

УДК 681.785.64; 621.3.061; 621.316.31

Исследование дифференциального волоконно-оптического преобразователя угловых перемещений с помощью оптического тестера

Удалов А.Ю., Назарова И.Т

Научный руководитель: д.т.н, профессор Мурашкина Т.И

Аннотация.

В работе предложено конструктивно-технологическое решение дифференциального волоконно-оптического преобразователя угловых перемещений (ВОПУП), который является базовым элементом волоконно-оптических датчиков (ВОД) ускорений, силы, давления и др. физических величин (ФВ). ВОПУП преобразует изменение угла наклона отражающих поверхностей модулирующего элемента (МЭ) в изменение интенсивности светового потока.

Ключевые слова: волоконно-оптический преобразователь, угловое перемещение, измерительная установка, дифференциальное преобразование, отражающая поверхность, световой поток.

Актуальной проблемой современной техники является измерение параметров вибраций, ударов и помех. Трудно найти объект или производственный процесс, который не испытывал бы воздействие вибрационных, ударных или акустических нагрузок. Наиболее перспективными являются волоконно-оптические датчики для измерения параметров вибрации, обеспечивающие надёжное функционирование информационно-измерительных систем в искро-, взрыво- и пожароопасных условиях.

Была поставлена задача: улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик волоконно-оптического преобразователя угловых перемещений, используемого в информационно-измерительных системах изделий ракетно-космической техники. Исходя из этого, был изучен и исследован дифференциальный ВОПУП,

приведена упрощенная конструкция установки, воспроизводящей угловое перемещение, используемая при проведении экспериментальных исследований ВОПУП.

Разработан дифференциальный ВОПУП, расчетно-конструктивная схема которого приведена на рисунке 1, который является базовым элементом ВОД ускорений, силы, давления и др. физических величин (ФВ), преобразующий изменение угла наклона отражающих поверхностей в изменение интенсивности светового потока в зоне измерений.

Применение дифференциальной схемы преобразования оптических сигналов необходимо для снижения погрешностей, обусловленных неинформативными изгибами оптических волокон при воздействии внешних механических факторов, например, при сборке датчиков, при испытаниях, при эксплуатации, которые ведут к существенным неинформативным потерям оптического сигнала при его прохождении по оптическим волокнам.

Чувствительным элементом преобразователя, воспринимающим внешнее воздействие, является металлическая пластина (МП), изготовленная из стали 36НХТЮ, имеющая зеркальные внешние поверхности. С двух сторон МП расположены оптические волокна первого и второго измерительных каналов, причем подводящие оптические волокна (ПОВ1) первого измерительного канала расположены соосно с отводящими оптическими волокнами (ООВ2) второго измерительного канала и, наоборот, ПОВ2 второго измерительного канала расположены соосно с ООВ1 первого измерительного канала.

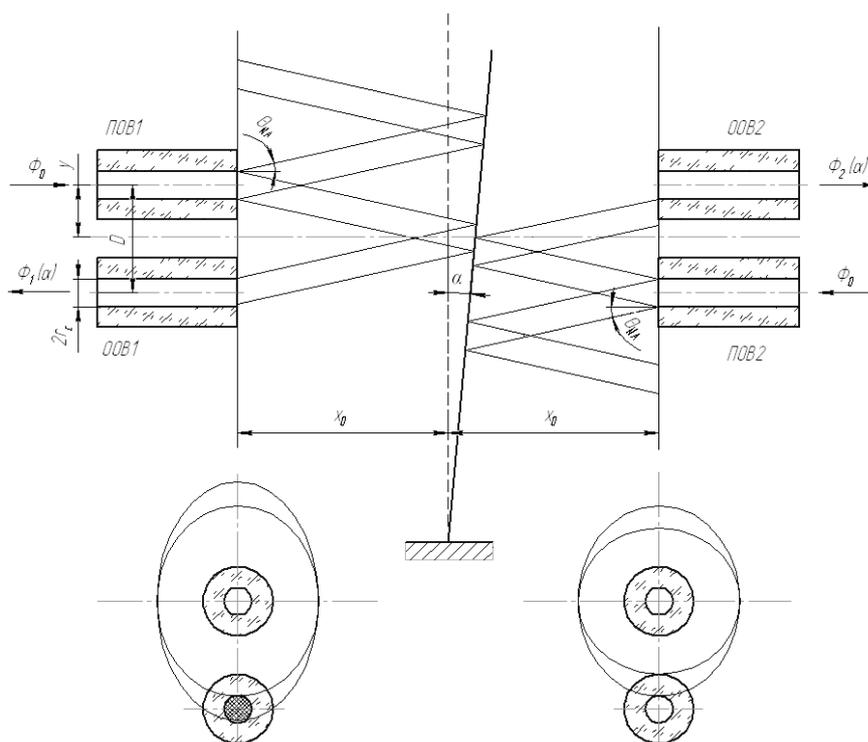


Рисунок 1 – Расчетная схема волоконно-оптического преобразователя угловых перемещений

Ширина металлической пластины выбирается таким образом, чтобы размеры светового пятна в диапазоне измерения не превышали размеров пластины. Расчетные значения МП: ширина – 3 мм, толщина – 0,2мм, длина – 20мм [1].

На рисунке 2 приведена упрощенная конструктивная схема ВОПУП, на рисунке 3 – геометрические построения, поясняющие смещение светового пятна при отклонении упругого элемента на некоторый угол.

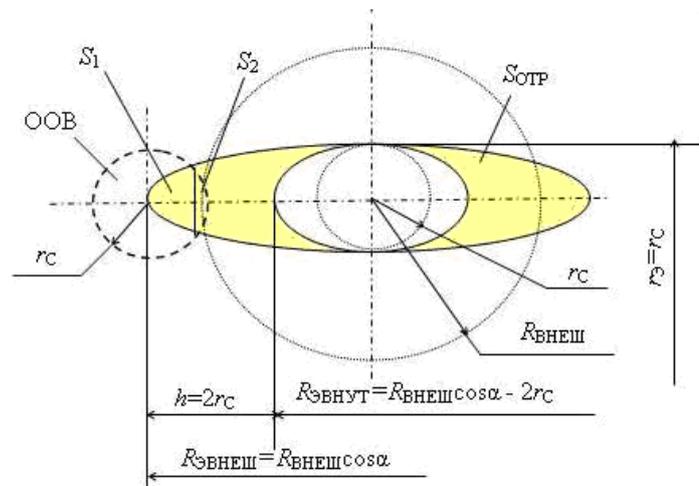


Рисунок 2 - Упрощенная конструктивная схема волоконно-оптического преобразователя

Упругий элемент 1 расположен между парой ПОВ 1 – ООВ 1 и ПОВ 2 – ООВ 2, причем ПОВ 1 и ПОВ 2 расположены на одной оптической оси, также как и ООВ 1 и ООВ 2.

В отсутствие давления лучи света от ПОВ проходят в прямом направлении путь x_0 до отражателя и путь x_0 в обратном направлении ООВ под апертурным углом $\Theta_{МА}$ к оптической оси волокна (рисунок 2). При этом в плоскости приемного торца ООВ наблюдается освещенная кольцевая зона шириной $h=r_c$, где r_c – радиус сердцевинны оптического волокна.

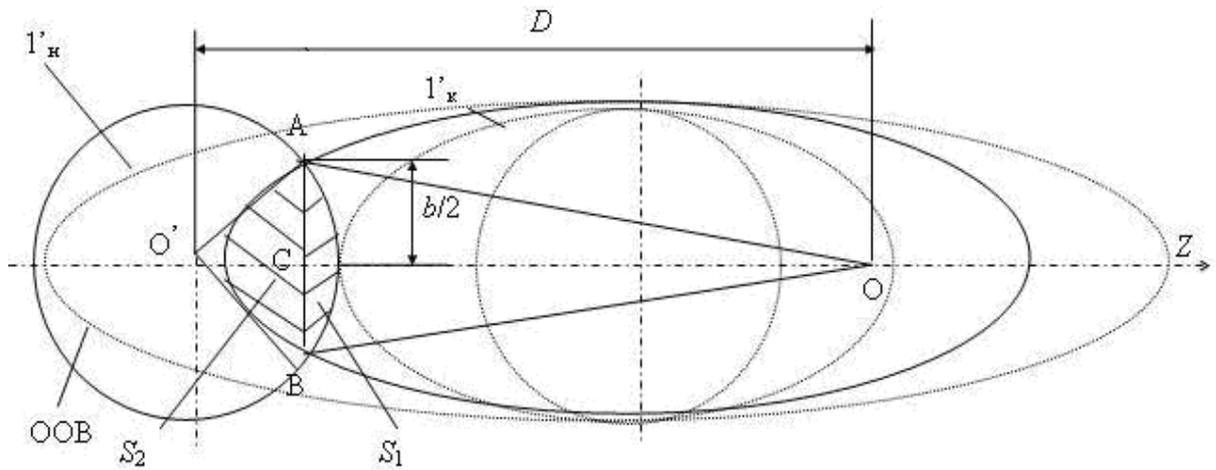


Рисунок 3 - Геометрические построения, поясняющие смещение светового пятна при отклонении упругого элемента на некоторый угол

Модуляция интенсивности светового потока в ВОП, когда освещенная площадка перемещается под углом α относительно торцов волокон, происходит следующим образом (см. рисунок 3).

Кольцевая зона преобразуется в эллипсоидную, которая смещается относительно ООВ в направлении Z. При этом изменяется площадь $S_{\text{пр}}$ приемного торца ООВ, освещенная отраженным от зеркала световым потоком, т.е. $S_{\text{пр}}=f(\alpha)$.

Очевидно, что при $\Phi_0=\text{const}$ вид функции преобразования $\Phi(\alpha)$ будет определяться видом функции передачи оптического тракта, то есть коэффициента $K(\alpha)$, в диапазоне измерения.

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

$$K(\alpha) = \rho \frac{\sum_{i=1}^k S_{\text{пр}}}{S_3} \quad (1)$$

где ρ – коэффициент отражения зеркальной поверхности;

$\sum_{i=1}^k S_{\text{пр}}$ – суммарная площадь приемных торцов ООВ, освещенная отраженным от зеркала световым потоком;

$i=1\dots k$ – количество ООВ;

S_3 – площадь эллипсоидной зоны в плоскости приемных торцов ООВ.

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

Площади S_1 и S_2 представляют собой сектора, образованные взаимным пересечением окружности радиусом, равным радиусу r_C сердцевины ООВ.

Большая полуось R_3 определяется выражением

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

а малая полуось определяется выражением $r_{\text{э}} = r_{\text{с}}$.

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

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

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

$$R_{\text{эВНУТ}} = R_{\text{ВНУТ}} \cos \alpha - 2r_{\text{с}}. \quad (5)$$

$$S_1 = \frac{(R \cos \alpha)^2}{2} \left(\frac{\pi \beta}{180} - \sin \beta \right). \quad (6)$$

$$S_2 = \frac{r_{\text{с}}^2}{2} \left(\frac{\pi \gamma}{180} - \sin \gamma \right). \quad (7)$$

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

$$\beta = 2 \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha}. \quad (8)$$

$$\gamma = 2 \arcsin \frac{b}{2r_{\text{с}}}. \quad (9)$$

С учетом выражений (3) — (9) выражение (2) примет вид

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

В соответствии с рисунком 3, в и известной формулой имеем:

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

где D_1 – расстояния между оптическими осями ПОВ и ООВ.

Из треугольника АО'С

$$b = AB = 2 \sqrt{r_c^2 - \left(\frac{D_1}{2} + \frac{r_c^2 - (R \cos \alpha)^2}{2D_1} \right)^2}. \quad (10)$$

Коэффициент преобразования $K(\alpha)$ с учетом выражений (8) и (10) примет вид

$$K_1(\alpha) = \frac{1}{4pr_c(2X_i \text{tg} \Theta_{NA} - r_c)} \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{(R \cos \alpha)^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{r_c^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2r_c} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2r_c} \right) \right] \right\}. \quad (11)$$

В данном случае b и R являются переменными, определяемыми выражениями (10), (4) или (5) соответственно и 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.

Вывод коэффициента преобразования для второго преобразователя осуществляется аналогично.

Принцип работы преобразователя заключается в следующем.

Световой поток Φ_0 от источника излучения по ПОВ₁ и ПОВ₂ измерительного канала подается в зону измерения. Под действием ускорения a происходит смещение упругого элемента 1, выполненного в виде металлической пластины, плоскости которой с двух сторон отполированы до зеркальной поверхности, на угол α . Изменение положения отражающих поверхностей вызывает изменение интенсивности светового потока. Световые потоки $\Phi_1(\alpha)$ и $\Phi_2(\alpha)$, отражённые от отражающих поверхностей, которые меняют угол наклона под действием ускорения, по отводящим оптическим волокнам ООВ₁ и ООВ₂ измерительного канала, поступает на приёмники излучения измерительного канала.

ООВ должны располагаться на расстоянии x_0 , в связи с тем, что таким образом достигается оптимальный ввод оптического излучения в область приемных торцов ООВ (см. рисунок 1).

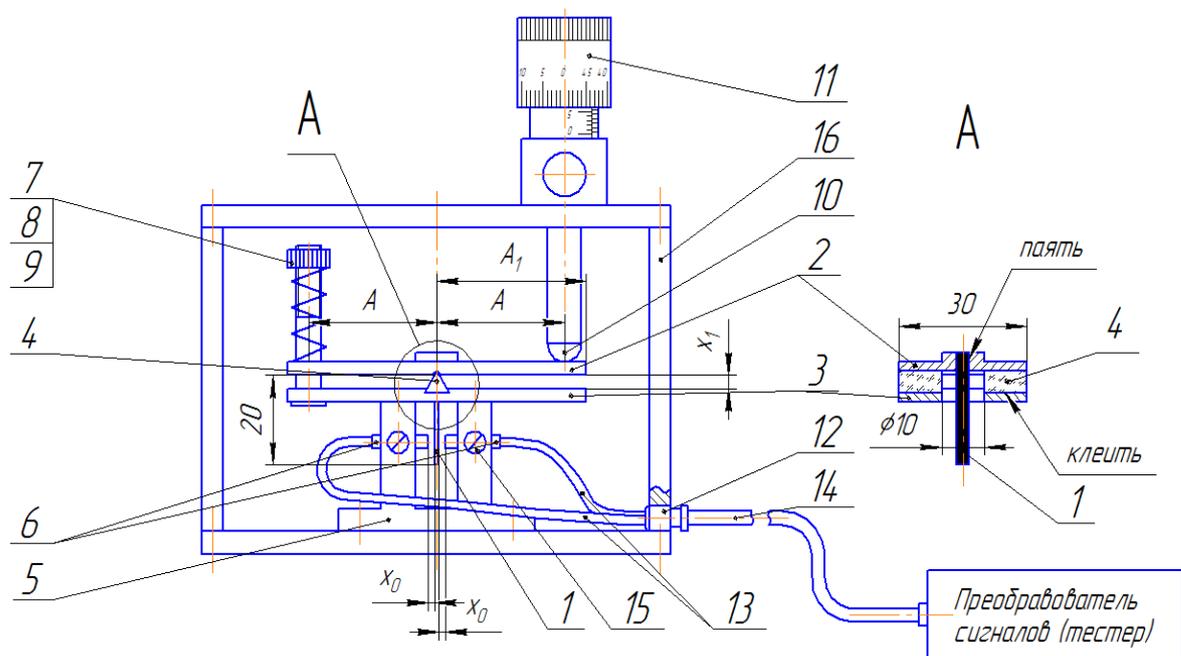
Оптическая схема ВОПУП отъюстирована так, что в отсутствие измеряемой ФВ световое излучение, выходящее из торцов ПОВ₁ и ПОВ₂, после отражения от зеркальных

поверхностей МП равномерно распределяется между торцами ООВ1 и ООВ2. Появление силы, вектор которой перпендикулярен плоскости МП, приводит к смещению её на угол α и, тем самым, к изменению потока излучения, попадающего в приемные торцы ООВ1 и ООВ2.

При разработке ВОПУП необходимо определить условия, при которых обеспечивается работоспособность дифференциального волоконно-оптического преобразователя ФВ.

Стоит задача подтверждения полученных теоретических расчетов путем проведения экспериментов. Для снижения необоснованных затрат на проведение экспериментальных исследований готовых конструкций датчика предложено использовать установку, воспроизводящую угловые перемещения.

На рисунке 4 приведена упрощенная конструкция установки, воспроизводящей угловое перемещение, используемая при проведении экспериментальных исследований ВОПУП. Установка содержит жгут подводящих и отводящих оптических волокон 13, рабочие концы 12 которого закреплены в наконечниках 4, фиксируемых винтами 15 в стойке 5 симметрично относительно отражателя – металлической пластинки 1, имеющей зеркально отполированные внешние поверхности. МП неподвижно при помощи пайки крепится в державке 2. Угол задается с помощью системы задания угла, в которую входят: двушкальный механизм 11 микрометрического винта, имеющий сферический наконечник 10, винт-стойка 7, регулировочная гайка 8, пружина 9, державка 2, расположенная на расстоянии x_1 относительно основания 3, шарнир 4. Шарнир 4 выполнен из искусственного рубина в виде призмы и крепится в основание 3 клеем. Двушкальный механизм 11 установлен в крышке корпуса 16.



- | | |
|--|---|
| 1 – отражатель (металлическая пластина – МП) | 9 – пружина |
| 2 – державка | 10 – наконечник микрометрического винта |
| 3 – основание | 11 – двушкальный механизм |
| 4 – призма (шарнир) | 12 – втулка |
| 5 – стойка | 13 – рабочий жгут подводящих и отводящих оптических волокон |
| 6 – наконечник | 14 – кабель |
| 7 – винт-стойка | 15 – винт крепления наконечника |
| 8 – гайка регулировочная | 16 – корпус |

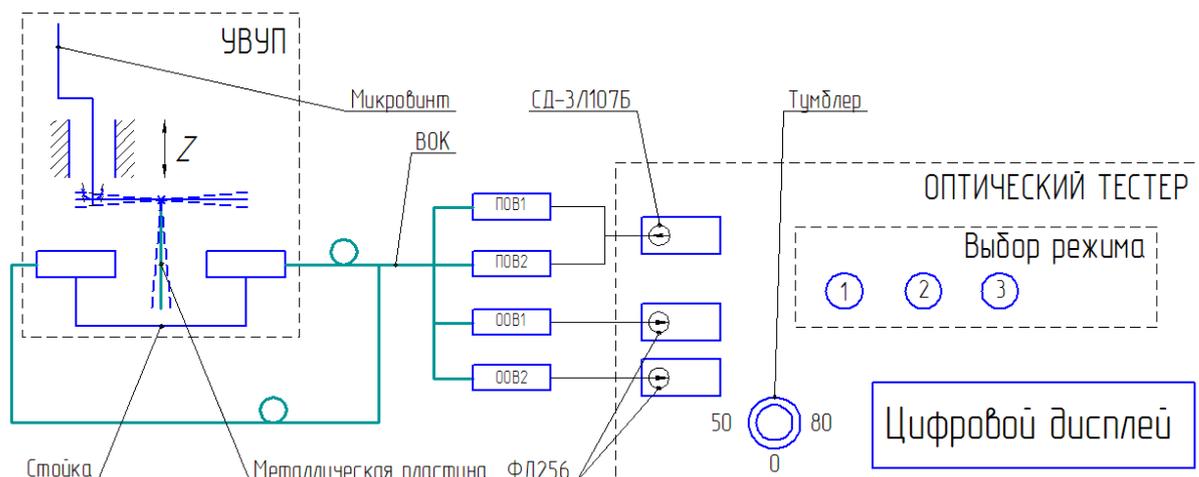
Рисунок 4 – Установка для экспериментального исследования ДВОПУП

Установка обеспечивает угловые отклонения МП в обе стороны от вертикального положения. Максимальное угловое перемещение составляет 5° . Ограничителем перемещения является расстояние x_1 . $x_1 = A_1 \sin \alpha$, где A_1 – 0,5 длины державки 2; α – максимальный угол отклонения, равный 5° .

Чтобы обеспечить начальное расстояние $x_0 = 1,5$ мм, необходимо установить между МП и оптическими волокнами однозначную меру в виде пластины номиналом 1,5 мм [1]. Контроль правильности установки начального расстояния x_0 производится по выходному сигналу фотодиода, пристыкованного к ООВ. Если сигнал на выходе будет 0, то пластина установлена правильно, а следовательно, начальное расстояние $x_0 = 1,5$ мм соблюдено. Эти действия являются также установкой точки начала отсчёта при непосредственном проведении процесса воспроизведения перемещения.

Установка работает следующим образом: с помощью двухкального механизма 11 задается угловое перемещение МП. Пружина сжатия 9, установленная на расстоянии A от центра державки 2, препятствует свободному перемещению её противоположного конца. В нулевом положении при отсутствии угла наклона МП, лучи света от ПОВ1 и ПОВ2 проходят в прямом направлении путь x_0 до отражателя и путь x_0 в обратном направлении к ООВ1 и ООВ2, расположенных в рабочих жгутах 12, под апертурным углом $\Theta_{НА}$ к оптической оси волокна. При этом в плоскости приемных торцов ООВ1 и ООВ2 наблюдается освещенная кольцевая зона шириной $h=r_C$, где r_C – радиус сердцевины оптического волокна. Подпружиненная державка с МП в центре отклоняется при помощи системы задания угла на заданный угол α в одну или другую сторону относительно нулевого положения, изменяя интенсивность светового потока, падающего на плоскость торцов ООВ1 и ООВ2 рабочих жгутов после отражения зеркальными поверхностями МП. Кольцевая зона преобразуется в эллипсоидную, которая смещается относительно ООВ1 и ООВ2 в направлении Z [1]. При этом изменяется площадь $S_{ПР}$ приемных торцов ООВ1 и ООВ2, освещенная отраженным от зеркала световым потоком. После чего происходит дальнейшее преобразование выходного оптического сигнала в токовый сигнал фотодиода (показания снимаются с преобразователя сигналов).

На рисунке 5 представлена схема экспериментальных исследований. Установка для экспериментальных исследований содержит оптический тестер, волоконно-оптический кабель, установку задания угловых перемещений (УЗУП).



- УЗУП – установка для воспроизведения углового перемещения; ВСК – волоконно-оптический кабель;
- ПОВ1, ПОВ2 – подводящие оптические волокна; ФД – фотодиод;
- ООВ1, ООВ2 – отводящие оптические волокна СД – светодиод

Рисунок 5 - Схема экспериментальных исследований

В схеме оптического тестера предусмотрены два приемника излучения (фотодиода) для обеспечения дифференциальной схемы. Оптический тестер содержит источник излучения (инфракрасный светодиод типа ЗЛ107Б) с регулируемой мощностью излучения, два фотоприемных канала (фотодиоды с усилителями), блок обработки информации (программируемый микроконтроллер), цифровой индикатор и блок питания. Ток, проходящий через светодиод, может принимать три значения – 0; 50; 80 нА, выбираемые при помощи тумблера: «Уст. 0» – для компенсации начальных напряжений смещения фотоприемных каналов (установка нуля), «50 нА» и «80 нА» – для проведения измерения. Используемые фотодиоды типа ФД256 работают в фотогальваническом режиме, что обеспечивает низкий уровень собственных шумов. Они подключены к преобразователю «ток-напряжение», обеспечивающему близкое к нулю напряжение смещения (равно $U_{см}$ операционного усилителя) и малое (близкое к нулю) сопротивление нагрузки фотодиода. Это позволяет получить высокую линейность функции преобразования фотоприемных каналов в диапазоне изменения интенсивности принимаемого оптического сигнала от 0 до 10^6 нА. Максимальный выходной сигнал фотопреобразователей – 5 В, определяется АЦП, встроенным в микроконтроллер типа PIC16F873/SP. В соответствии с программой микроконтроллер обеспечивает три режима обработки информации:

- в первом режиме на цифровом индикаторе отображаются цифровые значения сигналов обоих каналов (I_1 и I_2);
- во втором режиме отображается отношение этих сигналов (I_1 / I_2);
- в третьем режиме отображается результат вычислений по формуле $(I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$.

На передней панели тестера расположены 3 кнопки: первая кнопка позволяет скомпенсировать начальные напряжения смещения фотоприемных каналов («Уст. 0»); вторая кнопка – выбор режима обработки информации; третья кнопка выключает отображение номера выбранного режима обработки информации. При выключенном источнике излучения нажимается кнопка «Уст. 0». Контроллер запоминает значения напряжений, имеющих в этот момент на выходах фотоприемных каналов, и автоматически учитывает их при дальнейшей работе.

Так как используется микрометрический винт – необходимо провести сопоставление перемещений в мкм (h) с отклонением от вертикали в градусах (α) (таблица 1).

Таблица 1 – Соответствие перемещения в мкм угловому перемещению в градусах

h	0	0,261	0,525	0,768	1,047	1,308	1,569	1,83	2,094	2,355	2,616
-----	---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------

α	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
----------	---	-----	---	-----	---	-----	---	-----	---	-----	---

Графики зависимости перемещения головки микровинта от значения фототока первого и второго каналов приведены на рисунке 6, зависимость фототока от перемещения микровинта – на рисунке 7.

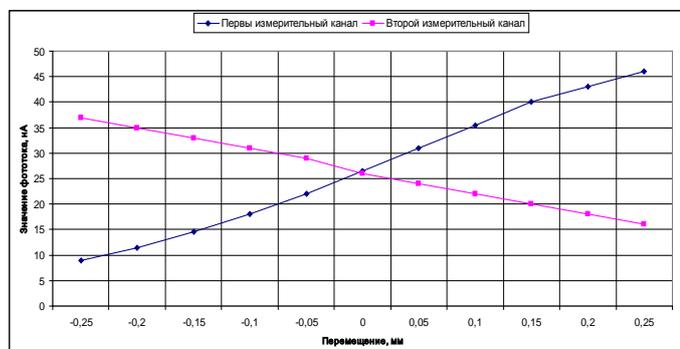


Рисунок 6 – График зависимости перемещения головки микровинта от значения фототока первого и второго каналов.

Таблица 2 – Результаты эксперимента

h	0	0,261	0,525	0,768	1,047	1,308	1,569	1,83	2,094	2,355	2,616
α	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
по часовой											
I_1 левого канала, нА	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06
I_2 правого канала, нА	0,22	0,24	0,25	0,32	0,35	0,38	0,37	0,27	0,13	0,06	0,03
против часовой											
I_1 левого канала, нА	0,21	0,24	0,27	0,3	0,34	0,37	0,4	0,4	0,3	0,19	0,1
I_2 правого канала, нА	0,22	0,2	0,17	0,15	0,13	0,11	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06

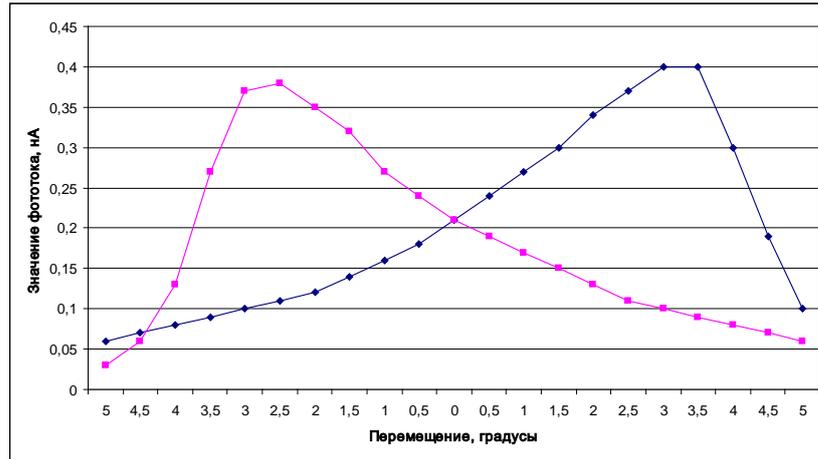


Рисунок 7 – Графические зависимости фототока от перемещения микроинта ($0^\circ < \alpha < 5^\circ$ в обе стороны от вертикали)

1 Результаты экспериментальных исследований подтвердили реализуемость дифференциальной схемы преобразования оптических сигналов непосредственно в зоне восприятия измерительной информации в ВОПУП отражательного типа.

2 Результаты экспериментальных исследований показали хорошую сходимость с результатами теоретических исследований: что должно быть $\alpha = \pm 3^\circ$ (рисунок 6), расстояния между МЭ и общим приемным торцом ООВ и ПОВ $x_0 = 1,5$ мм, межцентровые расстояния между оптическими осями ООВ и ПОВ $D = 0,7$ мм, необходимые для получения максимальной чувствительности [1].

Библиографический список

- 1 Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
- 2 Гауэр Дж. Оптические системы связи: Перевод с английского - М: Радио и связь, 1989.
- 3 Гжиров Р.И. Краткий справочник конструктора: Справочник - Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983.
- 4 Тихонов А.И., Тихоненков В.А., Мокров Е.А. Упругие элементы датчиков механических величин. - Ульяновск, 2000.
- 5 Краткий физико-технический справочник; т 2. Под общей редакцией Яковлева К.П. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962.
- 6 Мурашкина Т.И., Волчихин В.И. Амплитудные волоконно-оптические датчики автономных систем управления: Монография. - Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 1999.
- 7 Мурашкина Т.И. Теория, расчет и проектирование волоконно-оптических измерительных приборов и систем: Учебное пособие. - Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 1999.
- 8 Проектирование датчиков для измерения механических величин Под редакцией Е.П. Осадчего. - М.: Машиностроение, 1979.
- 9 Справочник конструктора оптико-механических приборов. В.А. Ганов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общей редакцией В.А. Панова. - Л: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1980.

Авторы:

Назарова Инна Таджиддиновна, аспирант Пензенского государственного университета, г. Пенза, ул. Красная, 40, тел.: (8412)36-84-59, e-mail: Uncate@yandex.ru

Удалов Александр Юрьевич, студент, Пензенского государственного университета г. Пенза, ул. Красная, 40, тел.: (8412)36-84-59, e-mail: Udaaleksandr@rambler.ru