD3, установленный в цепи обратной связи ОУ обеспечивает ограничение амплитуды импульсов на выходе ОУ.

В самом маленьком в мире автономном дымовом пожарном извещателе SL-602R АТОМ [12], размеры которого $\varnothing 40 \times 40$ мм (см. рис 15), используется фотоусилитель на сдвоенном ОУ по схеме, приведенной на рис. 16.



Рис. 15

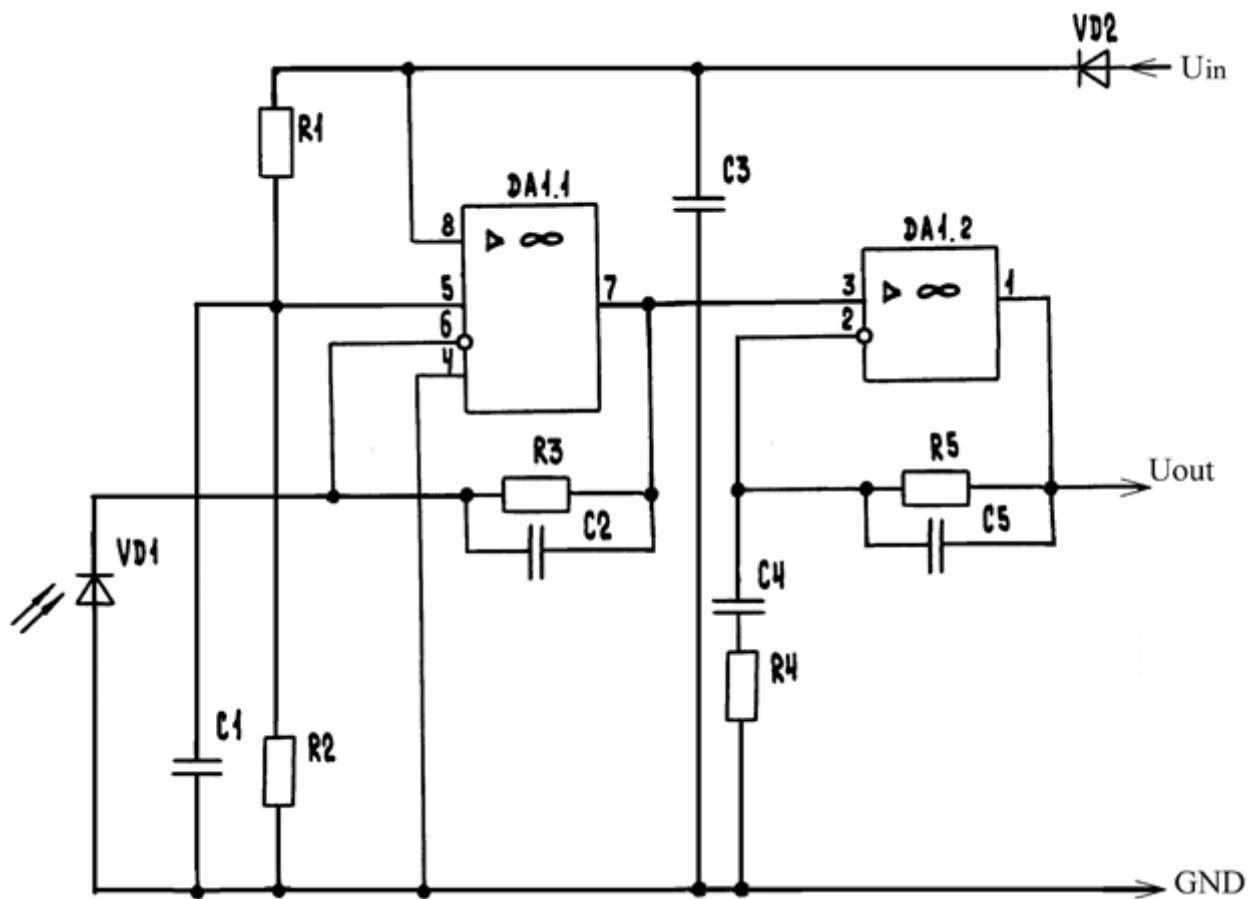


Рис. 16

Особенностью изделия является то, что фотоусилитель состоит из двух каскадов усиления, выполненных на ОУ. Первый каскад соответствует схеме, приведенной на рис. 2 и 6, а второй каскад представляет собой типовой неинвертирующий усилитель переменного тока. Именно этот второй

каскад обеспечивает фотоусилителю необходимый коэффициент усиления, для того, чтобы извещатель соответствовал требованиям нормативных документов по чувствительности.

Практическая схема измерительного усилителя на ОУ для усиления сигналов от фотодиода нашла свое отражение во французском дымовом точечном пожарном извещателе OC05F. Как видно из рис. 17 она содержит счетверенный ОУ, в котором один усилитель не используется. Питание фотоусилителя также осуществляется импульсно от вывода микроконтроллера. С помощью резисторов R1, R2 и R3 создается делитель напряжения виртуального нуля, который подается на неинвертирующие входа первых двух ОУ DA1.1 и DA1.2. На третьем ОУ DA1.3 выполнен дифференциальный усилитель. Резисторы обратной связи R4, R5 и R9 во всех трех ОУ шунтированы соответствующими конденсаторами C1, C2 и C3 для устранения возможности самовозбуждения этого усилителя.

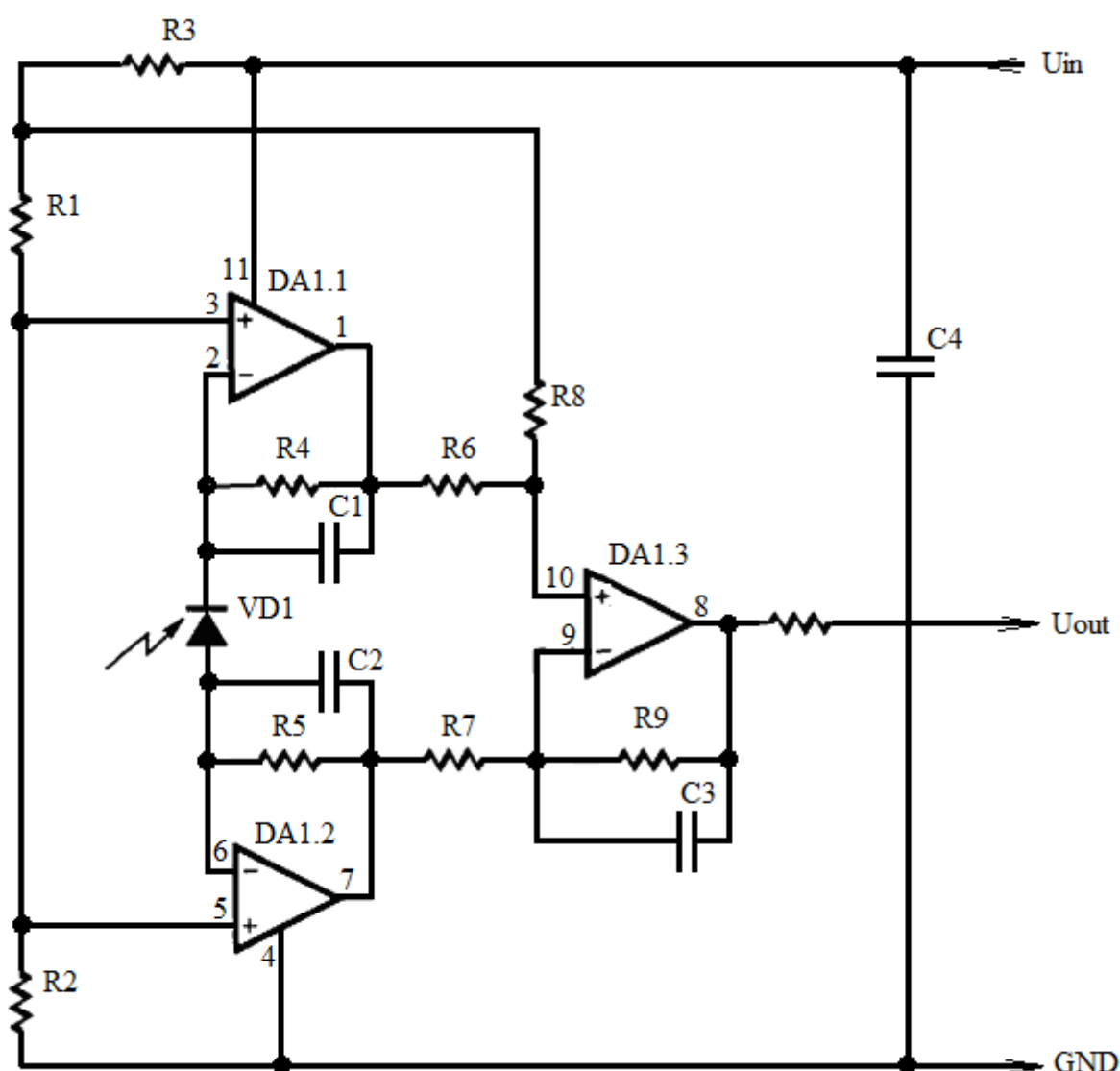


Рис. 17

Несколько иным способом организован фотоусилитель в ASIC TIN104 воронежского ЗАО «ТЕЗИС-ИНТЕХНА», о которой говорилось в первой части публикации [13]. Часть блок-схемы этого изделия представлена на рис. 18.

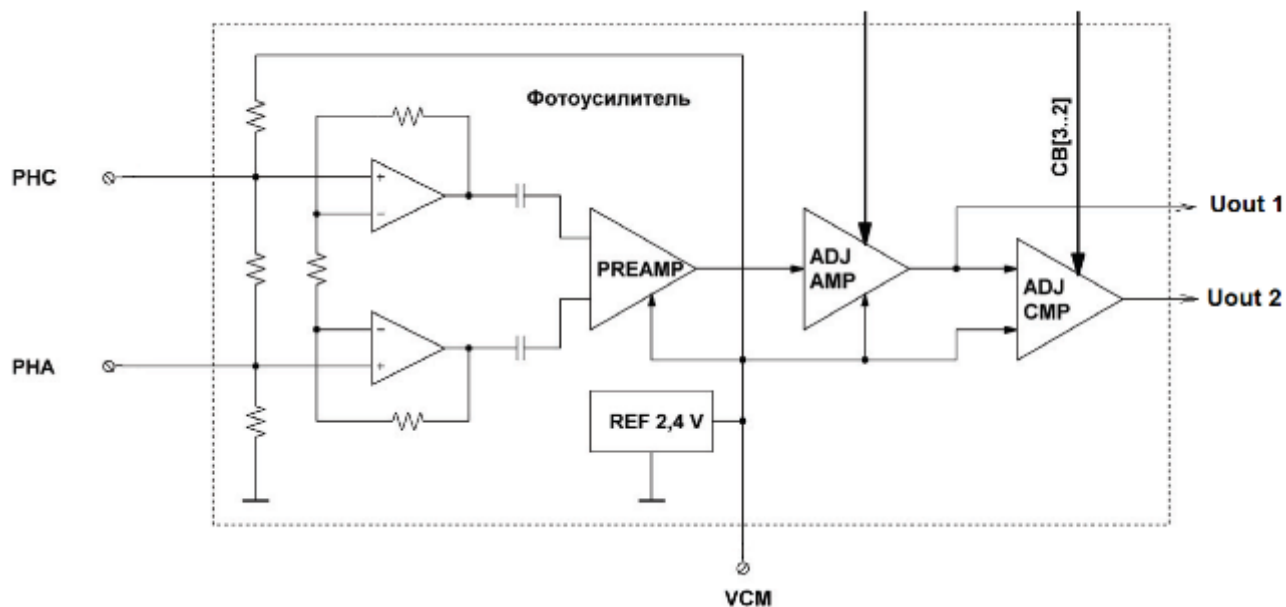


Рис. 18

Если сравнить этот рисунок с предыдущей схемой, то можно заметить два существенных отличия – точки подключения внешнего фотодиода PHC и PHA, а так же емкостное разделение между первым и последующими каскадами. Входное сопротивление у этой схемы во много раз больше, чем у предыдущей и это не способствует помехоустойчивости изделия в целом. Емкостная развязка позволяет избавиться от проблем, возникающих при уходе в насыщение первого каскада. А дополнительные каскады усиления ADJ CMP позволяют программно расширить коэффициент усиления от 30 до 4800. А вот какой из этих измерительных усилителей будет реально лучше, сможет сказать тот, кто будет иметь опыт эксплуатации обоих изделий.

Литература:

1. Алексеенко М. Д. и др. "Микроэлектронные фотоприемные устройства" М. Энергоатомиздат, 1984, с. 85
2. Вендлэнд П. Х. «Светочувствительный датчик в виде пары кремниевый фотодиод – операционный усилитель», ж. «Электроника», 1971, №11, с. 30
3. Graeme, Jerald G. «Photodiode amplifiers: op amp solutions», 1995, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, с. 21

4. Дж. Рутковски «Интегральные операционные усилители», М, Мир, 1978. с. 310
5. Староверов К. «Датчик дыма на микроконтроллере MSP430F2012», ж. «Новости электроники» № 2, 2010 г., с. 16 <http://www.compel.ru/lib/ne/2010/2/5-datchik-dyima-na-mikrokontrollere-msp430f2012/>
6. <https://www.google.com/patents/CA1242256A1?cl=en&dq=CA1242256&hl=ru&sa=X&ei=ZrO2U8DpSM4gShzYGYBA&ved=0CB0Q6AEwAA>
7. Брюс Картер и Рон Манчини ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ДЛЯ ВСЕХ М. Додэка-XX1, 2011, с. 64 <http://www.booksshare.net/index.php?id1=4&category=electrotech&author=karter-b&book=2011>
8. Баканов В. Дымовые оптико-электронные точечные пожарные извещатели. Основные схемные решения. Части 2.1 и 2.2 Фотоусилители на транзисторах <http://daily.sec.ru/authorpbls.cfm?aid=561>
9. <http://www.google.com/patents/CA1079381A1?cl=en&hl=ru>
10. Бабуров В.П., Бабурин В.В., Фомин В.И. Технические средства систем охранной и пожарной сигнализации. Часть 2: Технические средства пожарной сигнализации: Учебно-справочное пособие / Под общ. ред. В.И. Фомина. - М.: Изд-во «Пожнаука», 2009, с. 48
11. <http://www.findpatent.ru/patent/213/2134907.html>
12. 2 Баканов В. «Инновации в автономных пожарных извещателях», ж. «Алгоритм безопасности» № 1, 2013, с. 36
13. Баканов В. «Дымовые оптико-электронные точечные пожарные извещатели. Основные схемные решения. Часть 1.5. Блок-схемы» <http://daily.sec.ru/2014/07/04/Dimovie-optiko-elektronnie-tochechnie-posharnie-izveshateli-Osnovnie-shemnie-resheniya-CHast-15-Blok-shemi.html>