

Дифференциальный волоконно-оптический преобразователь угловых перемещений

Елена Бадеева, Антон Щевелев, Ольга Юрова (Пенза),
Юрий Макаров, Анатолий Гориш (Москва)

Предложен дифференциальный волоконно-оптический преобразователь угловых перемещений, принцип действия которого основан на отражении светового потока от зеркальной поверхности упругого элемента. Выведена функция преобразования оптической системы, на основе которой определяются конструктивно-технологические параметры преобразователя.

В последние годы стала заметной тенденция развития и совершенствования волоконно-оптических датчиков. Они конкурентоспособны в тех случаях, когда определяющими являются малые размеры, масса и возможность работы в условиях воздействия электромагнитных полей, а также в агрессивных и взрывоопасных средах.

Основным элементом волоконно-оптических датчиков ускорений является волоконно-оптический преобразователь угловых перемещений (ВОПУП), преобразующий изменение угла наклона отражающей поверхности в изменение интенсивности светового потока в зоне измерений. Для снижения погрешностей ВОПУП необходимо реализовать дифференциальную схему преобразования оптического сигнала в зоне восприятия ускорения. Для этого предложен новый дифференциальный ВОПУП, устройство которого показано на рисунке 1.

Чувствительным элементом преобразователя (см. рис. 1), воспринимающим внешнее воздействие, является инерционная масса (ИМ) в виде металлического цилиндра. Последний закреплён на свободном конце упругого подвеса (УП), который выполнен в виде тонкой зеркальной металлической пластины из стали 36НХТЮ. С двух сторон УП расположены оптические волокна первого и второго измерительных каналов, причём подводящие оптические волокна (ПОВ1) первого измерительного канала расположены на одной оси с отводящими оптическими волокнами (ООВ2) второго измерительного канала и, наоборот, ПОВ2 второго измерительного канала расположены на одной оси с ООВ1 первого измерительного канала.

Оптическая схема ВОПУП настроена так, что в отсутствие ускорения объекта световое излучение, выходящее из торцов ПОВ1 и ПОВ2, после отраже-

ния от зеркальных поверхностей УП равномерно распределяется между торцами ООВ1 и ООВ2. Появление ускорения, вектор которого (или его составляющая) перпендикулярен плоскости упругой пластины, приводит к смещению инерционной массы и, тем самым, к изменению потока излучения, попадающего в приёмные торцы ООВ1 и ООВ2.

При разработке ВОПУП необходимо определить условия, при которых обеспечивается дифференциальное преобразование оптических сигналов. Для этого определена функция преобразования каждого измерительного канала ВОПУП в соответствии с геометрическими построениями, приведёнными на рисунке 1.

В отсутствие влияния ускорения лучи света от ПОВ1 и ПОВ2 проходят в прямом направлении путь x_0 до отражателя и путь x_0 в обратном направлении ООВ1 и ООВ2 под апертурным углом $\theta_{НА}$ к оптической оси волокна. При этом в плоскости приёмных торцов ООВ1 и ООВ2 наблюдается освещённая кольцевая зона шириной $b = r_C$, где r_C – радиус сердцевины оптического волокна.

Изменение формы светового пятна и, соответственно, светового потока в ВОПУП, когда освещённая площадка

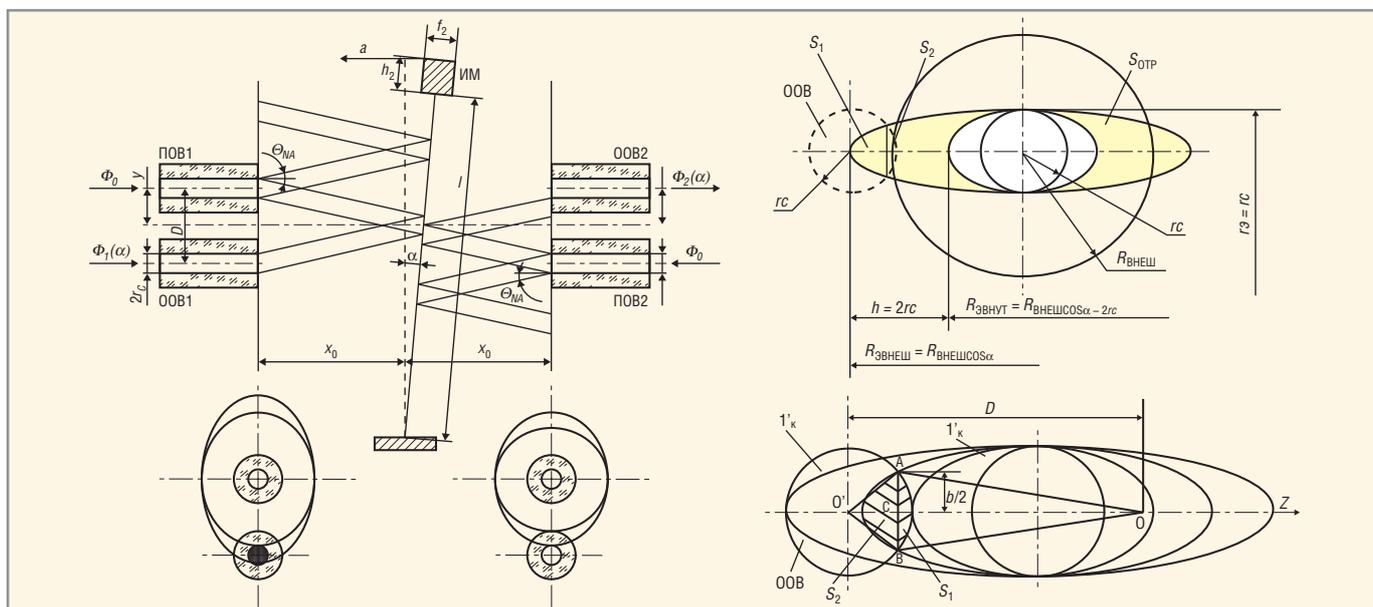


Рис. 1. Расчётная схема волоконно-оптического преобразователя угловых перемещений

перемещается под углом α относительно торцов волокон, рассмотрим на примере первого измерительного канала. Кольцевая зона преобразуется в эллипсоидную, которая смещается относительно ООВ1 в направлении Z. При этом изменяется площадь $S_{\text{ПР1}}$ приёмного торца ООВ1, освещённая отражённым от зеркала световым потоком, т.е. $S_{\text{ПР1}} = f_1(\alpha)$. Очевидно, что при $\Phi_0 = \text{const}$ функция преобразования $\Phi(\alpha)$ в диапазоне измерения будет определяться функцией передачи оптического тракта, т.е. коэффициентом $K_1(\alpha)$.

Эллипсоидная зона имеет переменные полуоси, размер которых зависит от значения угла α :

$$K_1(\alpha) = \rho \frac{\sum_{i=1}^k S_{\text{ПР1}}}{S_{\text{Э1}}}, \quad (1)$$

где ρ – коэффициент отражения зеркальной поверхности; $\sum_{i=1}^k S_{\text{ПР1}}$ – суммарная площадь приемных торцов ООВ, освещённая отражённым от зеркала световым потоком; $i = 1, \dots, k$ – количество ООВ; $S_{\text{Э1}}$ – площадь эллипсоидной зоны в плоскости приёмных торцов ООВ;

$$S_{\text{ПР1}} = S_1 + S_2. \quad (2)$$

Большая полуось $R_{\text{Э1}}$ определяется выражением:

$$R_{\text{Э1}} = R \cos \alpha, \quad (3)$$

а малая полуось определяется выражением $r_{\text{Э}} = r_{\text{C}}$.

Если начальное положение отражателя x_0 соответствует моменту, когда габаритные лучи 1 и 2 попадают на поверхность ООВ1, а луч 1 в диапазоне измерения перемещается вдоль оси Z по поверхности приёмного торца ООВ1 из положения $1'_н$ в положение $1'_к$, соответствующие крайнему левому и крайнему правому положению луча 1 относительно внешней границы ООВ1, то $R = R_{\text{ВНЕШ}}$. В этом случае $R_{\text{Э1}}$ определяется выражением:

$$R_{\text{ЭВНЕШ}} = R_{\text{ВНЕШ}} \cos \alpha. \quad (4)$$

$$S_1 = \frac{(R \cos \alpha)^2}{2} \left(\frac{\pi \beta}{180} - \sin \beta \right), \quad (5)$$

$$S_2 = \frac{r_{\text{А}}^2}{2} \left(\frac{\pi \gamma}{180} - \sin \gamma \right). \quad (6)$$

$$\text{Но } \sin \frac{\beta}{2} = \frac{b}{2R \cos \alpha}, \quad \sin \frac{\gamma}{2} = \frac{b}{2r_{\text{C}}},$$

соответственно:

$$\beta = 2 \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha}, \quad (7)$$

$$\gamma = 2 \arcsin \frac{b}{2r_{\text{C}}}. \quad (8)$$

Окончательно имеем:

$$S_{\text{ПР1}} = \frac{(R \cos \alpha)^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} \right) \right] + \frac{r_{\text{А}}^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2r_{\text{А}}} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2r_{\text{А}}} \right) \right].$$

В соответствии с рисунком 1 и известной формулой имеем:

$$O'C = \frac{D_1}{2} + \frac{r_{\text{C}}^2 - (R \cos \alpha)^2}{2D_1},$$

где D_1 – расстояния между оптическими осями ПОВ и ООВ.

Из треугольника АО'С находим:

$$b = AB = 2 \sqrt{r_{\text{C}}^2 - \left(\frac{D_1}{2} + \frac{r_{\text{C}}^2 - (R \cos \alpha)^2}{2D_1} \right)^2}. \quad (9)$$

Коэффициент преобразования $K_1(\alpha)$ с учётом выражений (7) и (9) примет вид:

$$K_1(\alpha) = \frac{1}{4 \rho r_{\text{C}} (2 X_i \text{tg} \Theta_{\text{НА}} - r_{\text{C}})} \times$$

$$\times \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{(R \cos \alpha)^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} \right) \right] + \right.$$

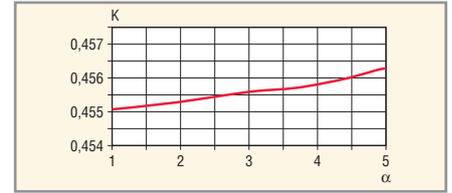


Рис. 2. Зависимость коэффициента $K_1(\alpha)$ от угла α

$$- \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} \right) \left. + \frac{r_{\text{C}}^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2r_{\text{C}}} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2r_{\text{C}}} \right) \right] \right\}. \quad (10)$$

В данном случае b и R являются переменными, зависящими от расстояния X_i от торца ОВ до зеркальной отражающей поверхности, расстояния D_1 между оптическими осями ПОВ и ООВ, а также от начального расстояния x_0 между торцом ВОК и отражающей поверхностью.

Зависимость коэффициента $K_1(\alpha)$ от угла α при расстоянии между оптическими осями $D = 0,7$ мм и начальном расстоянии $x_0 = 1,5$ мм представлена на рисунке 2.

Вывод коэффициента преобразования $K_2(\alpha)$ для второго измерительного канала преобразователя осуществляется аналогично.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурашкина Т.И. Теория, расчёт и проектирование волоконно-оптических измерительных приборов и систем. Учебное пособие. Изд-во ПГУ, 1999. 