

**В.Г. Ошлаков**

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ НЕЛИНЕЙНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФОТОПРИЕМНИКА**

Предложена вариация метода сложения световых потоков, которая позволяет оперативно контролировать нелинейность характеристики преобразования фотоприемника.

При измерении относительного изменения светового потока  $\Phi$  с помощью фотоприемника необходимо знать его характеристику преобразования (ХП) (рис. 1,а). «Нелинейность ХП характеризует идентичность минимальных приращений выходного сигнала во всем диапазоне преобразования и определяется как наибольшее отклонение выходного сигнала от прямой линии, проведенной через нуль и точку максимального значения выходного сигнала» [1]. Характеристика преобразования фотоприемника может быть представлена суммой двух функций: первая является прямой, проходящей через точку максимального значения выходного сигнала и нуль, а вторая – погрешностью нелинейности ХП  $\Delta$ :

$$u = a_1 \Phi + \Delta, \tag{1}$$

где  $u$  – параметр на выходе фотоприемника;

$$a_1 = m \operatorname{tg} \alpha,$$

а  $m$  – масштабный коэффициент.

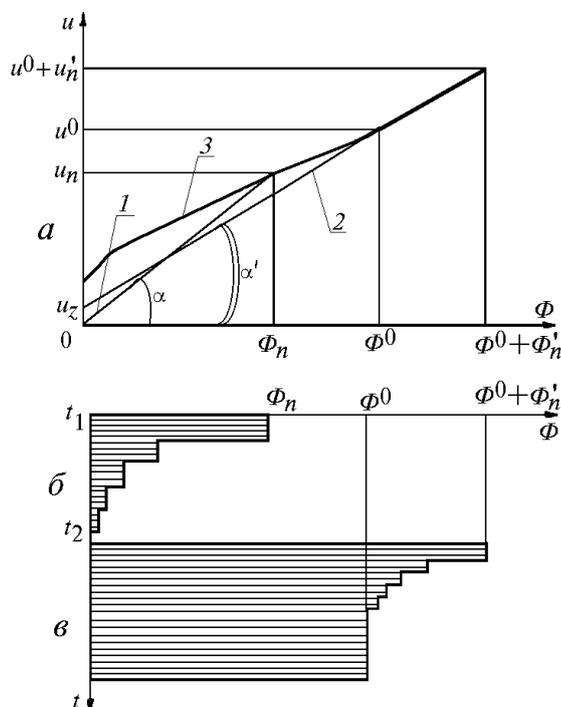


Рис. 1. Характеристика преобразования фотоприемника 3 (а), эпюры сигнала источника  $\Phi$  (б) и суммарного сигнала  $\Phi$  и  $\Phi^0$  (в)

Если ХП линейная в диапазоне измерения  $\tau = \Phi/\Phi_{\text{макс}}$ , то значительно упрощается процедура определения  $\tau$ . Причем при любой величине  $\Phi_{\text{макс}}$  важна линейность ХП до точки, соответствующей  $\Phi_{\text{макс}}$ , так как за счет нелинейности ХП появляется ошибка только в определении сигнала, соответствующего  $\Phi$ . Относительная погрешность определения  $\tau$  при пренебрежении  $\Delta$

$$\delta\tau = \Delta/u, \quad (2)$$

где  $u$  – параметр на выходе фотоприемника, соответствующий световому потоку  $\Phi$ ;  $\Delta$  – погрешность нелинейности ХП при измеряемом световом потоке  $\Phi$ .

Погрешность нелинейности ХП фотоприемника зависит от величины светового потока фона, который сопутствует измеряемому световому потоку, отличающемуся от фона частотой модуляции, поскольку нелинейные искажения модулирующего сигнала на выходе чувствительного элемента фотоприемника, вследствие нелинейности его световой характеристики, в последующих каскадах могут быть дополнительно выявлены либо частично подавлены в зависимости от вида их частотных характеристик. Поэтому определение ХП желательно проводить при уровне фона, реально сопутствующем оптическим измерениям.

Наибольшее распространение при измерении нелинейности ХП получили приборы, использующие методы сложения световых потоков. «Они основаны на принципе построения линейных шкал, заключающемся в сложении известных или равных количеств. В случае измерения нелинейности приемников излучения этот принцип может быть осуществлен при использовании многих источников света или одного источника и диафрагмы с отверстиями, расположенной между источником и приемником. Последний способ ввиду его очевидных преимуществ получил в различных модификациях широкое распространение в практике измерения нелинейности приемников излучения. Последовательно открывая и закрывая отверстия диафрагмы, можно получить желаемую градацию освещенности приемника, соответствующую градации площадей отверстий диафрагмы. При соответствии между относительным изменением выходного сигнала и известным законом изменения освещенности можно сделать вывод о линейности приемника или определить величину его нелинейности» [3]. Ошибка измерения в данном случае обусловлена неравномерностью светового потока по диафрагме с отверстиями и отклонением размеров отверстий от требуемых.

В настоящее время достижения микроэлектроники позволяют на базе цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) построить прецизионные управляемые источники тока, а на базе перемножающих ЦАП – усилители с управляемым коэффициентом усиления (УУКУ). На их основе реализован способ метода сложения световых потоков, позволяющий быстро определять погрешность нелинейности ХП. Источник оптического излучения должен обеспечивать ступенчатое изменение светового потока, причем важна стабильность отношений приращений потока, а не стабильность уровней ступеней. Этому требованию отвечают светодиоды, имеющие линейный участок кандела-амперной характеристики. Однако она имеет нелинейность при малых токах светодиода вследствие рекомбинации в области пространственного заряда и малом коэффициенте инжекции при больших токах вследствие насыщения центров люминесценции и температурного гашения люминесценции при разогреве полупроводника [5].

Если в статическом режиме сверхлинейность сохраняется до сравнительно небольших токов, превышающих номинальный в 1,5 ...2 раза, то в импульсном режиме токов – до значений, превышающих номинальный в десятки раз (диапазон токов с сверхлинейной зависимостью возрастает при увеличении скважности) [6]. Это различие можно объяснить тем, что в статическом режиме при меньших токах, чем при импульсном режиме, существенно разогревается область светоизлучающего перехода, а это приводит к уменьшению внутреннего квантового выхода. Исходя из этого ясно, что ступенчатое изменение тока должно быть в линейной области кандела-амперной характеристики и проходить за короткое время, при котором температура светоизлучающего перехода не успела бы существенно измениться. Конструкция светодиода должна обеспечить малое тепловое сопротивление участка светоизлучающий переход – среда и большую массу кристалла.

Для измерения  $\Delta_i$  ХП в диапазоне  $0 \dots \Phi_n$  [2] используется световой поток источника  $\Phi$ , модулированный с частотой измеряемого сигнала (рис. 1,б). Величина  $\Phi$  за время измерения изменяется ступенчато по закону

$$\Phi = \Phi_i > \Phi_{i-1}, \quad i = 0, 1, \dots, n. \quad (3)$$

Этот поток создается светодиодами источника  $\Phi$  (рис. 2) и выделяется исследуемым фотоприемником на уровне необходимого фона.

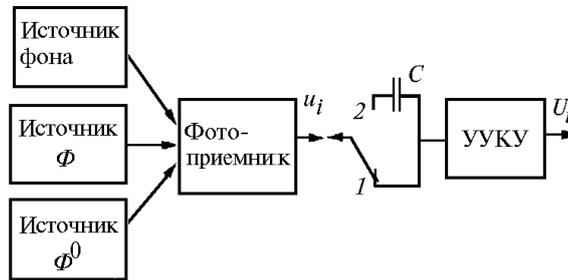


Рис.2. Схема измерения погрешности нелинейности ХП фотоприемника

Сигнал с выхода фотоприемника подается на вход  $I$  УУКУ, коэффициент усиления  $K_i$ , которого изменяется так, что

$$\Phi_i K_i = B = \text{const.} \quad (4)$$

Тогда сигнал на выходе УУКУ

$$U_i = K_i (a_1 \Phi_i + \Delta_i) = a_1 B + \Delta_i K_i. \quad (5)$$

Из (1) следует  $\Delta_n = 0$ , тогда  $U_n = a_1 B$  и

$$\Delta_i = (U_i - U_n) / K_i. \quad (6)$$

Если ХП линейная, то сигнал на выходе УУКУ неизменный, если нелинейная – ступенчатый (рис. 3).

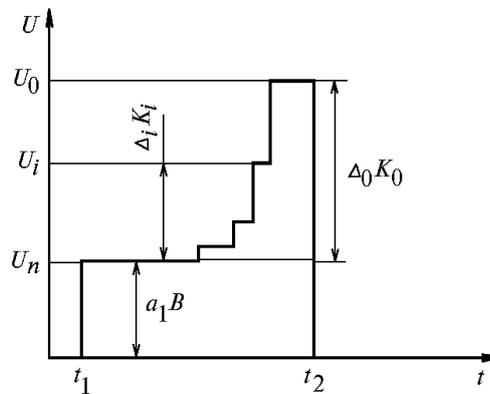


Рис.3. Эпюра сигнала на выходе УУКУ при нелинейной ХП фотоприемника

Для определения ХП при потоке  $\Phi^0$  (см. рис. 1), превышающем максимально возможный поток светодиода, можно провести экстраполяцию ХП для потока  $\Phi^0$ , зная угол наклона касательной к ХП для потока  $\Phi^0$ . Нужно отметить, что в [7] предложено восстанавливать ХП фотоэлектронного умножителя по измерению ее производной. Для определения угла наклона касательной подадим на фотоприемник импульсы постоянной амплитуды потока  $\Phi$  и синхронные с ними импульсы потока от источника  $\Phi$  (рис. 1,б). Следовательно, световой поток  $\Phi$  на фотоприемнике

$$\Phi = \Phi^0 + \Phi'_i > \Phi^0 + \Phi'_{i-1}, \quad i = 0, 1, \dots, n. \quad (7)$$

Если прямую, проходящую через точки ХП, соответствующие  $\Phi^0$  и  $\Phi^0 + \Phi'_n$ , представить в виде

$$u = a'_1 \Phi + u_z, \quad (8)$$

где  $u_z$  – координата точки пересечения прямой (8) и оси  $u$  (см. рис.1,а), то сигнал на выходе фотоприемника при действии потока  $\Phi^0 + \Phi'_i$

$$u_i = a'_1 (\Phi^0 + \Phi'_i) + u_z + \Delta'_i, \quad (9)$$

где  $\Delta'_i$  – отклонение ХП от указанной прямой. Выделим из него сигнал относительно уровня  $u^0 = a'_1 \Phi^0 + u_z$  и подадим на УУКУ. Этот момент достаточно прост, поскольку процесс  $u_i$  представляет собой импульсы на фоне постоянной  $u^0$ . Выбрав скважность повторяемости процесса  $u_i$  больше 10, это можно сделать без большой погрешности, подав  $u_i$  на вход 2 УУКУ через разделительный конденсатор, при этом емкость разделительного конденсатора должна быть достаточно большой, чтобы за время действия импульсной составляющей напряжение на конденсаторе изменилось незначительно. Тогда сигнал на выходе УУКУ

$$U_i = (a'_1 \Phi'_i + \Delta'_i) K_i, \quad (10)$$

$K_i$  изменяется так, что  $\Phi'_i K_i = B' = \text{const}$ , в этом случае

$$U_i = a'_1 B' + \Delta'_i K_i. \quad (11)$$

Регулируя диапазон изменения тока светодиода, можно установить такой  $\Phi'_n$ , что  $\Delta'_i K_i$  будет незначительно, т.е. точки ХП, соответствующие  $\Phi^0$  и  $\Phi^0 + \Phi'_n$ , будут лежать почти на касательной к ХП в точке, соответствующей  $\Phi^0$ . В этом случае

$$U_i = a'_1 B' = U'_n = \text{const}. \quad (12)$$

Из (8) следует, что  $\text{tg} \alpha' = m a'_1$ , поэтому  $\text{tg} \alpha' = (a'_1/a_1) \text{tg} \alpha$ .  $\Phi_n/\Phi'_n = B/B' = s$  определяется отношением диапазонов изменения тока светодиода и задается при установке  $\Phi_n$  и  $\Phi'_n$ . Измерение  $a'_1 B$  позволяет определить

$$a'_1/a_1 = a'_1 B' s/a_1 B = U'_n s/U_n. \quad (13)$$

Генератор тока светодиода источника  $\Phi$  собран на базе 12-разрядного (ЦАП) К1108ПА1, а в УУКУ применяется 12-разрядный перемножающий ЦАП572ПА2. Управление ЦАП происходит так, что лог. 1, присутствуя только в одном разряде, пробегает все разряды от старшего до младшего.

Ввиду новизны предлагаемого способа подробно рассмотрим факторы, влияющие на величину относительной погрешности определения  $\Delta_i$ . Из (6) имеем

$$\delta \Delta_i = \delta(U_i - U_n) + \delta K_i,$$

где  $\delta(U_i - U_n)$  – относительная погрешность определения  $U_i - U_n$ ;  $\delta K_i$  – относительная погрешность определения  $K_i$ .

При замене  $a_1 \Phi_i K_i = a_1 \eta I_i K_i$  (где  $I_i$  – составляющая тока светодиода, обеспечивающая  $\Phi_i$ , а  $\eta = \Phi_i/I_i$ ) величиной  $U_n = a_1 \eta I_n K_n$  мы допускаем ошибку вследствие разброса значений  $\eta$  из-за нелинейности кандела-амперной характеристики светодиода на рабочем участке и вследствие отклонения от линейного закона изменения  $I_i$  и  $K_i$ . Абсолютная погрешность такой замены

$$\Delta(a_1 \Phi_i K_i) = \Delta(a_1 \eta I_i) = U_i (\Delta \eta / \eta + \Delta I_i / I_i), \quad (14)$$

где  $I_i = I_i K_i$ ;  $\Delta \eta$  – изменение  $\eta$  на рабочем участке светодиода. Отношение  $\Delta I_i / I_i$  можно оценить, подав сигнал с источника  $I_i$  через конденсатор на вход УУКУ по нестабильности сигнала на его выходе при изменении  $i$ . Эта погрешность является систематической и с учетом случайной ошибки  $\Delta U$  измерителя сигнала на выходе УУКУ

$$\delta\Delta_i = [\Delta U \sqrt{2} + U_i (\Delta\eta/\eta + \Delta\Pi_i/\Pi_i)] (U_i - U_n) + \delta K_i, \quad (15)$$

$\delta K_i$  можно приравнять к параметру нелинейности  $\delta_{\text{л}} \text{ЦАП}$ , который для 572ПА2 равен  $0,02 \cdot 10^{-2}$  [8]. В собранном приборе для десяти старших разрядов

$$\delta\Pi_i \leq 0,04 \cdot 10^{-2}.$$

1. Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А. Измерительная техника. М.: Высшая школа, 1991. 384 с.
2. Ошлаков В. Г. // 11 Научно-техническая конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение»: Тезисы докл. М., 1996. С. 21.
3. Аксютов Л. Н., Холопов Г. К. // Оптико-механическая промышленность. 1973. N 10. С. 42–47.
4. Коломбет Е. А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов. М.: Радио и связь, 1991. С. 376.
5. Геда Н. Ф. Измерение параметров приборов оптоэлектроники. М.: Радио и связь, 1991. 367 с.
6. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М.: Радио и связь, 1983. 350 с.
7. Пахомов Е. П. // ПТЭ. 1968. N 4. С. 183.
8. Якубовский С. В., Ниссельсон Л. И., Кулешова В. И. и др. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник. М.: Радио и связь, 1989. С. 496.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
30 января 1997 г.

**V. G. Oshlakov. Measurement of Error of Nonlinearity of Photoreceivers Conversion Characteristic.**

A variation of the light fluxes composition method is proposed, which allows timely control of nonlinearity of a photo receiver conversion characteristic.