

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 681.7.068

**В. И. Борисов, д-р физ.-мат. наук, А. П. Матросов, М. С. Таушев, И. В. Шилова**

### **ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЖГУТОВ**

Предложены три схемы волоконно-оптических датчиков перемещения на основе волоконно-оптических жгутов, позволяющих увеличить чувствительность за счет применения светопоглощающей жидкости между торцами волоконных жгутов и использовать светодиоды в качестве источника излучения без применения специальных устройств ввода излучения в жгуты. Проведен теоретический и экспериментальный анализ работы таких датчиков.

Разработка новых типов и конструкций приборов неразрушающего контроля является актуальной задачей, так как они во многом обеспечивают возможность создания высококачественных материалов и технических изделий. Повышение качественных характеристик таких приборов невозможно без применения в них новых типов датчиков и современных методов регистрации и обработки измерительной информации.

Одним из типов высокочувствительных первичных преобразователей перемещений являются волоконно-оптические датчики разрывного типа, построенные на основе моноволоконных световодов [1–3]. Применение же в конструкциях датчиков волоконно-оптических жгутов (ВОЖ) позволяет использовать в качестве источников излучения светодиоды или лампы накаливания вместо полупроводниковых лазеров, что обеспечивает более высокую стабильность характеристик преобразователей, их больший срок службы и позволяет обойтись без использования специальных устройств ввода излучения из источника в ВОЖ.

В работе проведен анализ работы трех типов волоконно-оптических датчиков перемещений на основе ВОЖ. Схема датчика первого типа приведена на рис. 1.

Основу датчика составляет пластмассовый корпус 1, в котором изготовле-

ны два цилиндрических отверстия. В одно из отверстий герметично вставляется излучающий ВОЖ 2, клеенный в металлическую втулку 3. Во второе отверстие вставлен приемный ВОЖ 4, клеенный в металлическую втулку 5. Между цилиндрическим отверстием и втулкой 5 имеется небольшой зазор, позволяющий перемещаться приемному жгуту вдоль отверстия и препятствующий вытеканию поглощающей жидкости 7, заполняющей зазор между торцами излучающего и приемного жгутов. Движению приемного ВОЖ способствует пружина 6. В корпусе 1 изготовлена емкость 8, в которой налита жидкость с высоким показателем поглощения излучения, распространяющегося по жгутам. Для предотвращения вытекания жидкости из датчика емкость 8 закрыта пробкой 9. Корпус датчика и втулка приемного ВОЖ закрепляются соответственно на двух элементах, движущихся относительно друг друга, расстояние между которыми необходимо определить.

Принцип работы преобразователя основан на том, что излучение из излучающего волоконно-оптического жгута расходится в апертурном угле и, по мере удаления входного торца приемного ВОЖ от излучающего жгута, поток излучения, вводимый в приемный ВОЖ,

будет уменьшаться, в результате чего будет уменьшаться регистрируемый сигнал. Для регулировки диапазона перемещения предлагается пространство между выходным торцом излучающего волоконно-

оптического жгута и входным торцом приемного жгута заполнять жидкостью, имеющей различные показатели поглощения на длине волны излучения, распространяющегося по ВОЖ датчика.

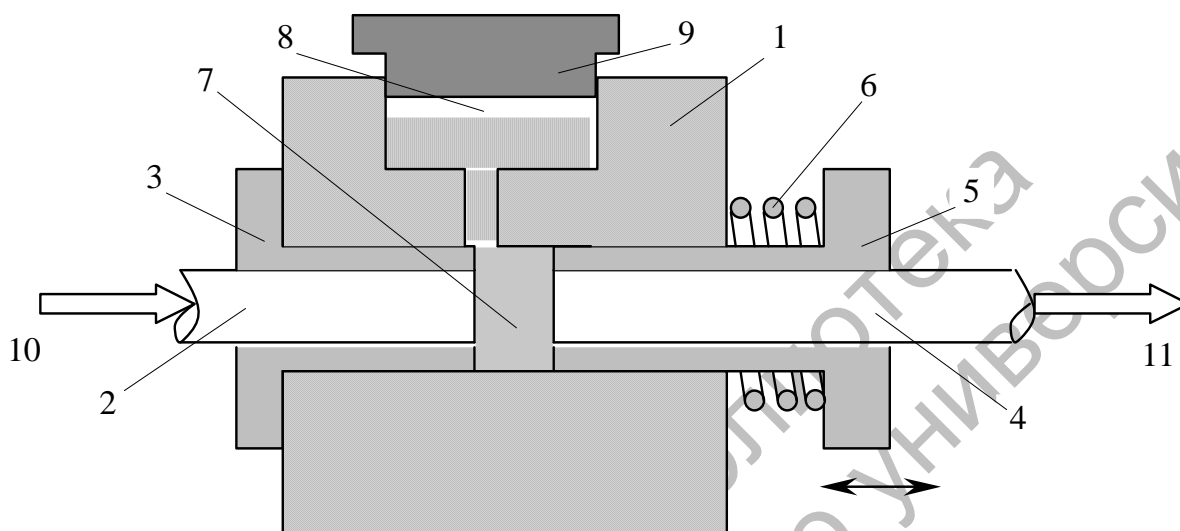


Рис. 1. Схема волоконно-оптического датчика на основе двух жгутов: 1 – эбонитовый корпус; 2 – излучающий ВОЖ; 3 – втулка излучающего жгута; 4 – приемный ВОЖ; 5 – втулка приемного жгута; 6 – пружина; 7 – поглощающая жидкость; 8 – емкость для поглощающей жидкости; 9 – пробка; 10 – излучение источника, вводимое в излучающий жгут; 11 – излучение, выводимое на фотоприемник из приемного жгута

Для такого датчика нормированное на максимум значение выходного сигнала определяется следующим выражением, которое аналогично для датчиков на основе моноволоконных световодов [4]:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{r^2}{\left( r + x \cdot \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{NA}{n_{\text{ж}}} \right) \right)^2} e^{-kx}, \quad (1)$$

где  $k$  – показатель поглощения жидкости;  $x$  – расстояние между торцами ВОЖ;  $I_0$  – значение сигнала при нулевой толщине зазора между торцами жгутов;  $r$  – радиус волоконно-оптических жгутов;  $NA$  – числовая апертура ВОЖ;  $n_{\text{ж}}$  – показатель преломления поглощающей жидкости.

Экспериментальные измерения проводились с использованием в качестве источника излучения суперяркого светодио-

да, излучающего красный свет. В экспериментах применялись два отрезка волоконно-оптических жгутов диаметром 2 мм, числовой апертурой 0,3 и длиной 0,5 м. Волоконные световоды применяемых жгутов защищены бронерукавом, а входные и выходные концы жгутов вклеены в металлические наконечники, которые имели возможность перемещаться в корпусе датчика и обеспечивали такой зазор между корпусом датчика и наконечником, который не позволял вытекать из корпуса датчика поглощающей жидкости. В качестве регистрирующего прибора использовался ваттметр оптический ОМЗ–65. Результаты расчетов и экспериментальные зависимости выходного сигнала датчика перемещения, нормированного на максимальное значение, которое реализуется при нулевом зазоре между торцами жгутов, без жидкости и с по-

глошающей жидкостью между торцами жгутов для разных значений показателя поглощения жидкости представлены на рис. 2. Расчеты проведены для используемых в экспериментах волоконно-оптических жгутов. В качестве погло-

щающей жидкости в экспериментах использовался водный раствор черных чернил.

Перемещение приемного жгута осуществлялось с помощью микрометрического винта.

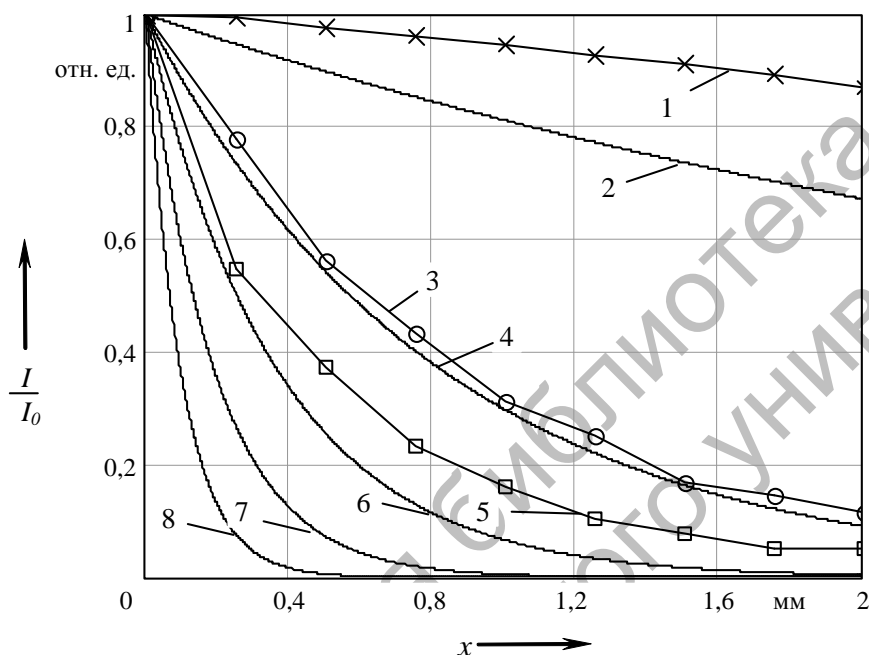


Рис. 2. Зависимости выходного сигнала датчика перемещения от расстояния между торцами волоконно-оптических жгутов: 1 – показатель поглощения жидкости  $0 \text{ мм}^{-1}$  (экспериментальные данные); 2 – показатель поглощения жидкости  $0 \text{ мм}^{-1}$ ; 3 – показатель поглощения жидкости  $1 \text{ мм}^{-1}$  (экспериментальные данные); 4 – показатель поглощения жидкости  $1 \text{ мм}^{-1}$ ; 5 – показатель поглощения жидкости  $2,5 \text{ мм}^{-1}$  (экспериментальные данные); 6 – показатель поглощения жидкости  $2,5 \text{ мм}^{-1}$ ; 7 – показатель поглощения жидкости  $5 \text{ мм}^{-1}$ ; 8 – показатель поглощения жидкости  $10 \text{ мм}^{-1}$

Из приведенных графиков видно, что между экспериментальными и теоретическими зависимостями наблюдается лишь качественное соответствие как для случая отсутствия поглощающей жидкости между торцами ВОЖ, так и при наличии жидкости. Так как экспериментальные зависимости располагаются выше соответствующих теоретических, то это свидетельствует о каком-то неучтенном в приведенном выше расчете физическом механизме распространения света в датчике. Одним из возможных механизмов может быть то, что в экспериментах реализуется неполное заполнение апертурного угла излучающего ВОЖ при его возбуждении источником

света, а вторым – неравномерное распределение потока излучения по торцу жгута. Из приведенных зависимостей видно, что использование поглощающей жидкости между торцами ВОЖ приводит к увеличению чувствительности датчика и к уменьшению диапазона измеряемого перемещения. При этом увеличение чувствительности наблюдается при малых значениях перемещений, где наблюдается почти линейный характер изменения сигнала от величины перемещения. Но так как вид градуировочных характеристик носит экспоненциальный характер, то для их линеаризации при конструировании дат-

чика в качестве измерительной системы для обработки полученных с фотоприемника сигналов можно использовать логарифмический усилитель. В этом случае градуировочные характеристики будут иметь линейный характер.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что для увеличения чувствительности волоконно-оптических датчиков перемещения разрывного типа с соосным расположением волоконно-оптических жгутов и поглощающей жидко-

стью между торцами жгутов необходимо применять сильно поглощающую жидкость с натуральным показателем поглощения в десятки обратных миллиметров, что позволит использовать такой датчик для измерения микроперемещений.

Во второй схеме датчика перемещения, представленной на рис. 3, используется двойной волоконно-оптический жгут специальной конструкции.

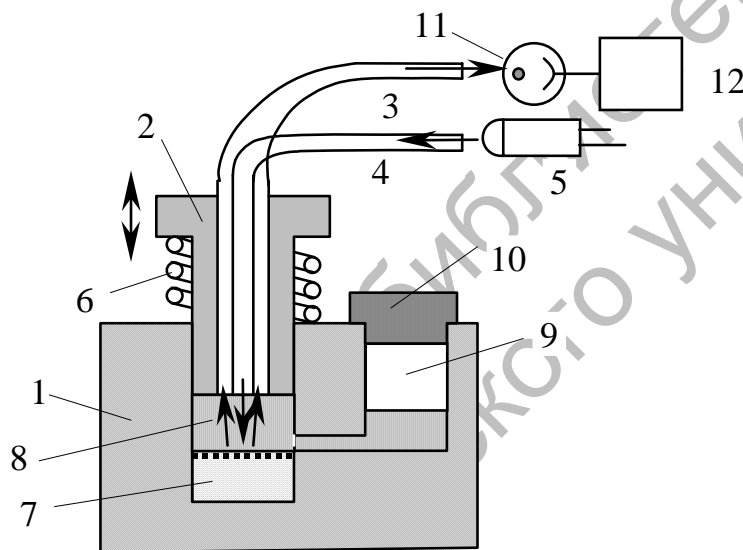


Рис. 3. Схема волоконно-оптического датчика перемещения с двойным жгутом: 1 – корпус; 2 – втулка; 3 – внешний кольцевой волоконно-оптический жгут; 4 – внутренний жгут; 5 – источник излучения; 6 – возвратная пружина; 7 – зеркало; 8 – светопоглощающая жидкость; 9 – емкость для жидкости; 10 – пробка; 11 – фотоприемник; 12 – устройство для обработки измерительного сигнала

Это фактически два жгута разной толщины, световоды одного из которых в выходной части образуют кольцо, окружающее круглый выходной торец более тонкого жгута. При этом один из жгутов может использоваться для ввода излучения от источника, а другой – для подвода излучения к фотоприемнику.

Характер изменения регистрируемого сигнала вышеуказанным преобразователем зависит от того, какой из двух жгутов является излучающим, а какой – приемным, что можно проследить с помощью рис. 4.

Принцип работы рассматриваемого преобразователя основан на том, что излучение от излучающего жгута, отражаясь от зеркала, частично вводится в приемный жгут.

Из схемы на рис. 4, а, иллюстрирующей работу датчика перемещений при использовании внутреннего жгута в качестве излучающего, видно, что при нулевом зазоре  $x$  между зеркалом и торцами ВОЖ выходной сигнал датчика равен нулю, а по мере увеличения зазора начинает увеличиваться до тех пор, пока отраженное от зеркала излучение

полностью не засветит кольцевой торец приемного ВОЖ. Увеличение сигнала датчика будет наблюдаться при значении перемещения, удовлетворяющем следующему неравенству:

$$0 \leq x \leq \frac{(R-r)n_{ж}}{2NA},$$

где  $R$  – внешний радиус кольцевого жгута;  $r$  – внутренний радиус кольцевого жгута, равный радиусу внутреннего жгута.

В этом случае относительное изменение сигнала датчика, нормированное на значение сигнала для случая, когда все излучение из внутреннего жгута попадает в приемный, будет определяться следующим выражением:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \left( 1 - \frac{r^2}{\left( r + 2x \frac{NA}{n_{ж}} \right)^2} \right) e^{-2kx}. \quad (2)$$

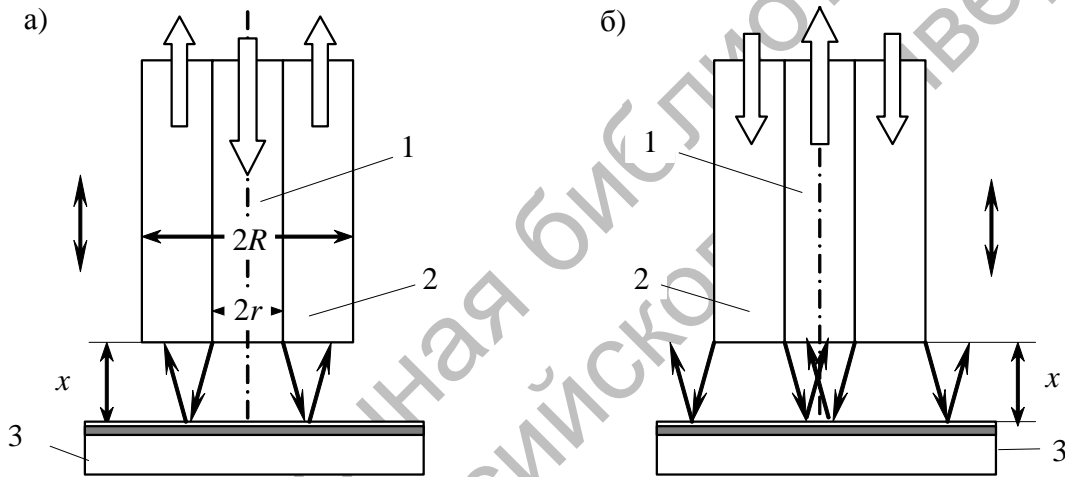


Рис. 4. Схема работы датчика перемещения на основе двойного жгута при использовании в качестве излучающего внутреннего жгут (а) или внешнего (б): 1 – внутренний жгут; 2 – внешний кольцевой жгут; 3 – зеркало

Формула (2) получена в предположении, что синус малого угла равен тангенсу этого угла и равен самому углу в радианной мере. Для реальных ВОЖ это условие выполняется достаточно удовлетворительно для значений числовой апертуры до 0,3.

При увеличении измеряемого перемещения, удовлетворяющего неравенству

$$x \geq \frac{(R-r)n_{ж}}{2NA},$$

выходной сигнал датчика начинает уменьшаться в соответствии со следую-

щим выражением:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{R^2 - r^2}{\left( r + 2x \frac{NA}{n_{ж}} \right)^2} e^{-2kx}, \quad (3)$$

потому что при увеличении  $x$  освещенность кольцевого жгута будет уменьшаться.

Характер рассчитанных по формулам (3) и (4) и измеренных зависимостей выходного сигнала такого датчика приведен на рис. 5. Расчеты и экспериментальные измерения проводились для

двойного ВОЖ с диаметром внутреннего жгута 1 мм и общим диаметром 3 мм.

Из рис. 5 видно, что максимальное значение сигнала датчика не достигает единицы, что связано с тем, что часть излучения, вышедшего из внутреннего ВОЖ, обратно отражается зеркалом в тот же жгут. Также видно, что применение

поглощающей жидкости для данного типа преобразователя нецелесообразно, так как это приводит к уменьшению динамического диапазона измерений, к увеличению нелинейности градуировочной характеристики и к ее неоднозначности.

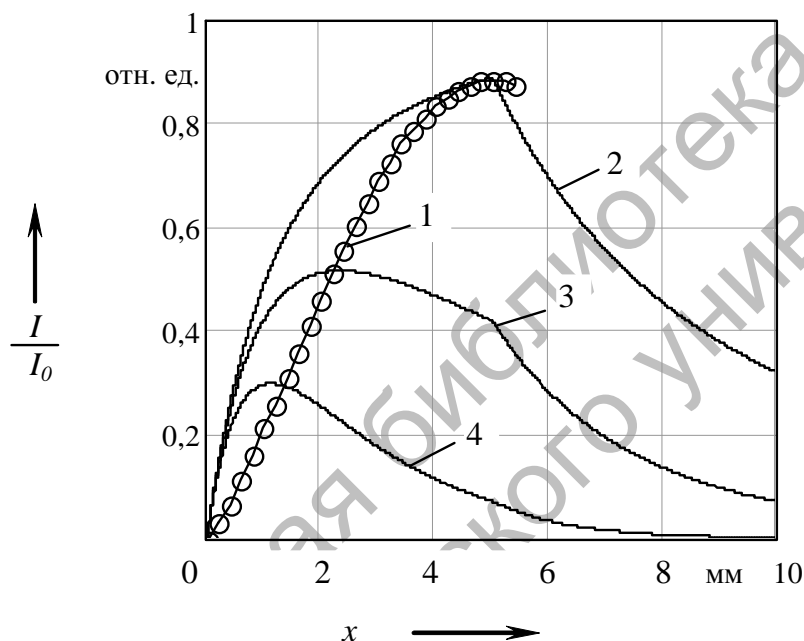


Рис. 5. Зависимости выходного сигнала датчика перемещения на основе двойного жгута при использовании в качестве излучающего внутреннего жгута: 1 – показатель поглощения жидкости 0 мм<sup>-1</sup> (экспериментальные данные); 2 – показатель поглощения жидкости 0 мм<sup>-1</sup>; 3 – показатель поглощения жидкости 0,075 мм<sup>-1</sup>; 4 – показатель поглощения жидкости 0,25 мм<sup>-1</sup>

Проведенные экспериментальные измерения, результаты которых приведены на рис. 5, показали, что при увеличении зазора между зеркалом и общим торцом жгутов от нуля до точки, где наблюдается перегиб градуировочной характеристики, выходной сигнал преобразователя изменяется по практически линейной зависимости, что подтверждает эффективность работы приведенной на рис. 3 схемы датчика на начальном участке градуировочной зависимости.

Из схемы на рис. 4, б, иллюстрирующей работу датчика перемещений при использовании внешнего кольцевого жгута в качестве излучающего, а внутреннего – в

качестве приемного, наблюдаются три характерных диапазона. Первый характеризуется изменением величины перемещения, удовлетворяющем следующему неравенству:

$$0 \leq x \leq \frac{r_{\text{ж}}}{2NA}.$$

В этом диапазоне по мере увеличения перемещения сигнал начинает увеличиваться от нуля до тех пор, пока отраженное от зеркала излучение полностью не засветит торец приемного ВОЖ. В этом случае относительное изменение сигнала датчика, нормирован-

ное на значение сигнала для случая, когда все излучение из внешнего жгута попадает в приемный, будет определяться следующим выражением:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \left( \frac{r^2 - \left( r - 2x \frac{NA}{n_{ж}} \right)^2}{\left( R + 2x \frac{NA}{n_{ж}} \right)^2 - \left( r - 2x \frac{NA}{n_{ж}} \right)^2} \right) e^{-2kx}. \quad (4)$$

Второй диапазон характеризуется следующим неравенством:

$$\frac{rn_{ж}}{2NA} \leq x \leq \frac{rn_{ж}}{NA}.$$

В этом случае торец приемного жгута засвечивается дополнительно по сравнению с первым диапазоном. В этом случае относительное изменение сигнала датчика будет определяться следующим выражением:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \left( \frac{r^2 + \left( r - 2x \frac{NA}{n_{ж}} \right)^2}{\left( R + 2x \frac{NA}{n_{ж}} \right)^2} \right) e^{-2kx}. \quad (5)$$

При дальнейшем увеличении величины перемещения при  $x \geq \frac{rn_{ж}}{NA}$  сигнал датчика начнет монотонно уменьшаться, так освещенность торца приемного жгута будет убывать обратно пропорционально квадрату перемещения в соответствии с выражением

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{2r^2}{\left( R + 2x \frac{NA}{n_{ж}} \right)^2} e^{-2kx}. \quad (6)$$

Анализ формул (4)–(6) показывает, что выходной сигнал такого датчика на всех обозначенных выше промежутках является нелинейной функцией от величины измеряемого перемещения. На рис. 6 приведены экспериментальная и расчетная зависимости выходного сигнала датчика на основе двойного ВОЖ при использовании внешнего кольцевого жгута в качестве излучающего, а внутреннего – в качестве приемного, при отсутствии между зеркалом и ВОЖ поглощающей жидкости. Выходной сигнал пронормирован на значение выходного сигнала при условии, что весь поток излучения из излучающего жгута полностью вводится в приемный.

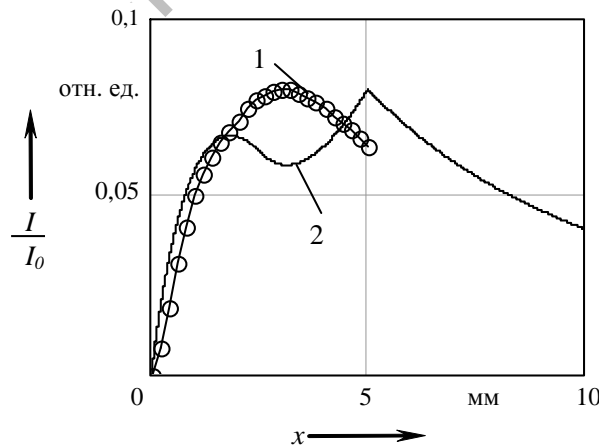


Рис. 6. Зависимости выходного сигнала датчика перемещения на основе двойного жгута при использовании в качестве излучающего внешний кольцевой: 1 – экспериментальная зависимость; 2 – расчетная зависимость

Из рис. 6 видно, что даже при отсутствии поглощающей жидкости максимальное значение сигнала датчика составляет всего порядка 8 % от максимально возможного, а градуировочная характеристика в целом носит нелинейный характер, что свидетельствует о низкой эффективности рассмотренной конструкции датчика.

Были проведены эксперименты с датчиком третьего типа, конструктивно выполненным по второй схеме, за исключением того, что вместо двойного ВОЖ применялся одинарный жгут, играющий роль излучающего и приемного жгута одновременно. Для разделения излучения, подводимого от источника к зеркалу датчика и отраженному от зеркала и направляемому на фотоприемник, применялся светоделительный кубик. Проведенные эксперименты показали, что даже при отсутствии поглощающей жидкости поток излучения, попадающий на фотоприемник от зеркала, сравним с потоком излучения, отраженным от торца волоконно-оптического жгута, в который вводится излучение, поэтому такая конструкция имеет низкую эффективность при использовании ненаправленного излучателя.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для увеличения

чувствительности волоконно-оптических датчиков перемещения разрывного типа с соосным расположением волоконно-оптических жгутов необходимо применять поглощающую жидкость с натуральным показателем поглощения в десятки обратных сантиметров, что позволяет измерять перемещения порядка десятков микрометров, а при использовании датчиков на основе двойных жгутов необходимо в качестве излучающего применять внутренний жгут.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Окиси, Т.** Волоконно-оптические датчики / Т. Окиси, К. Окамото, М. Оцу ; под ред. Т. Окиси. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. **Красюк, Б. А.** Оптические системы связи и световодные датчики. Вопросы технологии / Б. А. Красюк, Г. И. Корнеев. – М. : Радио и связь, 1985. – 192 с.
3. **Бусурин, В. И.** Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
4. **Борисов, В. И.** Волоконно-оптический тензодатчик / В. И. Борисов, Е. М. Силутина, И. В. Шилова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 2. – С. 39–43.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 10.05.2007

**V. I. Borisov, A. P. Matrosov,  
M. S. Taushev, I. V. Shilova**  
**Displacement sensors based  
on fiber-optic plaits**  
Belarusian-Russian University

Three diagrams of fiber-optic displacement sensors based on fiber-optic plaits are offered. They allow to increase sensitivity with the help of light absorbing liquid between the butt ends of fiber plaits and light emitting diodes as a source of radiation without using special device for entering radiation in plaits. A theoretical and experimental analysis of the work of such sensors has been organized.