

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

О.Г. Корганова, В.А. Кузнецов

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

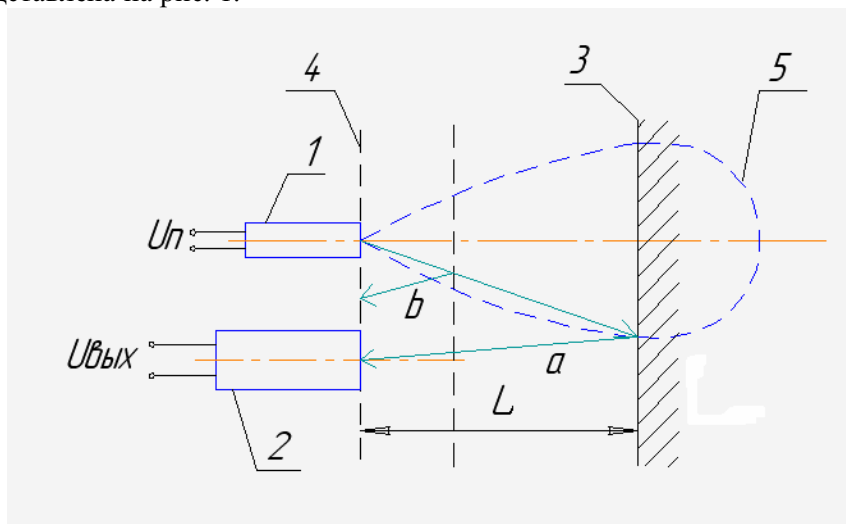
Рассматривается принцип построения оптоэлектронного преобразователя линейных перемещений. Анализируется функция его преобразования. Рассматриваются возможности ее линеаризации.

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.



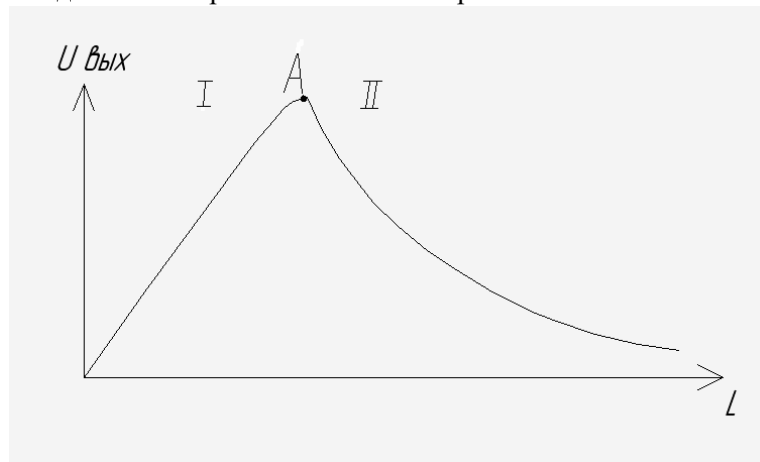
Р и с. 1. Оптоэлектронный преобразователь линейного перемещения

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).

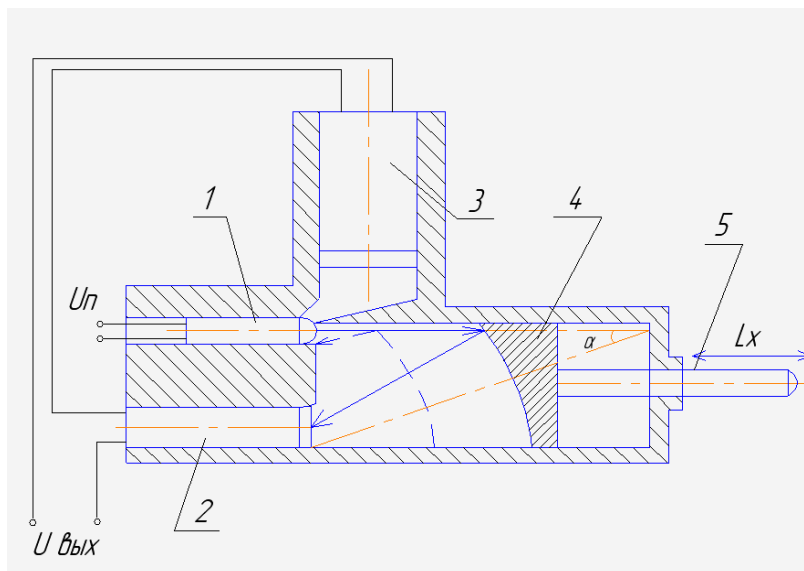
В точке A (см. рис. 2) освещенность фотоприемника достигает максимального значения и далее с ростом расстояния L начинает уменьшаться по известному в оптике закону обратно пропорционально квадрату расстояния.

Участок I зависимости $U_{\text{вых}} = f(L)$ составляет 3-4 мм и может быть использован для измерения малых перемещений или линейных размеров. Для линейаризации 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 α , 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 Φ – 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 Φ_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 γ_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 Ω – телесный угол, в котором происходит излучение.

При больших значениях x ℓ_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,

$\hat{O}_0(\ell_x)$ – 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 α 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 ℓ_0 – начало отсчета.

Отраженный от стенок световой поток определяется выражением

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

где ρ_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 α , 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 В 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.*