

01;07

## **Влияние низкочастотных шумов на пороговую чувствительность фотодиодных фотоприемных устройств среднего ИК-диапазона в широкой полосе частот**

© С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: g.sotnikova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 9 апреля 2014 г.

Представлен анализ низкочастотной составляющей шумов фотодиодного фотоприемного устройства, выполненного по схеме трансимпедансного усилителя. Показано, что низкочастотная (дрейфовая) составляющая шумов во входных цепях современных операционных усилителей вносит определяющий вклад в результирующие шумы фотоприемных устройств на основе фотодиодов  $A^3B^5$  вплоть до частот порядка сотен kHz. Предложен наглядный „векторный“ метод описания шумовых характеристик элементов фотоприемного устройства с целью выбора оптимального типа операционного усилителя для достижения предельных характеристик чувствительности и точности при требуемом быстродействии.

Интерес к использованию фотодиодов в ИК-измерительной технике связан не только с их высокой чувствительностью и возможностью работы без дополнительного смещения, но главным образом с малым временем отклика, что позволяет создавать широкополосные измерительные устройства для регистрации постоянного уровня излучения и происходящих на его фоне быстропротекающих процессов.

Данная статья является продолжением работы [1], в которой был выполнен анализ шумов фотоприемных устройств (ФПУ), содержащих фотодиоды (ФД) на основе структур  $A^3B^5$  с различной величиной динамического сопротивления  $R_0$  и операционных усилителей (ОУ), характеризуемые различным уровнем спектральных плотностей шума по току ( $\sqrt{i_n^2}$ , A/ $\sqrt{Hz}$ ) и по напряжению ( $\sqrt{e_n^2}$ , V/ $\sqrt{Hz}$ ). Было показано,

что при выборе ФД для реализации высокочувствительного ФПУ необходимо проводить анализ не только традиционных параметров, таких как обнаружительная способность ( $D$ ) или эквивалентная шумовая мощность (NEP), но и сопротивления диода  $R_0$ . Малые значения  $R_0$  (десятки  $\Omega$  — единицы  $k\Omega$ ), являющиеся следствием принципиальных свойств  $A^3B^5$  полупроводниковых структур, требуют для реализации предельной пороговой чувствительности ФПУ усилителей с минимальными значениями шума по напряжению.

В предлагаемой работе показано, что низкочастотный дрейф напряжения смещения на входе и  $1/f$  шум ОУ накладываются в виде аддитивной помехи на выходной сигнал ФПУ во всей полосе детектирования полезного сигнала, включая его высокочастотные составляющие. Вклад этой составляющей шумов оказывается тем существеннее, чем меньше сопротивление источника сигнала, поэтому для ИК-фотодиодов с малым динамическим сопротивлением низкочастотная (НЧ) составляющая шумов становится одним из основных факторов, ограничивающих пороговую чувствительность ФПУ в широкой полосе частот детектирования сигнала.

Основной задачей ФПУ является максимально точное преобразование выходного сигнала (тока) ФД в линейно зависящий от него измеряемый сигнал напряжения. При ее решении возникает противоречие между обеспечением требуемого быстродействия и разрешения, и шум ФПУ представляет собой основной ограничивающий фактор. В центре этого противоречия находится преобразователь тока в напряжение, работа которого определяется многими факторами, и, как следствие, появляются альтернативные конфигурации с оптимизацией различных параметров.

Шум на выходе ФПУ определяется суммой собственного шума ФД и шумов, вносимых электронной схемой преобразования и усиления сигнала. Предельная пороговая чувствительность ФПУ достигается, если шумы усилителя не превосходят собственные шумы ФД, характеризуемые спектральной плотностью его теплового шума, выраженной в вольтовом ( $\sqrt{4kTR_0}$ , V/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) или токовом ( $\sqrt{4kT/R_0}$ , A/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) эквивалентах. Для получения линейной зависимости выходного сигнала ФПУ от мощности излучения на его входе необходимо использовать измеритель тока с нулевым входным импедансом. Нулевой импеданс обеспечивает ОУ, что и является ключевым моментом выбора базовой схемы преобразования тока ФД в напряжение — схемы трансимпедансного усилителя [2,3] с коэффициентом преобразования  $K$  (V/A),

численно равным величине сопротивления  $R_f$  в цепи обратной связи усилителя.

При выборе элементов усилителя-преобразователя тока ФД руководствуются главным образом входным шумовым током  $I_{n-OP}$  и шумовым напряжением  $U_{n-OP}$  операционного усилителя, характеризуемыми спектральными плотностями по току ( $\sqrt{i_{OP}^2}, A/\sqrt{Hz}$ ) и напряжению ( $\sqrt{e_{OP}^2}, V/\sqrt{Hz}$ ), и шумом, вносимым сопротивлением обратной связи  $R_f$ , характеризуемым спектральной плотностью  $\sqrt{4kTR_f}, V/\sqrt{Hz}$ . Суммарный шум в полосе пропускания ФПУ ( $\Delta f, Hz$ ) рассчитывается в токовом или вольтовом эквивалентах по формулам

$$I_n(\Delta f) = \sqrt{(i_{OP}^2 + i_{R_f}^2)\Delta f} = \sqrt{\left(i_{n-OP}^2 + \left(\frac{e_{n-OP}}{R_0}\right)^2 + \frac{4kTR_f}{R_f^2}\right)\Delta f} [A],$$

$$U_n(\Delta f) = \sqrt{(e_{OP}^2 + e_{R_f}^2)\Delta f} = \sqrt{\left(R_0^2 i_{n-OP}^2 + e_{n-OP}^2 + 4kTR_f \frac{R_0^2}{R_f^2}\right)\Delta f} [V],$$
(1)

где  $T$  — абсолютная температура, К.

Так как обычно  $R_f \gg R_0$ , то последним слагаемым под корнем в (1) можно пренебречь. Относительный вклад токовой и вольтовой составляющих шумов ОУ в суммарный шум ФПУ, как видно из верхней строчки выражения (1), существенно зависит от значения  $R_0$ , что обычно и определяет выбор ОУ различных типов — с минимальными значениями токового или вольтового шума. Типы ОУ фирмы Analog Device [4], обладающие наилучшими на сегодняшний день параметрами шумов и рекомендованные для использования в усилительных схемах сигнала ФД, представлены в таблице.

Создание фотометрических измерительных систем на базе ФПУ предполагает обеспечение высокой точности и воспроизводимости результатов в широкой полосе частот  $\Delta f = F_B - F_H$  начиная от измерения постоянного уровня сигнала ( $F_H = 0$ ) до регистрации его быстрых изменений ( $F_B$ ). Низкочастотные составляющие шума (НЧ, в английской транскрипции, low frequency, LF) всегда будут присутствовать в сигнале независимо от значения верхней граничной частоты детектирования ( $F_B$ ). НЧ  $1/f$  шум ОУ задается пиковым значением напряжения шумов ( $V_{p-p}$ ) в полосе 10 Hz, которое связано с его среднеквадратичным значением  $V_{p-p} = 6V_{rms}$ . К другой составляющей НЧ-шума усилителя

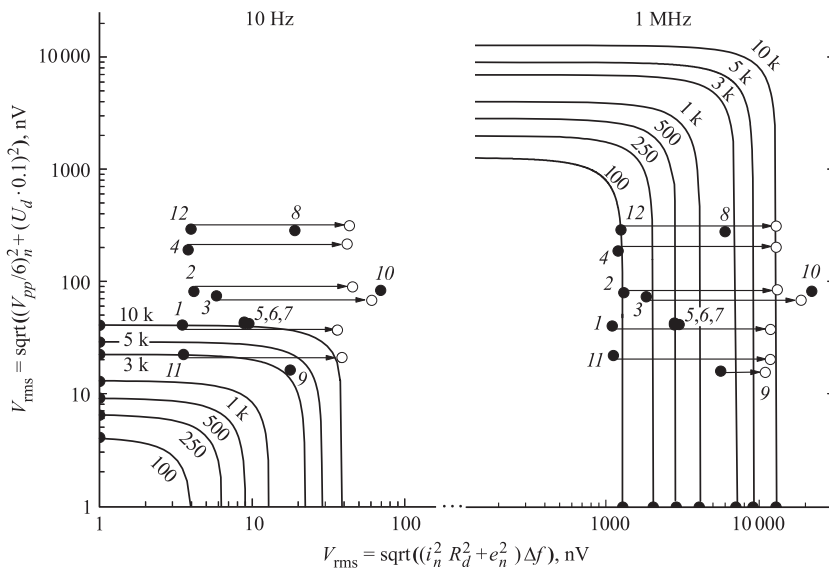
Характеристики операционных усилителей, используемых для фотодиодов (по данным сайта [www.analog.com](http://www.analog.com))

Тип ОУ	Обозначение на рисунке	$1/f$ шум в полосе 10 Hz, $V_{p-p}$ , nV	$\sqrt{e_n^2}$ , $nV\sqrt{Hz}$	$\sqrt{i_n^2}$ , $pA\sqrt{Hz}$	Дрейф смещения нуля $(U_d) dU_d/dt$ , $nV/^\circ C$	Полоса частот, MHz
1	2	3	4	5	6	7
Со сверхнизким уровнем вольтового шума						
AD797	1	50	0.9	2	200–600	110 GBP
AD 8597/99	2	$\leq 76$	1.07	2.4	800	10 GBP
AD4004-1/2/4	3	150	1.8	1.2	700	12 GBP
ISL28190	4	$\leq 50$	1	2.1	1900	170 GBP
AD8675	5	100	2.8	0.3	300–500	10 GBP
AD8671	6	77	2.8	0.3	200–600	10 GBP
OP27	7	80	3	0.4	200–600	8 GBP
Со сверхнизким уровнем токового шума						
AD8610	8	1200	6	0.005	$1-3.5 \cdot 10^3$	25 GBP
С малым температурным дрейфом (zero drift)						
AD4528-1	9	97	5.6	0.7	2–15 (8)	4 UG
AD8628/29/30	10	500	22	0.005	2–20 (10)	2 GBP
Малощумящие высокочастотные						
ADA4895/96/97	11	99	1	1.6	150	230(G=10)
AD8099	12	910	0.95	2.6	2500	380(G=10)

GBP-Gain Bandwidth Production

следует отнести неконтролируемый температурный дрейф смещения ( $U_d$ ) на входе ОУ, характеризуемый параметром  $dU_d/dt$ ,  $V/^\circ C$ .

Анализ современной элементной базы ОУ показывает, что в классе малощумящих ОУ, позиционированных производителями для профессиональной измерительной аппаратуры, в том числе в качестве предусилителей ФД, существует достаточно большой разброс параметров  $V_{p-p}$  и  $dU_d/dt$ . Среди малощумящих ОУ можно выделить класс прецизионных „zero drift“ усилителей, в которых реализован тот или иной метод компенсации дрейфа. Например, в AD4528 это позволяет достигнуть



Координаты вершин „вектора шума“ для всех ОУ из таблицы совместно с шумовыми „изотермами“ для ФД с  $R_0 = 0.1, 0.25, 0.5, \dots, 10 \text{ k}\Omega$  в двух частотных диапазонах  $F_B = 10 \text{ Hz}$  и  $F_B = 1 \text{ MHz}$ .

величины  $dU_d/dt = 8 \text{ nV}/^\circ\text{C}$  (для сравнения, в ультрамалошумящих ОУ типичное значение этого параметра составляет  $400\text{--}2000 \text{ nV}/^\circ\text{C}$ ). Для учета вклада дрейфовой составляющей в общий шум ФПУ определим ее величину как значение  $\Delta U_d$  в диапазоне  $0.1^\circ\text{C}$  — точности поддержания температуры устройства, которая в настоящее время легко может быть достигнута стандартными схемами термостабилизации при установке ФД и микросхемы ОУ на термоэлектрический преобразователь (ТЭП). Суммарный низкочастотный шум ОУ может быть представлен в виде

$$U_n(LF) = \sqrt{\left(\frac{V_{OP-p-p}}{6}\right)^2 + \left(\frac{dU_d}{dt} 0.1\right)^2} \text{ [V]},$$

$$I_n(LF) = \frac{1}{R_0} \sqrt{\left(\frac{V_{OP-p-p}}{6}\right)^2 + \left(\frac{dU_d}{dt} 0.1\right)^2} \text{ [A]}. \quad (2)$$

Как видно из второй строки выражения (2), вклад НЧ шумовой составляющей в сигнальный ток на входе ОУ особенно существенен для ФД с малыми значениями  $R_0$ . Чтобы оценить относительный вклад НЧ шумов в суммарный шум на входе ОУ, представим его для всех усилителей из таблицы в виде точки  $N$  (номер  $N$  соответствующего ОУ приведен во 2 столбце таблицы) на координатной плоскости  $XU$ , где ось  $X$  соответствует составляющей шумов, пропорциональных полосе детектируемого сигнала (1), а ось  $U$  — НЧ составляющей шумов (2). В таком представлении длина вектора, проведенного в точку, характеризующую каждый ОУ, определяет суммарные шумы усилителя. Оптимизация выбора ОУ с точки зрения обеспечения максимальной чувствительности ФПУ при требуемом быстродействии заключается в том, чтобы вершина вектора  $ON$  находилась внутри окружности радиуса  $r = \sqrt{4kTR_0F_B}$ , равного по величине собственным шумам ФД, выраженным, например, в вольтовом эквиваленте:

$$U_{n_{\Sigma}} = \sqrt{U_n(LF)^2 + U_n(F_B)^2} \leq \sqrt{4kTR_0F_B} \text{ [V]}. \quad (3)$$

На рисунке представлены координаты вершин „вектора шума“ для всех ОУ из таблицы совместно с шумовыми „изотермами“ для ФД с  $R_0 = 0.1, 0.25, 0.5, \dots, 10 \text{ k}\Omega$  в 2 частотных диапазонах  $F_B = 10 \text{ Hz}$  и  $F_B = 1 \text{ MHz}$ . Стрелками на рисунке показан диапазон изменения суммарного шума усилительной схемы ФПУ для ФД с сопротивлениями  $R_0 = 0.1-10 \text{ k}\Omega$ , обусловленный вкладом токовой составляющей шума (ОУ № 5–10 обладают сверхнизкими токовыми шумами, поэтому вклад токовой составляющей пренебрежимо мал для всех значений  $R_0$ ). Из рисунка видно, что, несмотря на сверхнизкий уровень шумов по напряжению, при быстродействии ФПУ не более  $0.1 \text{ s}$  ( $F_B = 10 \text{ Hz}$ ) ни один из ОУ, рекомендованных производителями для использования в качестве элемента схемы трансимпедансного усилителя ФД, не обеспечивает пороговую чувствительность ФПУ. Обеспечить уровень шумов усилительной схемы ФПУ, сравнимый с напряжением собственного шума ФД, в этом частотном диапазоне можно только с использованием ОУ типа AD4528 или ADA4895/96 и только для ФД с сопротивлением  $\geq 3 \text{ k}\Omega$ . Анализ рисунка показывает, что неравенство (3) для „векторов шума“ всех рассмотренных ОУ будет обеспечиваться для ФД с  $R_0$  от  $100 \Omega$  начиная с частоты  $F_B$  порядка сотен  $\text{kHz}$ , и только для  $F_B \geq 1 \text{ MHz}$  определяющим становится вклад частотно-зависимой

составляющей шумов. При этом уже существует большой выбор ОУ, которые могут обеспечить предельную чувствительность ФПУ для ФД с сопротивлением  $R_0$  от 100  $\Omega$ . Рисунок приведен для стабилизации температуры ОУ с точностью 0.1 $^{\circ}$ C. При расширении температурного диапазона работы ОУ рост дрейфовой составляющей выразится в соответствующем увеличении ординаты „вектора шума“ для всех типов ОУ и может стать определяющим для ограничения чувствительности ФПУ.

Таким образом, в работе предложено рассматривать температурный дрейф напряжения смещения ОУ как дрейфовую составляющую НЧ-шумов ОУ, величина которого ограничена точностью стабилизации его температуры. Предложен „векторный“ метод анализа шумов ФПУ на базе ФД, отличающихся величиной сопротивления  $R_0$ , при использовании ОУ различных типов. Показано, что в низкочастотных ФПУ ( $F_B \leq 100$  kHz) пороговая чувствительность может быть реализована только на ОУ с „нулевым дрейфом“, в то время как для быстродействующих ФПУ ( $F_B \geq 1$  MHz) выбор ОУ значительно шире.

## Список литературы

- [1] Гаврилов Г.А., Матвеев Б.А., Сотникова Г.Ю. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 18. С. 50–57. (Gavrilov G.A., Matveev B.A., Sotnikova G.Yu. Technical Physics Letters. 2011. V. 37. N 9. P. 866–869.)
- [2] Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1993. Т. 2. 371 с. (Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. Cambridge: Cambridge University Press, 1980, 1989.)
- [3] Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех / Пер. с англ. М.: Додэка-XXI, 2011. 544 с. (Carter B., Mancine R. OP AMPS for everyone. Elsevier Inc, Burlington, USA.)
- [4] Сайт фирмы [www.analog.com](http://www.analog.com)