

УДК 621.3.049

**АНАЛИЗ СХЕМ УСИЛИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ФОТОДАТЧИКА ИК-  
ДИАПАЗОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОВЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК БИОМАССЫ**

**Зайцев Юрий Константинович**

ассистент

ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ,

г. Мичуринск, Россия

**Аннотация:** Представлен анализ электронных схем усиления сигнала фотодиода ИК-диапазона, построенных на полупроводниковой базе, для замены электронных ламп во входной цепи фотодатчика, применяемого в спектрофотометре СФ-4 и современных приборах для оптических измерений.

**Ключевые слова:** фотодиод, малощумящий усилитель фототока, аналоговый усилитель постоянного тока, операционный усилитель с высоким входным сопротивлением.

В качестве инструмента для исследований процессов теплового характера в растительной среде, применение пирометров ИК-диапазона предоставлено большим выбором от цифровых (MLX-90247 и другие) до готовых пирометрических термометров. Использование готовых измерительных приборов всегда предпочтительней. Попытка создания подобных инструментов может быть интересным в том плане, с какими трудностями приходится сталкиваться конструкторам высокочувствительных приборов.

Данная работа преследует цель замены в спектрофотометрах старых выпусков СФ-4 измерительного тракта, чувствительного в длинноволновом участке ИК-диапазона.

Для усиления сигнала датчика яркостной температуры (термо- или фото-Э.Д.С.) проанализированы схемы с ОУ с нормированным уровнем шума. Одна такая работа приведена в журнале Радиомир № 9 от 2013 г. [1] Данный усилитель сигнала фотодатчика ФД-256 построен на двух ОУ с входным звеном на сборке КПС-104А с нормированным уровнем шума:  $K_{ш}=0,4$  дБ, рис.1.

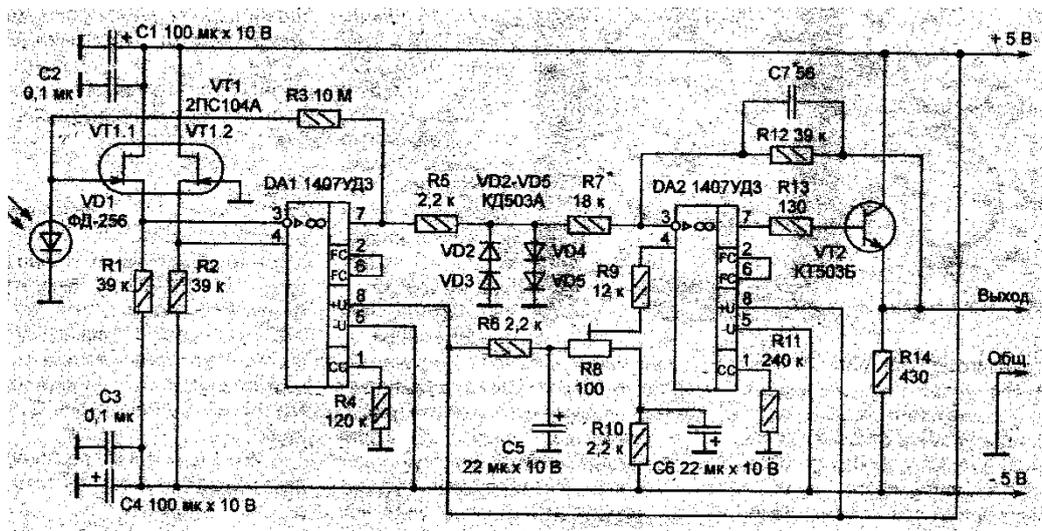


Рис.1 Принципиальная схема усилителя сигналов фотодатчика на МШУ 1487УД3.

Отрицательная обратная связь входа (источкового повторителя дифференциальной схемы двух согласованных транзисторов VT1.1 и VT1.2 с малым током утечки затвора) и выхода ОУ DA1 через резистор R3 повышает входное сопротивление схемы до 10 МОм. Как следует из описания, входная ёмкость, определяющая быстродействие и паразитная емкость ОС ( $C_{пар}=3$  пф) устанавливают верхнюю границу усилителя 70 кГц при соотношении сигнал/шум 2В/0,75 мкВ на выходе. При этом чувствительность к входному току  $I_{вх}=10$  нА. Вся усилительная схема заключена в экран из листового пермаллоя, в котором для приемника оптического излучения сделано отверстие, а цепи питания и выходного напряжения выполнены на разъёмах. Получается, что включение датчика в фотovoltaическом режиме и выжим максимальной чувствительности на первом плане выдвигают качество монтажа с целью устранения наводок от вносимых магнитных полей. Температурная стабильность, корректировка дрейфа нуля  $\pm 200$  мВ, динамический диапазон 60 дБ связанный с шумами в датчиках-

интерферометрах типа угла поворота достигнуто, как отмечено в статье, на отечественной базе, что бесспорно, актуально для тех годов.

Для полевых транзисторов во входных цепях интересна работа под названием “Необычный режим работы полевого транзистора” (Межлумян А. [2]), из которой следует возможность работы транзистора в зоне прямого смещения, приведенная на рисунке 2. При этом транзистор ещё сохраняет своё основное достоинство - высокое входное сопротивление.

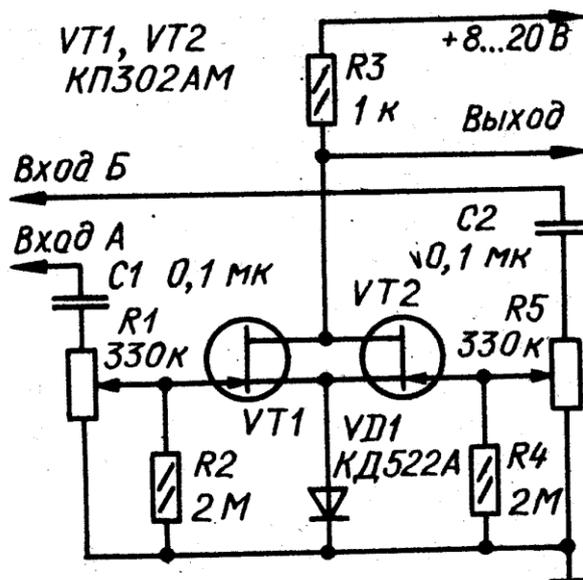


Рис.2 Пример практического применения режима прямого смещения в двухканальном смесителе сигналов.

Важно, чтобы  $U_{вх}$  не превышало определенное значение  $U_m$ . Напряжение затвор исток должно быть меньше или равно  $U_m$ , где для КП302гм значение  $U_m=0,3В$ , а КП303А -  $U_m =0,55 В$ . “При соблюдении этого условия транзистор с р-п затвором становится аналогичным по характеристикам транзистору с изолированным затвором и встроенным каналом, который способен работать при прямом и обратном смещении на затворе. Но, конечно, рабочая область зоны прямого смещения короче, ограниченная указанным  $U_m$ ”. То есть мы имеем применение истокового повторителя при прямом смещении на затворе и влияние наводок будет меньше. Что еще интересно, как отмечается в данной статье, в устройстве желательно применить транзисторы с близкими значениями  $U_{отс}$  и  $I_0$ , однако вполне допустимо разброс этих параметров до 50-100%, а разность усиления по

каналам компенсировать входным регулятором. Это означает, что вместо сборки КПС 104, низкочастотной, с крутизной  $S=0,35$  мА/В, применимы транзисторы с р-п затвором с большей крутизной, с нормированным уровнем шумов, например СВЧ- технологии КПЗ12. Данное решение мы находим в работе, приведенной в журнале Приборы и техника эксперимента №1,1990г. “Практические схемы широкополосных фотоприёмников”[4]. Данная схема приведена на рис.3.

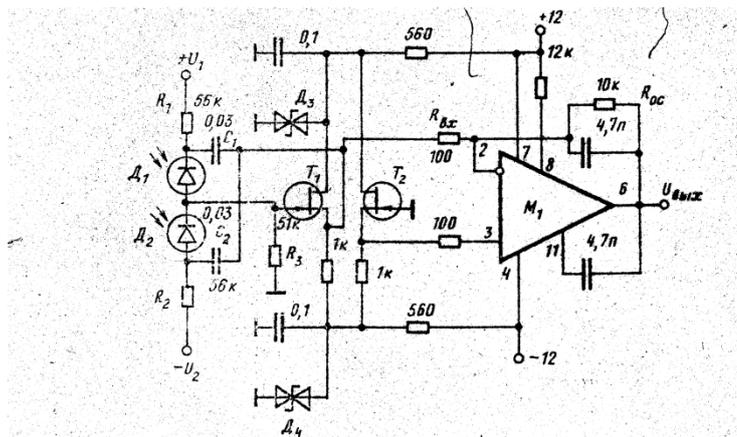


Рис.3. Принципиальная схема фотоприёмника на основе малошумящего усилителя с повторителем на входе. М1-КР1407УД1, Т1,Т2-КПЗ12А, Д1,Д2-ФД115Л, Д3,Д4-КС162А.

В приведенной схеме, как отмечено в статье, фотодатчики работают в режиме обратного смещения или так называемом фотодиодном, при этом чувствительность лавинных фотодиодов Д1 и Д2 максимальна при напряжении смещения близком к предпробойному. Это напряжение индивидуально для каждого фотодиода (ФД 115Л) и его необходимо выставлять достаточно точно чтобы он не вызвал необратимых изменений резисторами R1и R2, а для выравнивания чувствительности фотодиодов следует уменьшать напряжение того из них, чувствительность которого выше. Дифференциальное включение фотоприемников, как отмечено в статье, является основой данной схемы. Необходимо учесть, что например селеновые фотодатчики Ф-33С, Ф-37С, Ф-54С можно использовать только в вентильном (фотогальваническом) режиме, то есть без подачи на них напряжения от внешнего источника (Радио №6, 1992г, с.57).

Параметры схемы, построенной на дифференциальном фотоприёмнике, - чувствительность:  $1,5 \cdot 10^6$  В/А=1,5 В/мкА, спектральная плотность шума,

приведенная ко входу, составляет  $S_{ш} \approx 5 \text{ нВ}/(\text{Гц}^{1/2})$  при  $R_r=10 \text{ кОм}$ . Шумы второго повторителя Т2 складываются с шумами первого и с шумами усилителя. В случае полной компенсации емкостей фотодиода на ОУ К1407УД1 полоса пропускания  $\geq 15 \text{ МГц}$ . Рекомендации по монтажу устанавливают требования экранирования фотодиода и входного каскада, установку блокировочных конденсаторов по ВЧ в цепях питания. Питание – операционных усилителей двуполярное, в первом варианте  $\pm 5 \text{ В}$ , во втором  $\pm 12 \text{ В}$ . В обоих случаях применены отечественные ОУ с нормированным уровнем шума 1407УД1; 1407УД3. Первый вариант допускает соединение фотодиодов в матрицу.

В качестве альтернативы решения: фотодиод- каскад на ПТ-каскад на ОУ с нормированным уровнем шума - буферный каскад на ОУ с нормированным уровнем шума,- современная база располагает ОУ с полевыми транзисторами на входе, такими как 140УД8 и 544УД1 с максимальной частотой 1МГц [5]. Одна такая схема с применением данных микросхем, предназначенная в качестве высокочастотного милливольтметра, имеющая, как указывается, линейную шкалу и не требующую жестких конструктивных требований описана в журнале Радио №7, 1992г. А. Пугач[3]. Принципиальная схема прибора приведена на рис. 4. Высокое усиление схемы обеспечивают ОУ с коэффициентом усиления по напряжению  $K_U=50 \cdot 10^3$ .

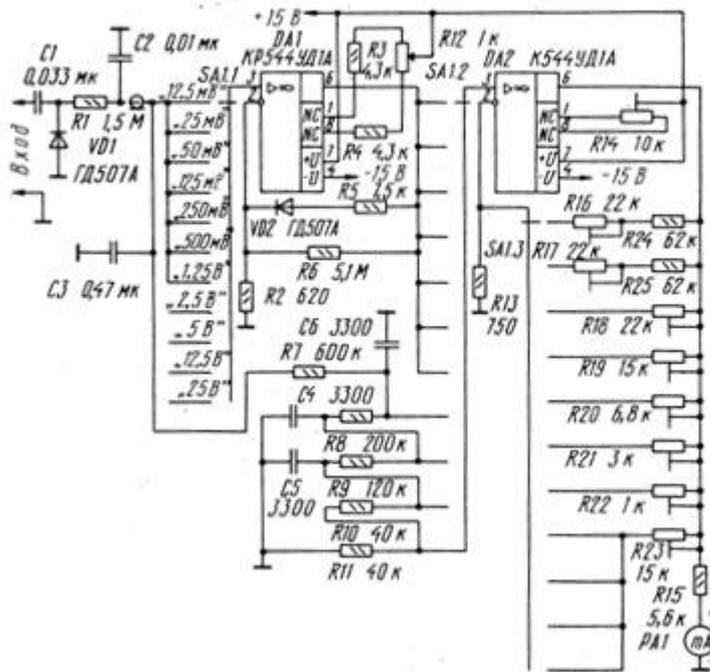


Рис.4. Принципиальная схема милливольтметра на ОУ общего назначения 544УД1А.

Входное сопротивление 1000 Мом достигается наличием полевых транзисторов микросхем. Входной ток 0.2 нА. Коэффициент нарастания сигнала 5 В/мкс. Коэффициент усиления 50 В/мВ. Рассмотрим выходные параметры наиболее распространенных фотодатчиков – фотодиода, чтобы определить, какие входные параметры должен иметь усилитель тока фотодиода. Например, характеристики фотодиода SD-020-12-001, предназначенного для фотоэлектрических измерений [6]:

- чувствительность -----100нА/лк;
- емкость (при обратном напряжении 10 В)-----50 пФ;
- внутреннее сопротивление короткого замыкания (фотовольтаический режим)-----1000 Мом;
- время отклика-----12 нс.

Исходя из значения выходного сопротивления преобразователя  $Z_s$ , оценим входное сопротивление усилителя  $Z_i$  погрешностью взаимодействия  $\gamma_{вз}$  (рис.5). Чтобы погрешность измерения была в 10 раз меньше, отношение входного сопротивления измерительного прибора  $Z_i$  к сопротивлению источника сигнала  $Z_s$  должно быть в 10 раз больше[8] , т.е:

$$\gamma_{вз} = \frac{Z_s}{Z_i} \cdot 100\%$$

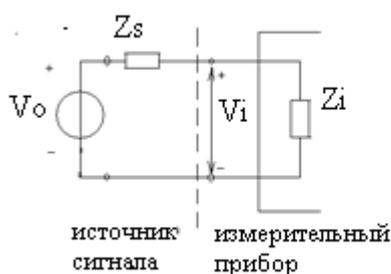


Рисунок 5. Функциональная схема: источник сигнала-измерительный прибор.

Из рассмотренных выше схем, все кроме схемы на рис.4, имеют недостаточное входное сопротивление- 10 Мом первая, порядка 1Мом- схема на рис.3 и 1000 Мом для схемы на рис.4.

Рассмотренные схемы требуют двуполярный источник питания. В литературе [6] есть замечание, что: «если источник сигнала однополярный (например, фотодиод), целесообразно использовать операционный усилитель с однополярным питанием. Это позволит питать усилитель от одной батареи или даже одного элемента, например литиевого, напряжением 3В. При синфазном включении фотодиода, если диапазон синфазных сигналов выходит за рамки нижнего и верхнего уровней напряжения питания:- «...многие типы ОУ, особенно ранние модели не допускают синфазных напряжений, близких к напряжению питания, так как в этом случае возможен триггерный эффект («защелкивание» усилителя) или переворот фазы, когда полярности выходов меняются на противоположные. В усилителях с питанием от однополярных источников такие явления исключены» стр.50. Тем интересней вариант схемы усилителя фототока с однополярным питанием, приведенной в книге Б. Бэйкер [7] «Правильное использование входного и выходного каскадов ОУ» с.159, для работы в составе с аналого-цифровым преобразователем (рис.5).В данном варианте схемы используются операционные усилители ф. Microchip Technology с нормированным уровнем шума  $K_{ш}=8,7 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$ , КМОП- структуры с входным импедансом  $10^{13} \text{ Ом}/(C_{вх}/6)$  –уменьшается на 6 от вх. емкости, усилением  $\text{Gain} = 70 \text{ дБ}$  (это где-то  $K_U=10 \cdot 10^3$ ) и напряжением питания 7В. Нагрузкой усилителя является

высокоомная схема АЦП, а нам надо на выходе миллиамперметр. Сопротивление нагрузки (рамки миллиамперметра) 260 Ом. Требуемый коэффициент усиления  $K_U = R_{\text{вх}}/R_{\text{вых}}$ ;

Имеем  $K_U = 1000 \cdot 10^6 / 260 = 3,85 \cdot 10^6$ . Это ориентировочно 2 тыс. на каскад в двухкаскадном варианте. Значит ОУ должен иметь как можно больший коэффициент усиления, что мы видим в схеме ВЧ-вольтметра ( $K_U = 50 \cdot 10^3$  или 50 В/мВ для 544 УДА).

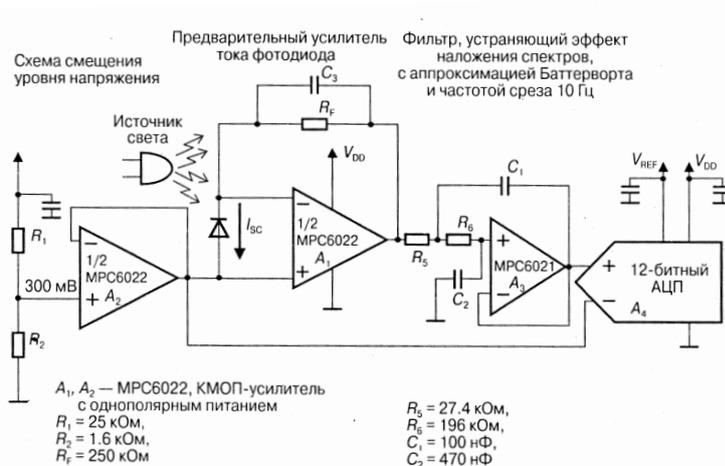


Рис. 5. Схема усилителя фототока на ОУ с однополярным питанием.

Объяснение очень низкого коэффициента шума дано в [5], где сформулированы «общие положения, которыми следует руководствоваться при создании схем на ОУ:

при сопротивлениях источника сигнала до 100 кОм ОУ на БТ имеют значительно лучшие характеристики, чем усилители с ПТ на входе». И там же приведено, что «значение шумового тока для ОУ с ПТ на входе трудно измерить из-за его малости, так для диапазона частот 10 Гц-100 кГц значение  $i_{ш}$  ОУ типа 544УД1 меньше  $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ нА}/\sqrt{\text{Гц}}$ ». Это позволяет прикинуть, что на входном сопротивлении 1 Мом напряжение шумов  $K_{ш} = 0,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^6 = 5 \text{ нВ}/\text{Гц}^{1/2}$ , что не хуже зарубежных микросхем.

Для сравнения рассмотрим характеристики ОУ общего применения:

--AD820, применяемой так же для схем с однополярным питанием ф. Analog Device[9]:

-коэффициент усиления 1000 В/мВ;

-входной ток 0,002 нА;

-дифференциальное входное сопротивление  $10^7$  Ом;

-частотная область  $f_T=1,8$  МГц;

-скорость нарастания 3В/мкс.

--MAX406:( $R_{вх}=\infty$ ,  $K_U=1000$  В/мВ,  $I_{вх}=0,1$ пА,  $R_{out}=\infty$ ) один источник 2,5÷10В;

--TLV2401:( $R_{вх}=300$  Ом,  $K_U=1800$  В/мВ,  $I_{вх}=0,35$ нА,  $R_{out}=60$ Ом) напряжение питания 2,5÷16В, сверхмалый ток потребления.

Таким образом, можно сделать вывод, что конструктивно простым будет усилитель по схеме на рис.5, но входной усилитель А1 дополнить каскадом на ОУ AD820 или другим, но с ПТ на входе. Для сравнения вместо малошумящего поз.А1 применить микро мощный TLV2401 с отдельной батареи питания.

### ***Список литературы***

1.Радиомир № 9, 2013 г. Усилитель сигналов фотодатчика. О. Ильин. с.18-21.

2. Радио №3, 1991г. Необычный режим работы полевого транзистора А. Межлумян. с.56-58.

3.Радио №7, 1992г. Высокочастотный вольтметр с линейной шкалой А.Пугач. с.37.

4. Приборы и техника эксперимента №1 от 1990 г. Практические схемы широкополосных фотоприемников Е.Г. Волков и др. с 174-176.

5.Алексеев А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых ИС.-М.:Советское радио,1980.

6.Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств Г.И.Волович. 2-издание Москва.: Издательский дом «Додэка», 2007г.

7. Что нужно знать цифровому разработчику об аналоговой электронике. Бонни Бэйкер. Москва.:Издательский дом «Додэка», 2010г.

8.Электрические измерения. Панфилов В.А. 7-е издание,  
Москва.:Издательский центр «Академия», 2012 г.

9.[www.analog.com](http://www.analog.com)

**THE ANALYSIS SCHEMES OF AMPLIFIER SIGNAL THE  
FOTOSENSITIVE IR- RANGE FOUR INVESTIGATION THERMAL  
CHARACTERISTICS BIOBULK PLANT**

**Zaijev Yuri Konstantiovich**

assistent

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

**Summary:** the analyses of electroni signal amplification currents of infrared phototube, built on a semiconductor base, tu replace the electronic tubes in the input circuit of the pftodetector, use in the spectrophotometre SF-4 and modern devices for optical measurement.

**Keywords:** phototube, photodiode, low noise photocurrent amplifier, operational amplifier with highest input impedance.