

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

**О.Г. Корганова, В.А. Кузнецов**

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

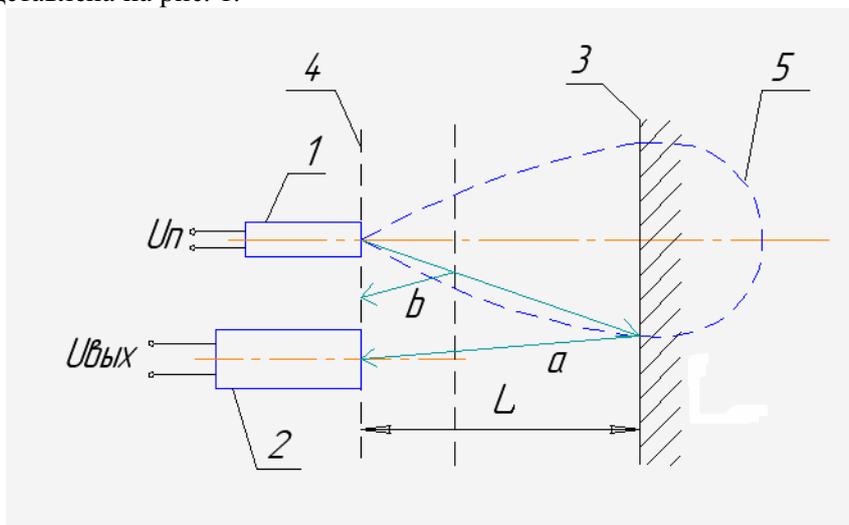
*Рассматривается принцип построения оптоэлектронного преобразователя линейных перемещений. Анализируется функция его преобразования. Рассматриваются возможности ее линеаризации.*

**Ключевые слова:** оптоэлектронный преобразователь, линейные перемещения, математическая модель, функция преобразования.

В настоящее время бурно развивается оптоэлектронная техника. Оптоэлектронные преобразователи, отличающиеся высоким быстродействием, миниатюрностью и широкими функциональными возможностями, находят применение в различных отраслях промышленности.

На кафедре «Информационно-измерительная техника» разработан оптоэлектронный преобразователь линейных перемещений, отличающийся малыми размерами и массой [1].

Конструкция этого преобразователя была разработана на основе результатов экспериментальных исследований зависимости выходного сигнала фотоприемника от перемещения плоского отражающего экрана с помощью установки, схема которой представлена на рис. 1.



Р и с. 1. Оптоэлектронный преобразователь линейного перемещения

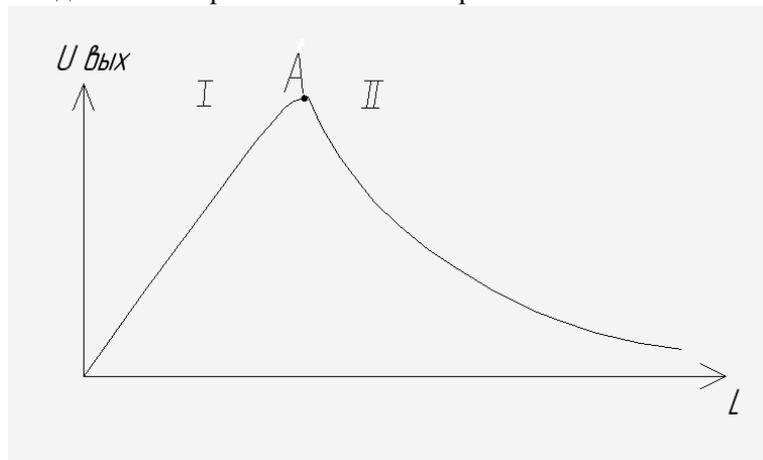
Установка содержит светодиод 1, фотоприемник 2, в качестве которого использовался фотодиод, и подвижный отражающий экран 3, плоскость которого перпен-

---

Ольга Георгиевна Корганова – к.т.н., доцент.  
Владимир Андреевич Кузнецов – к.т.н., доцент.

дикулярна оптической оси светодиода. Торцевые части светодиода и фотоприемника расположены в плоскости 4.

График зависимости выходного сигнала фотоприемника от расстояния  $L$  между плоскостью 4 и подвижным экраном 3 показан на рис. 2.



Р и с. 2. Функция преобразования оптоэлектронного преобразователя линейного перемещения

На этом графике можно выделить два характерных участка I и II.

На участке I выходной сигнал фотоприемника с ростом расстояния  $L$  увеличивается и в точке A достигает максимума. Рост выходного сигнала фотоприемника при увеличении расстояния  $L$  на этом участке объясняется возрастанием освещенности фотоприемника. Светодиод 1 (см. рис. 1) имеет определенную диаграмму направленности излучения, показанную пунктиром 5. При увеличении расстояния  $L$  до отражающего экрана 3 лучи светодиода, имеющие большую яркость, начинают попадать на светочувствительную площадку фотоприемника – например, луч  $a$  на рис. 1. При малом расстоянии  $L$  этот луч на светочувствительную площадку фотоприемника уже не попадает (луч  $b$  на рис. 1).

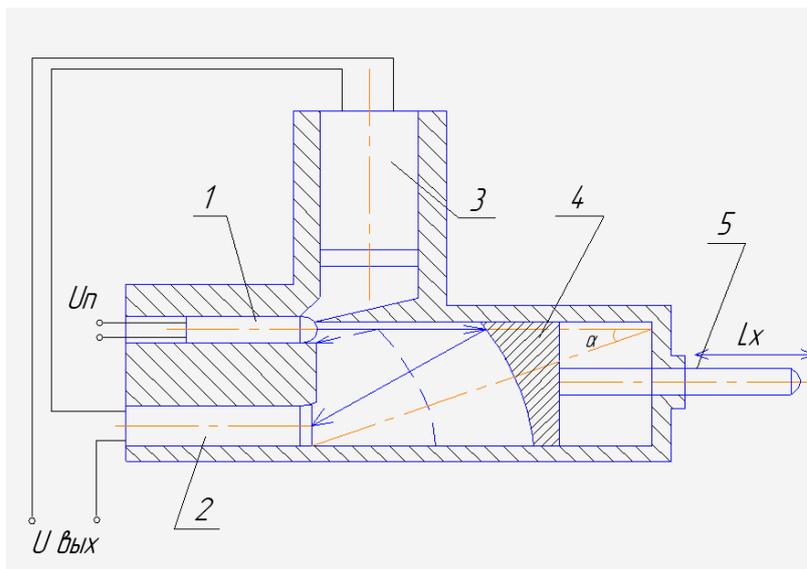
В точке A (см. рис. 2) освещенность фотоприемника достигает максимального значения и далее с ростом расстояния  $L$  начинает уменьшаться по известному в оптике закону обратно пропорционально квадрату расстояния.

Участок I зависимости  $U_{\text{вых}} = f(L)$  составляет 3-4 мм и может быть использован для измерения малых перемещений или линейных размеров. Для линеаризации характеристики на этом участке необходимо увеличить освещенность фотоприемника в конце диапазона перемещения. С этой целью подвижный отражающий экран выполнен в виде вогнутого сферического зеркала, оптическая ось которого наклонена к оптической оси светодиода на некоторый угол, при котором в конце диапазона перемещения экрана фотоприемник окажется в фокусе сферического зеркала, вследствие чего освещенность фотоприемника возрастает.

На рис. 3 представлен чертеж конструкции оптического датчика перемещений. Оптический датчик перемещений содержит светодиод 1, первый фотоприемник 2, второй фотоприемник 3, подвижный отражающий экран 4 и измерительный штوك 5, с помощью которого воспринимаются измеряемые перемещения  $L_x$  объекта измерения. Рабочие торцевые поверхности светодиода и первого фотоприемника лежат в одной плоскости, а отражающая поверхность подвижного экрана 4 выполнена в виде вогнутого сферического зеркала, оптическая ось которого наклонена к оптической

оси светодиода на угол  $\alpha$ , при котором при максимальном перемещении экрана 4 фотоприемник 2 окажется в фокусе сферического зеркала.

Второй фотоприемник 3 имеет постоянную оптическую связь со светодиодом 1 и может перемещаться в осевом направлении, что позволяет изменять его освещенность. Выходные клеммы первого и второго фотоприемников включены последовательно и встречно.



Р и с. 3. Конструкция оптоэлектронного датчика перемещения

Оптический датчик перемещений работает следующим образом.

При начальном положении измерительного штока 5, когда подвижный экран 4 находится на минимальном расстоянии от светодиода 1, перемещением второго фотоприемника 3 добиваются нулевого значения выходного сигнала датчика. В этом случае начальный сигнал первого фотоприемника 2 компенсируется сигналом второго фотоприемника 3 и характеристика датчика будет проходить через начало координат.

В дальнейшем при перемещении измерительного штока 5 и увеличении расстояния между экраном 4 и светодиодом 1 освещенность первого фотоприемника возрастает, а освещенность второго фотоприемника 3 остается неизменной, поэтому выходной сигнал датчика будет увеличиваться пропорционально перемещению измерительного штока.

В конце диапазона измерения освещенность фотоприемника 2 увеличивается еще дополнительно за счет того, что его светочувствительная площадка окажется в фокусе сферического вогнутого зеркала, что обеспечивает высокую линейность характеристики датчика.

Математическая модель преобразователя больших перемещений при подвижном источнике оптического излучения или подвижном фотоприемнике рассмотрена в работе [2]. Однако эта модель не отражает адекватно тех процессов, которые происходят в полном световоде при введении в него подвижного отражающего экрана.

Согласно законам геометрической оптики освещенность поверхности площадью  $S$  определяется выражением

$$E = \frac{\Phi}{S},$$

где  $\Phi$  – световой поток, падающий на поверхность.

Если принять, что  $K_{nx}$  – коэффициент поглощения среды по продольной оси световода, а  $K_0$  – коэффициент отражения подвижного экрана, то изменение освещенности при перемещении экрана на расстояние  $dx$  составит

$$dE = \frac{2K_{nx}K_0}{S} \Phi dx. \quad (1)$$

Введение в числитель выражения (1) двойки связано с тем, что световой поток проходит расстояние  $dx$  дважды, отразившись от экрана.

Коэффициенты  $K_{nx}$  и  $K_0$  распределены вдоль светового потока. Численное их значение зависит от коэффициентов отражения материала световода, приводимых в справочниках по физике, от диаграммы направленности излучения световода, от геометрии полого световода и определяется на основе известных в физике законов геометрической оптики.

Если ввести обозначения:

$$r_0 = \frac{2K_{nx}K_0}{S} \text{ – удельное продольное оптическое сопротивление,}$$

$$g_0 = \frac{K_{nx}K_0}{2} S \text{ – удельная поперечная проводимость,}$$

то с учетом (1) получим

$$\frac{dE}{dx} = -r_0 \Phi, \quad \frac{d\Phi}{dx} = -g_0 E.$$

После ряда преобразований получаем дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^2 \Phi}{dx^2} = g_0 r_0 \Phi.$$

Это дифференциальное уравнение описывает распределение светового потока вдоль оси оптического преобразователя перемещения световода (ОППС).

В [2] приводится решение этого уравнения, которое имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} E(\ell_x) &= E_0 \operatorname{ch} \gamma \ell_x - z \hat{O}_0 \operatorname{sh} \gamma \ell_x, \\ \hat{O}(\ell_x) &= -\frac{1}{z} E_0 \operatorname{sh} \gamma \ell_x + \hat{O}_0 \operatorname{ch} \gamma \ell_x, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$z = \sqrt{\frac{r_0}{g_0}}, \quad \gamma = \sqrt{r_0 \cdot g_0}, \quad (3)$$

$E_0$  и  $\Phi_0$  – соответственно значения освещенности и светового потока в начале диапазона измерения.

На основании решения (2) получено выражение для статической характеристики ОППС

$$\hat{O}(\ell_x) = \frac{\hat{O}_0}{\operatorname{ch} \gamma_1 \ell_x + \frac{z_2}{z_1} \operatorname{sh} \gamma_1 \ell_x} \exp(-\gamma_2 \ell_x),$$

где  $z_1; z_2; \gamma_1$  и  $\gamma_2$  определяются на основании (3) соответственно для начального положения отражающего экрана, что соответствует началу участка 2 на рис. 3, и для

текущего положения экрана.

В разработанном ОППС с подвижным экраном в качестве источника оптического излучения используется светодиод, имеющий определенную диаграмму направленности излучения. При работе ОППС на втором участке функции преобразования светодиод можно рассматривать как точечный источник света, у которого сила света определяется выражением

$$\mathfrak{I} = \frac{\hat{O}}{\Omega}, \quad (4)$$

где  $\Omega$  – телесный угол, в котором происходит излучение.

При больших значениях  $x$   $\ell_x$  часть светового потока, излучаемого светодиодом, отражается от боковых поверхностей световода, поэтому общий световой поток может быть представлен суммой

$$\Phi(\ell_x) = \Phi_{\Pi}(\ell_x) + \Phi_0(\ell_x),$$

где  $\Phi_{\Pi}(\ell_x)$  – прямой световой поток,

$\Phi_0(\ell_x)$  – световой поток, отраженный от боковых поверхностей световода.

С учетом (4) имеем

$$r_0 = \frac{2K_x K_0}{\Omega}; \quad g_0 = \frac{K_x K_0}{2} \Omega,$$

где  $K_x$  – коэффициент поглощения светового потока средой по продольной координате, определяемый или экспериментально, или по справочным данным.

В [2] приводится выражение для прямого светового потока, полученное с учетом освещенности, создаваемой точечным источником света:

$$E = \frac{\mathfrak{I}}{\ell_x^2},$$

отсюда

$$\Phi_{\Pi}(\ell_x) = \mathfrak{I} \frac{S}{4\ell_x^2} \exp(-2K_x K_0 \ell_x).$$

Длина пути светового луча, вошедшего в световод под углом  $\alpha$  к его оси, равна

$$\ell_{\ddot{e}} = \frac{L}{\cos \alpha},$$

где  $L$  – длина световода.

Число отражений луча:

$$n = \frac{L}{D} \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

где  $D$  – внутренний диаметр световода.

Полный световой поток, имеющий входной телесный угол  $\Omega_{\text{вх}}$ , определяется выражением

$$\Phi(\ell_x) = \mathfrak{I} \left( \int_0^{\Omega(\ell_x)} d\Omega + \int_{\Omega(\ell_x)}^{\Omega_{\text{вх}}} d\Omega \right).$$

$\Omega_{\text{вх}}$  – входной телесный угол;

$\Omega(\ell_x)$  – телесный угол, в котором находится отраженный световой поток.

Падающий на внутреннюю поверхность световой поток находится по формуле

$$\Phi_{\text{пад}}(\ell_x) = \Im S \left( \frac{1}{\ell_0^2} - \frac{1}{\ell_x^2} \right),$$

где  $\ell_0$  – начало отсчета.

Отраженный от стенок световой поток определяется выражением

$$\Phi_{\text{от}}(\ell_x) = \Phi_{\text{пад}}(\ell_x) \cdot \rho_P,$$

где  $\rho_P$  – расчетный коэффициент отражения стенок световода.

С учетом (5) получим

$$\rho_P = \int_{U_x}^{U_0} \rho \frac{2\ell_x \operatorname{tg} U}{D} dU,$$

$U_0$  – начальный угол отражения;  $U_x$  – текущий угол отражения.

$$U_0 = \operatorname{arctg} \frac{D}{2\ell_0}; \quad U_x = \operatorname{arctg} \frac{D}{2\ell_x}.$$

Суммарный световой поток, падающий на фотоприемник, определяется формулой, полученной с учетом приведенных выше выражений:

$$\Phi(\ell_x) = \Im \frac{S}{4\ell_x^2} \left[ e^{-2K_x K_0 \ell_x} + \left( \frac{\ell_x^2}{\ell_0^2} - 1 \right) e^{-2K_x K_0 \ell_x} \int_{U_x}^{U_0} \frac{1}{\cos U} dU \times \int_{U_x}^{U_0} \rho \frac{2\ell_x \operatorname{tg} U}{D} dU \right]. \quad (6)$$

Анализ математической модели, представленной выражением (6), показывает, что функция преобразования ОППС с подвижным экраном является принципиально нелинейной. Нелинейность характеристики можно уменьшить повышением отражающей способности внутренней боковой поверхности световода. Экспериментальные исследования показали, что функция преобразования при этом аппроксимируется выражением вида

$$U_\Phi = a_1 + \frac{a_2}{\ell_0 + \ell_x}. \quad (7)$$

Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  получены аппроксимацией экспериментально снятой зависимости  $U_\Phi = f(\ell_x)$ .

Рассмотренная математическая модель не может быть использована для описания процессов, происходящих в ОППС, в случае, когда экран находится в непосредственной близости от источника оптического излучения (участок 1 на рис. 2), так как эта модель не учитывает особенности диаграммы направленности излучения светодиода.

Математическая модель ОППС с подвижным экраном для первого участка функции преобразования разработана с учетом диаграммы направленности излучения светодиода.

Линеаризация функции преобразования на участке 1 может быть выполнена тремя способами:

- 1) поворотом оси фотоприемника в сторону светодиода на угол  $\alpha$ , рассчитываемый с учетом диаграммы направленности излучения светодиода;
- 2) поворотом светодиода в сторону фотоприемника на тот же угол;

- 3) поворотом плоскости отражающего экрана на угол, позволяющий увеличить освещенность фотоприемника в конце первого участка.

Коррекция функции преобразования фотоприемника в конце диапазона преобразования может быть выполнена различными способами, которые и определяют метод коррекции нелинейности функции преобразования.

Один из способов коррекции нелинейности функции преобразования основан на применении метода уравнивающего преобразования, при котором ОПЭС включается в цепь отрицательной обратной связи, образуя обратный преобразователь. Из теории измерительных цепей известно, что этот метод позволяет получить линейную характеристику преобразователя, имеющую функцию преобразователя вида (7).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. RU №2164662 по кл. G 01 B 11/00. Оптический датчик перемещений / Волков Ю.В., Кузнецов В.А., Ляченков Н.В. – Бюл. №9 от 27.03.2001.
2. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г. Оптоэлектронные преобразователи больших перемещений на основе полярных световодов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 56 с.

*Статья поступила в редакцию 1 ноября 2010 г.*

UDC 531.767

## OPTOELECTRONIC CONVERTER OF THE LINEAR DISPLACEMENT

***O.G. Korganova, V.A. Kuznecov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The basis of the building of optoelectronic converter of the linear displacement is considered. The function of its transformation is analyzed. The possibility of its linearizations is considered.*

**Keywords:** *optoelektronic converter, linear displacement, mathematical model, conversion function.*

---

*Olga G. Korganova – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.  
Vladimir A. Kuznecov – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.*