

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ С ВВЕДЕНИЕМ НЕСУЩЕГО СИГНАЛА В ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

С. Ю. ПОТОМСКИЙ, А. В. КОСИНСКИЙ

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Москва, Россия, e-mail: spotomskiy@hse.ru

*Предложен схемотехнический вариант оптоэлектронного преобразователя перемещений во временной интервал с введением несущего сигнала в источник излучения. Показано, что в разработанном устройстве скомпенсированы амплитудные погрешности, связанные с нестабильностью светового потока, а также погрешности одноканального растрового модулятора.*

**Ключевые слова:** оптоэлектронный преобразователь, линейные перемещения, точность преобразования.

*The optoelectronic transducer of displacements to time interval with insertion of the carrier signal into radiation source is considered. In the developed device the amplitude errors arising from instability of light flux and the errors of single-channel raster modulator are compensated.*

**Key words:** optoelectronic transducer, linear displacements, transformation accuracy.

Одной из главных проблем, возникающих при разработке аналого-цифровых преобразователей перемещений (АЦПП) временного типа, является выполнение основного условия работы первичного преобразующего устройства — преобразователя перемещений во временной интервал (ППВИ) [1]. Главное условие точной работы и линейного преобразования ППВИ любого типа имеет вид:

$$k_M = k_{\text{ФГ}} \text{ или } k_M/k_{\text{ФГ}} = 1, \quad (1)$$

где  $k_M$ ,  $k_{\text{ФГ}}$  — коэффициенты модулятора и функционального генератора.

Для измерения и преобразования в цифровой эквивалент линейных перемещений используют оптоэлектронные АЦПП временного

типа. В случае оптоэлектронного ППВИ коэффициентом модулятора является напряжение на выходе сумматора  $U_C$ , определяемое как произведение передаточных коэффициентов элементов, входящих в состав одноканального оптоэлектронного растрового датчика, а также амплитуды светового потока  $\Phi_0$  и средней составляющей  $S_0$  прозрачности растрового модулятора. Коэффициентом  $k_{ФГ}$  является амплитуда генератора синусоидального напряжения [2]. Тогда условие (1) записывают следующим образом:

$$U_C / U_m = k_y k_{ФП} \Phi_0 S_0 m_X / U_m = 1, \quad (2)$$

где  $k_y$ ,  $k_{ФП}$  — коэффициенты усиления усилителя и преобразования фотоприемника;  $m_X$  — глубина модуляции;  $U_m$  — амплитуда генератора несущей частоты (ГНЧ).

Основными элементами, нестабильность работы которых приводит к нарушению условия (2), являются источник излучения и ГНЧ. Одним из способов решения данной проблемы является регуляция источника таким образом, чтобы выражение (2) оставалось справедливым при любых значениях  $U_m$ . Этот способ применим только к схемам одномодуляторных оптоэлектронных АЦПП временного типа с введением несущего сигнала в электронную часть. Другой способ решения — разработка оптоэлектронных АЦПП временного типа с новым видом первичного преобразующего звена, т. е. ППВИ с введением несущего сигнала в источник излучения. Это позволит более эффективно компенсировать амплитудные погрешности, а также использовать дифференциальный способ компенсации погрешностей модулятора [3]. Функциональная схема такого устройства приведена на рисунке.

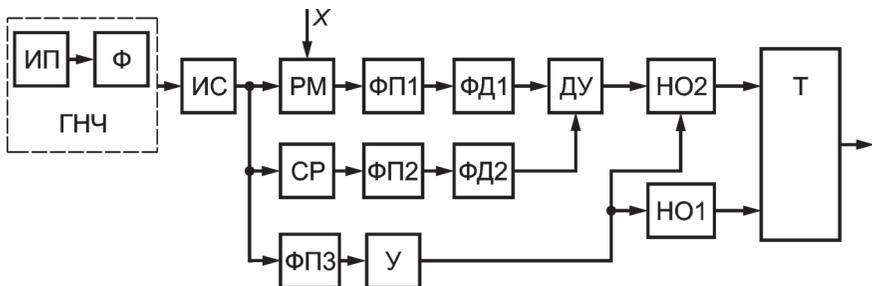
**Описание работы устройства.** Источник света *ИС* (см. рисунок) питается от генератора синусоидального напряжения *ГНЧ* с частотой  $\omega$ . Световой поток, попадающий на растровый модулятор *РМ*, статический растровый элемент *СР* и фотоприемник *ФПЗ*, изменяется по закону

$$\Phi = \Phi_0 \sin \omega t.$$

Характеристику прозрачности растрового модулятора вычисляют по формуле

$$S = S_0 (1 + m_X \sin (2\pi X/g)),$$

где  $g$  — шаг раstra,  $X$  — измеряемое перемещение.



Функциональная схема преобразователя перемещений во временной интервал с введением несущего сигнала в источник излучения:

*ИП* — источник питания; *Ф* — фильтр; *ГНЧ* — генератор несущей частоты; *ИС* — источник света; *РМ* — растровый модулятор; *СР* — статический растровый элемент; *ФП1*, *ФП2*, *ФП3* — фотоприемники; *ФД1*, *ФД2* — фазовые детекторы; *У*, *ДУ* — обычный и дифференциальный усилители; *НО1*, *НО2* — нуль-органы; *Т* — *RS*-триггер; *X* — измеряемое перемещение

Статический растровый элемент жестко закреплен в положении  $X_0 = 0$  мм, характеристика прозрачности этого элемента определяется константой  $S'_0$  — средней составляющей прозрачности статического растра.

Световой поток с выхода *РМ* фокусируется на фотоприемнике *ФП1* и его значение можно определить как

$$\Phi_{PM} = \Phi_0 S = \Phi_0 S_0 (1 + m_X \sin(2\pi X/g)) \sin \omega t,$$

Световой поток с выхода *СР* фокусируется на фотоприемнике *ФП2*, его значение определим из выражения:

$$\Phi_{CP} = \Phi_0 S'_0 \sin \omega t.$$

Напряжение на выходе фотоприемника *ФП1* находим по формуле

$$U_{ФП1} = k_{ФП1} \Phi_0 S_0 (1 + m_X \sin(2\pi X/g)) \sin \omega t.$$

Напряжение на выходе фотоприемника *ФП2* вычислим как

$$\Phi_{ФП2} = k_{ФП2} \Phi_0 S'_0 \sin \omega t.$$

Фазовые детекторы  $\Phi Д1$ ,  $\Phi Д2$ , на которые поступают напряжения с выходов фотоприемников  $\Phi П1$ ,  $\Phi П2$ , выделяют амплитуду сигнала, убирая гармоническую составляющую. Напряжения на выходах фазовых детекторов рассчитаем по формулам

$$U_{\Phi Д1} = k_{\Phi Д1} k_{\Phi П1} \Phi_0 S_0 (1 + m_X \sin(2\pi X/g));$$

$$U_{\Phi Д2} = k_{\Phi Д2} k_{\Phi П2} \Phi_0 S'_0,$$

где  $k_{\Phi Д1}$ ,  $k_{\Phi Д2}$  — передаточные коэффициенты фазовых детекторов.

Напряжение на выходе дифференциального усилителя  $ДУ$ :

$$\begin{aligned} U_{ДУ} &= k_{ДУ1} U_{\Phi Д1} - k_{ДУ2} U_{\Phi Д2} = \\ &= k_{ДУ1} k_{\Phi Д1} k_{\Phi П1} \Phi_0 S_0 (1 + m_X \sin(2\pi X/g)) - k_{ДУ2} k_{\Phi Д2} k_{\Phi П2} \Phi_0 S'_0, \end{aligned}$$

где  $k_{ДУ1}$ ,  $k_{ДУ2}$  — коэффициенты усиления дифференциальных усилителей.

Учитывая, что  $k_{ДУ1} = k_{ДУ2} = k_{ДУ}$ ,  $k_{\Phi Д1} = k_{\Phi Д2} = k_{\Phi Д}$ , а фотоприемники выполнены на одной подложке и, следовательно, их передаточные коэффициенты равны  $k_{\Phi П1} = k_{\Phi П2} = k_{\Phi П}$ , средние составляющие прозрачности растрового модулятора и статического раstra будут тоже равны  $S_0 = S'_0$ , то напряжение с выхода дифференциального усилителя  $ДУ$  определим следующим выражением:

$$U_{ДУ} = k_{ДУ} k_{\Phi Д} k_{\Phi П} \Phi_0 S_0 m_X \sin(2\pi X/g). \quad (2)$$

С учетом равенства передаточных коэффициентов фотоприемников напряжение с выхода фотоприемника  $\Phi П3$  будет  $U_{\Phi П3} = k_{\Phi П} \Phi_0 \sin \omega t$ . Это напряжение усиливается усилителем  $У$ , на выходе которого получаем  $U_y = k_y k_{\Phi П} \Phi_0 \sin \omega t = U_{Нч}$ . Это напряжение используется в качестве сигнала несущей частоты. Его амплитуда определяется величиной светового потока, коэффициентом усиления усилителя и передаточным коэффициентом фотоприемника:

$$U_m = k_y k_{\Phi П} \Phi_0. \quad (3)$$

Нуль-орган  $НО1$  срабатывает в момент перехода опорного напряжения  $U_{Нч}$  через ноль при смене знака с «минуса» на «плюс».

Нуль-орган  $НО2$  срабатывает в момент равенства опорного напряжения  $U_{Нч}$  и напряжения с выхода дифференциального усилителя  $У_{ДУ}$ .

Момент срабатывания нуль-органа *HO1* равен:

$$t_{H1} = t'_{H1} + t''_{H1},$$

где  $t'_{H1}$  — момент времени, соответствующий равенству мгновенного напряжения  $U_{Hч}$  порогу срабатывания  $U_{H1}$  нуль-органа *HO1* ( $U_{Hч} = U_{H1}$ );  $t''_{H1}$  — собственное время срабатывания *HO1*.

Так как нуль-орган *HO2* срабатывает при  $U_{ДУ} = U_{Hч}$ , то этот момент с учетом порога срабатывания  $U_{H2}$  определим по формуле:

$$t_{H2} = t'_{H2} + t''_{H2}, \quad (4)$$

где  $t'_{H2}$  — момент времени, соответствующий равенству

$$U_{ДУ} + U_{H2} = U_{Hч}; \quad (5)$$

$t''_{H2}$  — собственное время срабатывания *HO2*.

Для нуль-органа *HO1*  $U_m \sin \omega t'_{H1} = U_{H1}$ ;

для нуль-органа *HO2*  $U_m \sin \omega t'_{H2} = U_{ДУ} + U_{H2}$ ;

после несложных преобразований получим:

$$t'_{H1} = \arcsin(U_{H1}/U_m)/\omega; \quad (6)$$

$$t'_{H2} = \arcsin[(U_{ДУ} + U_{H2})/U_m]/\omega. \quad (7)$$

От сигнала с *HO1* срабатывает триггер *T*. Сигнал с *HO2* возвращает триггер в исходное состояние. Временной интервал на выходе триггера составляет  $t_T = t_{H2} - t_{H1} + t_o - t_c$ , где  $t_c$ ,  $t_o$  — время срабатывания и отпускания триггера.

С учетом (2)—(7) находим

$$\begin{aligned} t_T &= \left( \arcsin[(U_{ДУ} + U_{H2})/U_m] - \arcsin[U_{H1}/U_m] \right) / \omega + t''_{H2} - t''_{H1} - t_c + t_o = \\ &= \left( \arcsin\left[ \frac{(k_{ДУ}k_{ФД}k_{ФП}\Phi_0 S_0 m_X \sin\{2\pi X/g\} + U_{H2})}{(k_Y k_{ФП}\Phi_0)} \right] - \right. \\ &\quad \left. - \arcsin\left[ \frac{U_{H1}}{(k_Y k_{ФП}\Phi_0)} \right] \right) / \omega + t''_{H2} - t''_{H1} - t_c + t_o. \end{aligned}$$

При выполнении условий идеальности:  $t''_{H2} = t''_{H1} = 0$ ,  $t_c = t_o = 0$ ,  $U_{H1} = U_{H2} = 0$  получаем:

$$t_T = \arcsin[(k_{ДУ}k_{ФД}S_0 m_X \sin\{2\pi X/g\}/k_Y)/\omega].$$

Для точного функционирования устройства необходимо выполнение условия баланса амплитуд

$$k_{\text{ДУ}}k_{\text{ФД}}k_{\text{ФП}}S_0m_X \Phi_0 / (k_Yk_{\text{ФП}}\Phi_0) = 1. \quad (8)$$

Это условие выполняется при правильно подобранных коэффициентах усиления обычного и дифференциального усилителей, т. е. соотношение между коэффициентами должно быть следующее:

$$k_Y = k_{\text{ДУ}}k_{\text{ФД}}S_0m_X.$$

Равенство (8), которое является главным условием работы преобразователей временного типа, автоматически выполняется при любых значениях светового потока  $\Phi_0$ . Следовательно,

$$t_T = (2\pi X/g)/\omega.$$

При постоянном стабильном значении  $\omega$ , временной интервал  $t_T$  имеет линейную зависимость от преобразуемого перемещения.

Точность работы устройства определяется стабильностью темнового напряжения фотоприемника *ФПЗ*. В случае его нестабильности для компенсации погрешности по аналогии применяется дифференциальный способ компенсации.

Таким образом, разработанное устройство свободно от амплитудных погрешностей, связанных с нестабильностью величины светового потока, и погрешностей одноканального растрового модулятора.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Косинский А. В., Потомский С. Ю.** Аналого-цифровые преобразователи перемещений временного типа // Измерительная техника. 2011. № 5. С. 20—21; **Kosinskii A. V., Potomskii S. Yu.** Time-type analog-to-digital displacement transducer // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 5. P. 502—504.
2. **Косинский А. В., Потомский С. Ю.** Аналого-цифровой преобразователь перемещений временного типа на базе одноканального растрового модулятора // Метрология. 2012. № 5. С. 27—33.
3. **Потомский С. Ю., Косинский А. В.** Оптоэлектронный преобразователь перемещений во временной интервал с дифференциальной компенсацией погрешностей модулятора // Метрология. 2013. № 5. С. 3—8.
4. **Косинский А. В. и др.** Аналого-цифровые преобразователи перемещений. М.: Машиностроение, 1991.

*Дата принятия 08.07.2013 г.*