

Е. И. ЧЕРНОВ

(Рязань)

## О ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ ФОТОДИОДА И ДВУХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Широкое применение в фоторегистрирующей аппаратуре самого различного назначения находят фотоприемные устройства (ФПУ), выполненные на основе фотодиода (ФД) и операционного усилителя (ОУ) (ФПУ типа «ФД — ОУ»). Такие ФПУ обладают значительными температурными погрешностями и невысоким отношением сигнал/шум, что существенно снижает точность регистрации световых потоков [1].

В статье приведены результаты теоретического и экспериментального исследования новых ФПУ, выполненных по симметричной (ФПУ<sub>с</sub>) и асимметричной (ФПУ<sub>а</sub>) схемам включения фотодиода на входах двух операционных усилителей (ФПУ типа «ОУ — ФД — ОУ») [2, 3], для которых вышеуказанные недостатки проявляются слабее.

На рис. 1 изображена схема симметричного ФПУ типа «ОУ — ФД — ОУ». Схема асимметричного ФПУ отличается тем, что неинвертирующий вход ОУ2 подключен к инвертирующему входу ОУ1. На рис. 2 представлена эквивалентная схема ФПУ<sub>с</sub>, отражающая его работу в статике, на которой ФД представлен в виде параллельного соединения генератора фототока  $I_c$  и диода, учитывающего влияние  $p-n$ -перехода ФД на работу ФПУ;  $e_{OY1}$ ,  $e_{OY2}$  — ЭДС, учитывающие напряжения смещения ОУ1, ОУ2, приведенные к их входам;  $I_{OY1}$ ,  $I_{OY2}$  — генераторы входных токов ОУ1 и ОУ2.

Составляя балансы токов по закону Кирхгофа для точек 1, 2 эквивалентной схемы рис. 2, получаем систему уравнений, описывающих работу ФПУ<sub>с</sub> в статике, в результате решения которой определяем выражение, устанавливающее связь между выходным напряжением, параметрами ОУ, ФД и величиной фототока:

$$u_{\text{выхс}} = u_3 - u_4 = \Delta e_{OY} + R \left\{ -2I_c + \Delta I_{OY} + 2I_N [\exp(\Delta e_{OY}/\varphi_T) - 1] - \frac{2I_N}{\varphi_T} \exp(\Delta e_{OY}/\varphi_T) \left( \frac{u_{\text{выхс}}}{A_0} \right) + \frac{I_N}{\varphi_T^2} \left( \frac{u_{\text{выхс}}}{A_0} \right)^2 \exp(\Delta e_{OY}/\varphi_T) \right\}, \quad (1)$$

где  $u_3$ ,  $u_4$  — напряжения соответственно между точками 3, 4 и корпусной шиной;  $u_{\text{выхс}}$  — выходное напряжение ФПУ<sub>с</sub>;  $\Delta e_{OY} = e_{OY1} - e_{OY2}$ ;  $R$  — сопротивление резистора обратной связи ОУ1 (ОУ2);  $\Delta I_{OY} = I_{OY1} - I_{OY2}$ ,  $I_N$  — обратный ток  $p-n$ -перехода ФД;  $\varphi_T = KT/q$  — температурный потенциал;  $K$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $q$  — заряд электрона;  $A_0$  — коэффициент усиления ОУ1 (ОУ2) в разомкнутом состоянии на постоянном токе (при получении выражения полагалось, что коэффициент

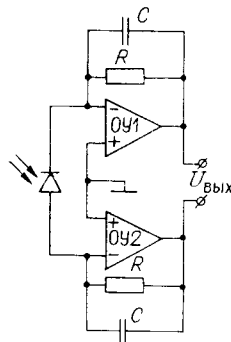


Рис. 1

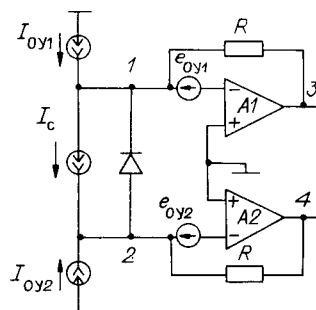


Рис. 2

ты усиления ОУ1, ОУ2 в разомкнутом состоянии на постоянном токе равны).

Пренебрегая последним членом в фигурных скобках выражения (1), который отражает проявление нелинейности передаточной характеристики ФПУ<sub>с</sub>, вызванной влиянием  $p-n$ -перехода ФД, определяем

$$u_{\text{вых}_c} = \left\langle \Delta e_{\text{ОУ}} + 2R \left\{ -I_c + \frac{\Delta I_{\text{ОУ}}}{2} + I_N [\exp(\Delta e_{\text{ОУ}}/\varphi_T) - 1] \right\} \right\rangle / [1 + 2I_N R \exp(\Delta e_{\text{ОУ}}/\varphi_T)/\varphi_T A_0]. \quad (2)$$

Аналогично получаем выражение, описывающее выходное напряжение асимметричного ФПУ<sub>а</sub>:

$$u_{\text{вых}_a} = R \left\langle -2I_c + I_{\text{ОУ}} \left[ 1 - \frac{3RI_N}{A_0 \varphi_T} \exp(e_{\text{ОУ}2}/\varphi_T) \right] - \frac{2e_{\text{ОУ}1} I_N}{A_0 \varphi_T} \exp(e_{\text{ОУ}2}/\varphi_T) - \frac{e_{\text{ОУ}2}}{R} \left[ 1 + \frac{RI_N}{A_0 \varphi_T} \exp(e_{\text{ОУ}2}/\varphi_T) \right] + 2I_N [\exp(e_{\text{ОУ}2}/\varphi_T) - 1] \right\rangle / \left[ 1 - \frac{RI_N}{A_0 \varphi_T} \exp(e_{\text{ОУ}2}/\varphi_T) \right]. \quad (3)$$

Если учесть, что для распространенных на практике случаев  $RI_n/\varphi_T A_0 \ll 1$  (коэффициент усиления ОУ достаточно большой), тогда из (2), (3) получаем

$$u_{\text{вых}_c} = R(-2I_c + \Delta I_{\text{ОУ}}) + \Delta e_{\text{ОУ}} \left( 1 + \frac{2I_N R}{\varphi_T} \right); \quad (4)$$

$$u_{\text{вых}_a} = R(-2I_c + I_{\text{ОУ}}) - e_{\text{ОУ}2} \left( 1 - \frac{2I_N R}{\varphi_T} \right). \quad (5)$$

Следует отметить, что выходное напряжение ФПУ типа «ОУ — ФД — ОУ» при том же значении сопротивления резистора обратной связи ОУ1 оказывается в 2 раза больше, чем у ФПУ типа «ФД — ОУ».

Принимая во внимание последний член в фигурных скобках выражения (1), получаем относительное значение погрешности ФПУ<sub>с</sub> из-за нелинейности его передаточной характеристики по фототоку:

$$\delta_{\text{н}_c} = RI_N u_{\text{вых}_c} \exp(\Delta e_{\text{ОУ}}/\varphi_T)/\varphi_T^2 A_0^2. \quad (6)$$

Аналогично получаем выражение и для ФПУ<sub>а</sub>:

$$\delta_{\text{н}_a} = RI_N u_{\text{вых}_a} \exp(e_{\text{ОУ}2}/\varphi_T)/2A_0^2 \varphi_T^2. \quad (7)$$

Дифференцируя (4), (5) по  $T$ , предварительно осуществляя замену  $I_c = g\Phi$ , где  $g$  — чувствительность ФД, приведенная к спектру регистрируемого светового потока  $\Phi$ , получаем значения выходных напряжений ФПУ<sub>с</sub>, ФПУ<sub>а</sub>, обусловленные изменением их рабочих температур на  $\Delta T$ :

$$u_{T_c} = \Delta T R \left[ \frac{d(\Delta e_{\text{ОУ}})}{dT} \left( \frac{1}{R} + \frac{2I_N}{\varphi_T} \right) + 2I_c \frac{dg}{g dT} + \frac{d(\Delta I_{\text{ОУ}})}{dT} \right]; \quad (8)$$

$$u_{T_a} = \Delta T R \left[ \frac{de_{\text{ОУ}2}}{dT} \left( \frac{1}{R} - \frac{2I_N}{\varphi_T} \right) + 2I_c \frac{dg}{g dT} + \frac{dI_{\text{ОУ}}}{dT} \right], \quad (9)$$

где  $d(\Delta e_{\text{ОУ}})/dT$ ,  $de_{\text{ОУ}2}/dT$ ,  $dI_{\text{ОУ}}/dT$ ,  $d(\Delta I_{\text{ОУ}})/dT$ ,  $dg/dT$  — соответственно крутизна температурного дрейфа разности напряжений смещения операционных усилителей, напряжения смещения ОУ2, входного тока ОУ, разности входных токов ОУ1, ОУ2, температурного изменения чувствительности ФД.

Как следует из выражения (8), чем ближе оказываются друг к другу температурные характеристики ОУ1 и ОУ2 (т. е. чем меньше

$d(\Delta e_{OY})/dT$ ,  $d(\Delta I_{OY})/dT$ , тем слабее проявляется температурный дрейф «нуля» ФПУ<sub>с</sub>. Такого эффекта можно достичь подбором операционных усилителей по температурному дрейфу. При этом данный тип ФПУ обеспечивает значительно меньшую температурную погрешность, чем ФПУ типа «ФД — ОУ». Следует отметить, что существуют методы ускоренного подбора ОУ по температурному дрейфу, для которых подбор занимает не более 1 мин.

Если сравнить (9) с выражением, описывающим температурный дрейф выходного напряжения для ФПУ типа «ФД — ОУ» [4], то они практически оказываются близкими. Однако если учесть, что выходное напряжение ФПУ<sub>а</sub> в 2 раза больше, чем в ФПУ типа «ФД — ОУ», то отсюда следует, что ФПУ<sub>а</sub> обладает также меньшей температурной погрешностью, чем ФПУ типа «ФД — ОУ».

Проанализируем работу ФПУ в динамике. Для этого рассмотрим эквивалентную схему рис. 3, отражающую работу ФПУ<sub>с</sub> в динамике. Здесь ФД представлен в виде параллельного соединения генератора фототока, динамического сопротивления ФД и собственной емкости ФД;  $R_{OY}$  — сопротивление одного входа ОУ;  $C_{OY}$  — емкость одного входа ОУ (для упрощения анализа считаем, что входные сопротивления ОУ и входные емкости равны);  $C$  — емкость цепи отрицательной обратной связи ОУ (определяется собственной емкостью резистора обратной связи ОУ, емкостью монтажа, а также может быть емкостью специально включенного конденсатора). Если положить, что характеристики ОУ1, ОУ2 достаточно близки, т. е. их коэффициенты усиления на постоянном токе одинаковы и равны  $A_0$ , постоянные времени ОУ1, ОУ2 (полагаем, что коррекция у ОУ однополюсная и полюсы более высокого порядка значительно удалены от первого полюса) также одинаковы и равны  $T_0$ , то, записывая балансы токов для точек 1, 2 эквивалентной схемы, получаем систему уравнений, в результате решения которой определяем коэффициент передачи ФПУ по фототоку ФД:

$$A_c(p) = -2R \left\{ \frac{p^2 T_0 R (2C_d + C_{OY} + C)}{A_0} + p \left[ \frac{T_0}{A_0} \left( \frac{2R}{r_d} + \frac{R}{R_{OY}} + 1 \right) + R(2C_d + C_{OY} + C)/A_0 + RC \right] + 1 \right\}, \quad (10)$$

где  $C_d$  — собственная емкость ФД;  $r_d$  — динамическое сопротивление ФД;  $p$  — оператор Лапласа.

По аналогии находим коэффициент передачи по фототоку для ФПУ<sub>а</sub>:

$$A_a(p) = -R \left\{ 1 \left[ \frac{p^2 T_0 (C_1 + 2C_{OY}) R}{A_0} + pRC_1 + 1 \right] + 1 \left[ \frac{p^2 T_0 R}{A_0} (C_d + C_2 + C_{OY}) + pRC_2 + 1 \right] - p^2 T_0 RC_d / A_0 (pRC_1 + 1) (pRC_2 + 1) \right\}, \quad (11)$$

где  $C_1, C_2$  — емкости конденсаторов цепей отрицательной обратной связи соответственно ОУ1 и ОУ2.

С учетом (10), (11) определяем временные отклики выходных напряжений ФПУ<sub>с</sub>, ФПУ<sub>а</sub> при скачкообразном изменении фототока от 0 до  $I_c$ :

$$u_{\text{вых}_c}(t) = -2I_c R \left[ 1 - \exp(-t/\tau_{\text{ПС}}) \left( \cos w_{\text{ПС}} t + \frac{1}{w_{\text{ПС}} \tau_{\text{ПС}}} \sin w_{\text{ПС}} t \right) \right], \quad (12)$$

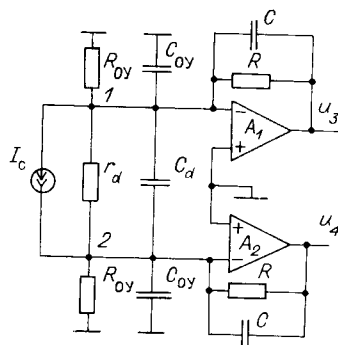


Рис. 3

где  $t$  — текущее время;

$$\left. + \frac{R}{R_{OY}} + 1 \right) + R(2C_d + C_{OY} + C)/A_0 \left. \right\}^2 \left. \right\}^{1/2}; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} u_{\text{вых}_a}(t) = & -2I_c R \left\{ 1 - 0,5 \exp(-t/\tau_{\text{п1a}}) \left( \cos w_{\text{п1a}} t + \frac{\sin w_{\text{п1a}} t}{w_{\text{п1a}} \tau_{\text{п1a}}} \right) - \right. \\ & - 0,5 \exp(-t/\tau_{\text{п2a}}) \left( \cos w_{\text{п2a}} t + \frac{\sin w_{\text{п2a}} t}{w_{\text{п2a}} \tau_{\text{п2a}}} \right) + \frac{T_0 C_d}{2A_0 R (C_2 - C_1) C_1 C_2} \times \\ & \left. \times [C_2 \exp(-t/RC_1) - C_1 \exp(-t/RC_2)] \right\}. \quad (15) \end{aligned}$$

$$\text{Здесь } w_{\text{п1a}} = \left\{ \frac{A_0}{T_0 R (C_1 + 2C_{OY})} \left[ 1 - \frac{RC_1^2 A_0}{4T_0 (C_1 + 2C_{OY})} \right] \right\}^{1/2}; \quad (16)$$

$$\tau_{\text{п1a}} = 2T_0 (C_1 + 2C_{OY})/C_1 A_0; \quad (17)$$

$$w_{\text{п2a}} = \left\{ \frac{A_0}{T_0 R (C_d + C_2 + C_{OY})} \left[ 1 - \frac{RC_2^2 A_0}{4T_0 (C_d + C_2 + C_{OY})} \right] \right\}^{1/2}; \quad (18)$$

$$\tau_{\text{п2a}} = 2T_0 (C_d + C_2 + C_{OY})/C_2 A_0. \quad (19)$$

Из условия  $w_{\text{пс}} = 0$  получаем значение емкости  $C = C_{\text{кс}}$ , соответствующее критическому режиму переходного процесса для ФПУ<sub>с</sub>, а из условий  $w_{\text{п1a}} = 0$ ,  $w_{\text{п2a}} = 0$  — значения емкостей  $C_1 = C_{\text{к1a}}$ ,  $C_2 = C_{\text{к2a}}$ , соответствующие критическому режиму переходного процесса для ФПУ<sub>а</sub>:

$$C_{\text{кс}} = \frac{T_0}{A_0} \left( \frac{2}{r_d} + \frac{1}{R_{OY}} + \frac{1}{R} \right) + 2 \sqrt{\frac{T_0 (2C_d + C_{OY})}{A_0 R}}; \quad (20)$$

$$C_{\text{к1a}} = 2T_0 \left[ \sqrt{1 + \frac{2RA_0 C_{OY}}{T_0}} + 1 \right] / RA_0; \quad (21)$$

$$C_{\text{к2a}} = 2T_0 \left[ \sqrt{1 + \frac{RA_0 (C_d + C_{OY})}{T_0}} + 1 \right] / RA_0. \quad (22)$$

При  $C = C_{\text{кс}}$ ,  $C_1 = C_{\text{к1a}}$ ,  $C_2 = C_{\text{к2a}}$  переходные процессы в ФПУ<sub>с</sub>, ФПУ<sub>а</sub> описываются выражениями

$$u_{\text{вых}_c}(t) = -2I_c R \left[ 1 - \left( 1 + \frac{t}{\tau_{\text{пс}}} \right) \exp(-t/\tau_{\text{пс}}) \right]; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} u_{\text{вых}_a}(t) = & -2I_c R \left\{ 1 - 0,5 \exp(-t/\tau_{\text{п1a}}) \left( 1 + \frac{t}{\tau_{\text{п1a}}} \right) - 0,5 \exp(-t/\tau_{\text{п2a}}) \times \right. \\ & \times \left( 1 + \frac{t}{\tau_{\text{п2a}}} \right) + T_0 C_d [C_{\text{к2a}} \exp(-t/RC_{\text{к1a}}) - C_{\text{к1a}} \exp(-t/RC_{\text{к2a}})] / \\ & \left. / 2A_0 R (C_{\text{к2a}} - C_{\text{к1a}}) C_{\text{к1a}} C_{\text{к2a}} \right\}. \quad (24) \end{aligned}$$

При  $C \gg C_{\text{кс}}$ ,  $C_1 \gg C_{\text{к1a}}$ ,  $C_2 \gg C_{\text{к2a}}$ ,  $C_1 = C_2 = C$

$$u_{\text{вых}_c}(t) = u_{\text{вых}_a}(t) = -2I_c R [1 - \exp(-t/RC)]. \quad (25)$$

Перейдем к определению пороговой чувствительности и отношения сигнал/шум ФПУ<sub>с</sub>. Для этого воспользуемся эквивалентной шумовой

схемой ФПУ<sub>с</sub>, представленной на рис. 4, на которой  $\bar{I}_{ш1} \dots \bar{I}_{ш8}$  — генераторы шумовых токов, учитывающие соответственно дробовой шум фототока, тепловой шум динамического сопротивления ФД, тепловой шум входных сопротивлений приведенные к их входам. Определим квадрат среднеквадратического значения шумового напряжения на выходе ФПУ<sub>с</sub> для области частот, не выходящих за пределы полосы пропускания ФПУ<sub>с</sub>  $\Delta f$ :

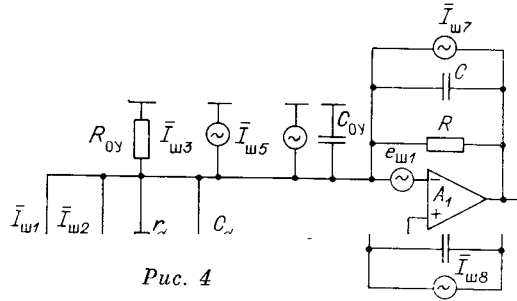


Рис. 4

$$\bar{u}_{шс}^2 = \int_0^{\Delta f} (\bar{I}_{ш1}^2 + \bar{I}_{ш2}^2) |A_c(j2\pi f)|^2 df + \int_0^{\Delta f} (\bar{I}_{ш3}^2 + \bar{I}_{ш4}^2 + \dots + \bar{I}_{ш8}^2) \times \\ \times |A_1(j2\pi f)|^2 df + \int_{f_1}^{\Delta f} |B_c(j2\pi f)|^2 e_{ш1}^2 df + \int_{f_1}^{\Delta f} |B_c(j2\pi f)|^2 e_{ш2}^2 df, \quad (26)$$

где  $A_1(j2\pi f)$  — коэффициент передачи ФПУ<sub>с</sub> для шумовых токов  $I_{ш3} \dots I_{ш8}$ , определяемый из эквивалентной схемы рис. 4;  $j$  — мнимая единица;  $B_c$  — коэффициент передачи для шумовых ЭДС  $e_{ш1}$  ( $e_{ш2}$ );  $f$  — частота;  $f_1 = 0,01$  Гц — нижняя граничная частота избыточных шумов ОУ. Примем во внимание:  $e_{ш}^2(f)$  для широкого диапазона частот (до 2—5 МГц) хорошо аппроксимируется выражением вида [4]  $e_{ш}^2(f) = e_{ш}^2(0)/f + e_{ш0}^2$ ; собственные шумы ОУ1, ОУ2 статистически независимы, и их спектральные плотности близки по величине (для упрощения анализа), т. е.  $e_{ш1}^2 = e_{ш2}^2 = e_{ш}^2$ ;  $I_{Oy1} = I_{Oy2} = I_{Oy}$  (также для упрощения анализа). С учетом этого на основании выражения (26) получаем

$$\bar{u}_{шс}^2 = 4qR^2\Delta f \left[ 2I_c + 4I_N + I_{Oy} + 2\varphi_T \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{Oy}} \right) \right] + \\ + 2e_{ш}^2(0) \left[ \left( 1 + \frac{R}{R_{Oy}} + \frac{2RI_N}{\varphi_T} \right)^2 \ln \left( \frac{\Delta f}{f_1} \right) + 2\pi^2 R^2 (2C_d + C_{Oy} + C)^2 \Delta f^2 \right] + \\ + 2e_{ш0}^2 \Delta f \left[ \left( 1 + \frac{R}{R_{Oy}} + \frac{2RI_N}{\varphi_T} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} R^2 (2C_d + C_{Oy} + C)^2 \Delta f^2 \right]. \quad (27)$$

Аналогичным образом определяем квадрат среднеквадратического значения шумового напряжения на выходе ФПУ<sub>а</sub>:

$$\bar{u}_{ша}^2 = 4qR^2\Delta f \left[ 2I_c + 4I_N + 1,5I_{Oy} + 2\varphi_T \left( \frac{1,5}{R_{Oy}} + \frac{1}{R} \right) \right] + \\ + e_{ш}^2(0) \left[ \left( 1 + \frac{R}{R_{Oy}} + \frac{2RI_N}{\varphi_T} \right)^2 \ln \left( \frac{\Delta f}{f_1} \right) + 2\pi^2 R^2 (2C_d + C_{Oy} + C_2)^2 \Delta f^2 \right] + \\ + e_{ш0}^2 \Delta f \left[ \left( 1 + \frac{R}{R_{Oy}} + \frac{2RI_N}{\varphi_T} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} R^2 (2C_d + C_{Oy} + C_2)^2 \Delta f^2 \right]. \quad (28)$$

Используя выражения (4), (5), в которых полагаем  $\Delta I_{Oy} = 0$ ,  $I_{Oy} = 0$ ,  $\Delta e_{Oy} = 0$ ,  $e_{Oy2} = 0$ , и выражения (27), (28), получаем формулы для

определения пороговой чувствительности и отношения сигнал/шум ФПУ<sub>с</sub>, ФПУ<sub>а</sub>:

$$\Phi_{\text{Пс}} = \frac{1}{g} \left\langle q\Delta f \left[ 4I_N + I_{\text{ОУ}} + 2\varphi_T \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} \right) \right] + \frac{e_{\text{ш}}^2(0)}{2} \left[ \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} + \frac{2I_N}{\varphi_T} \right)^2 \ln \left( \frac{\Delta f}{f_1} \right) + 2\pi^2 (2C_d + C_{\text{ОУ}} + C)^2 \Delta f^2 \right] + \frac{e_{\text{ш0}}^2 \Delta f}{2} \times \right. \\ \left. \times \left[ \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} + \frac{2I_N}{\varphi_T} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} (2C_d + C_{\text{ОУ}} + C)^2 \Delta f^2 \right] \right\rangle^{1/2}; \quad (29)$$

$$\Phi_{\text{Па}} = \frac{1}{g} \left\langle q\Delta f \left[ 4I_N + 1,5I_{\text{ОУ}} + 2\varphi_T \left( \frac{1,5}{R_{\text{ОУ}}} + \frac{1}{R} \right) \right] + \frac{e_{\text{ш}}^2(0)}{4} \times \right. \\ \left. \times \left[ \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} + \frac{2I_N}{\varphi_T} \right)^2 \ln \left( \frac{\Delta f}{f_1} \right) + 2\pi^2 (2C_d + C_{\text{ОУ}} + C_2)^2 \Delta f^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{e_{\text{ш0}}^2 \Delta f}{4} \left[ \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} + \frac{2I_N}{\varphi_T} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} (2C_d + C_{\text{ОУ}} + C_2)^2 \Delta f^2 \right] \right\rangle^{1/2}; \quad (30)$$

$$(C/\text{Ш})_c = \left\langle I_c \left\{ 2q\Delta f \left[ 1 + \frac{2I_N}{I_c} + \frac{I_{\text{ОУ}}}{2I_c} + \frac{\varphi_T}{I_c} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} \right) \right] + \frac{e_{\text{ш}}^2(0)}{2I_c} \times \right. \right. \\ \left. \times \left[ \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} + \frac{2I_N}{\varphi_T} \right)^2 \ln \left( \frac{\Delta f}{f_1} \right) + 2\pi^2 (2C_d + C_{\text{ОУ}} + C)^2 \Delta f^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{e_{\text{ш0}}^2 \Delta f}{2I_c} \left[ \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} + \frac{2I_N}{\varphi_T} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} (2C_d + C_{\text{ОУ}} + C)^2 \Delta f^2 \right] \right\} \right\rangle^{1/2}; \quad (31)$$

$$(C/\text{Ш})_a = \left\langle I_c \left\{ 2q\Delta f \left[ 1 + \frac{2I_N}{I_c} + 0,75 \frac{I_{\text{ОУ}}}{I_c} + \frac{\varphi_T}{I_c} \left( \frac{1}{R} + \frac{1,5}{R_{\text{ОУ}}} \right) \right] + \right. \right. \\ \left. + \frac{e_{\text{ш}}^2(0)}{4I_c} \left[ \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} + \frac{2I_N}{\varphi_T} \right)^2 \ln \left( \frac{\Delta f}{f_1} \right) + 2\pi^2 (2C_d + C_{\text{ОУ}} + C_2)^2 \Delta f^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{e_{\text{ш0}}^2 \Delta f}{4I_c} \left[ \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{ОУ}}} + \frac{2I_N}{\varphi_T} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} (2C_d + C_{\text{ОУ}} + C_2)^2 \Delta f^2 \right] \right\} \right\rangle^{1/2}. \quad (32)$$

В таблице приведены значения отношения сигнал/шум, полученные расчетным и экспериментальным путем для ФПУ<sub>с</sub> и ФПУ<sub>а</sub>, а также значения сигнал/шум, определенные экспериментальным путем для ФПУ типа «ФД — ОУ». Результаты получены при  $I_c = 0,2$  нА,  $R = 4,9$  МОм,  $C = 1$  пФ. В качестве фотодиода использовался прибор типа ФД-256 с параметрами  $I_N = 10^{-11}$  А,  $C_d = 50$  пФ. В качестве ОУ1, ОУ2 приме-

Расчетные и экспериментальные данные

$\Delta f$ , кГц	C/Ш <sub>ар</sub>	C/Ш <sub>аз</sub>	$\delta_a$ , %	C/Ш <sub>ср</sub>	C/Ш <sub>сэ</sub>	$\delta_c$ , %	C/Ш <sub>о</sub>
1	153	174	13,2	153	171	11	116
2	107	131	19	107	127	16	81
4	73	92,4	21	73	86	15	59
6	58	71	18	58	64	9,4	43
8	49	58	17	48	51,7	7,1	38
10	44	49	10,6	41	42,7	4	34
20	26,5	25,3	4,2	21,7	20,6	5,3	20
30	17,5	16	9,4	13,4	12	11	13
40	12	11	9	9,2	8,2	12	9
50	9,45	9,2	2,2	6,8	6,0	15	7,5

Примечание. Символы C/Ш<sub>ср</sub>, C/Ш<sub>эр</sub>, C/Ш<sub>ар</sub>, C/Ш<sub>аз</sub> — отношения сигнал/шум расчетные и экспериментальные соответственно для ФПУ<sub>с</sub> и ФПУ<sub>а</sub>; C/Ш<sub>о</sub> — отношение сигнал/шум для ФПУ типа «ФД — ОУ»;  $\delta = |C/\text{Ш}_p - C/\text{Ш}_э| 100\% / C/\text{Ш}_э$ .

нялись микросхемы К544УД1А, усредненные значения  $e_{ш}(0)$  и  $e_{ш0}$  для которых соответственно составили 121 нВ и 8,9 нВ/Гц<sup>1/2</sup>,  $C_{0У} = 5$  пФ,  $I_{0У} = 5 \cdot 10^{-12}$  А.

Из таблицы следует: экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными; ФПУ<sub>а</sub> для всех значений  $\Delta f$  превосходит по отношению сигнал/шум ФПУ типа «ФД — ОУ»; ФПУ<sub>с</sub> для большого диапазона  $\Delta f$  превосходит по отношению сигнал/шум ФПУ типа «ФД — ОУ».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов Е. И. Фотоприемные устройства на основе фотодиодов и их применение.— М.: ЦНИИ «Электроника», 1986.— (Обзоры по электронной технике. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы.— Вып. 1(1164)).
2. А. с. 1120486 СССР. Усилитель фототока/Е. И. Чернов.— Оpubл. 1984, Бюл. № 39.
3. А. с. 1415426 СССР. Усилитель фототока/Е. И. Чернов.— Оpubл. 1988, Бюл. № 29.
4. Воробай Е. С., Карась В. И., Торпачев П. А. Оптимизация пары фотодиод-операционный усилитель для измерения слабых световых потоков // Измер. техника.— 1985.— № 3.

Поступила в редакцию 17 октября 1988 г.

УДК 535.4 : 773.38

В. В. ДОНЦОВА, Г. А. ЛЕНКОВА

(Новосибирск)

#### ВЛИЯНИЕ ЮСТИРОВКИ НА ФУНКЦИЮ РАССЕЯНИЯ ДИФРАКЦИОННОГО МИКРООБЪЕКТИВА

В работах [1, 2] исследован дифракционный микрообъектив (ДМО) с высокой числовой апертурой ( $NA = 0,45$ ), предназначенный для переноса изображения «из точки в точку». В качестве точечного источника использовался лазерный диод с длиной волны  $\lambda = 0,79$  мкм. В данном сообщении определены допуски на разъюстировку ДМО, а именно: точность установки расстояния до источника света и допустимые поперечные смещения микрообъектива, которые обеспечивают дифракционное качество изображения точки. Параметры ДМО приведены на рис. 1.

Допуски на разъюстировку удобно определять по характеристикам функции рассеяния точки (ФРТ). Последняя оценивается обычно по числу Штреля  $Q$ , т. е. по отношению максимальных интенсивностей соответственно в аберрированном  $I$  и свободном от абберации  $I_0$  дифракционных изображениях точки:  $Q = I/I_0$ . Если абберации малы, то  $Q$  выражается формулой [3]

$$Q \approx 1 - (\Delta\Phi)^2, \quad (1)$$

где

$$(\Delta\Phi)^2 = \overline{(\Delta\varphi^2)} - (\overline{\Delta\varphi})^2 \quad (2)$$

среднеквадратичная ошибка фазовой функции  $\varphi$  микрообъектива.

В нашем случае фазовая функция вычислялась для определенных параметров схемы: длины волны  $\lambda$ ; апертуры  $a$ ; толщин  $d_1, d_2$  подложки и защитного стекла с показателем преломления  $n_1$  и  $n_2$ ; расстояния от источника и его изображения до дифракционной структуры  $z_1, z_2$  без учета знаков (см. рис. 1). При расчете фотошаблонов использовали члены разложения фазовой функции по  $\rho$  до восьмой степени ( $\rho$  — расстояние от центра структуры ДМО, изменяющееся от 0 до  $a$ ). Для опреде-