

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 681.586.5; 681.518.3

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ОПТОВОЛОКОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИНЫ

Ю. Н. Кульчин, Б. С. Ноткин

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
690013, г. Владивосток, ул. Радио, 5
E-mail: boris_notkin@mail.ru*

Разработана распределенная измерительная система напряженно-деформированного состояния пластины и приведены результаты ее исследования. В качестве регистрирующего элемента использовано оптоволокно. Предложена схема его крепления на поверхности деформируемого тела, обеспечивающая решение поставленной задачи при минимальном числе измерений. Теоретические выкладки подтверждены результатами натурных экспериментов.

Ключевые слова: распределенная оптоволоконная измерительная система, мониторинг технического состояния конструкций, измерение деформаций.

Введение. Непрерывное повышение требований надежности, безопасности и эффективности эксплуатации инженерно-технических объектов вводит новые стандарты проектирования современных строительных сооружений, конструкций машин и механизмов. Наряду с улучшением свойств конструкционных материалов и развитием математических средств, позволяющих еще на этапе проектирования конструкции выполнить ее всесторонний анализ, в последнее время в отношении эксплуатации особо ответственных и социально значимых объектов наблюдается тенденция перехода от практики периодических плановых осмотров к непрерывному мониторингу их технического состояния [1]. Для этого диагностируемая конструкция снабжается разветвленной системой измерительных преобразователей (детекторы усилий, деформаций и т. д. [2]), информация от которых в режиме реального времени поступает службам диспетчеризации. Практика показывает, что для получения достоверной картины технического состояния контролируемого объекта может потребоваться размещение большого количества детектирующих устройств, осуществляющих измерения в различных точках конструкции. Это не только само по себе представляет сложность, порождает проблемы доставки и последующей обработки больших объемов информации, но и усложняет монтаж и эксплуатацию таких многоэлементных систем мониторинга.

Решение обозначенной проблемы в первую очередь просматривается в направлении совершенствования методов сбора и доставки информации о состоянии диагностируемой конструкции. Один из перспективных подходов к решению этой задачи связан с применением волоконной оптики [3]. Измерительные преобразователи, построенные на этой элементной базе, не только традиционно отличаются высокой чувствительностью, устойчивостью к электромагнитным помехам и агрессивным воздействиям окружающей среды, но и в состоянии естественным образом сочетать в едином измерительном тракте функции информационного канала и измерительного преобразователя. Последнее, кроме всего прочего, позволяет строить на базе элементов волоконной оптики измерительные преобразователи с интегральной чувствительностью. Одним из сдерживающих факторов развития

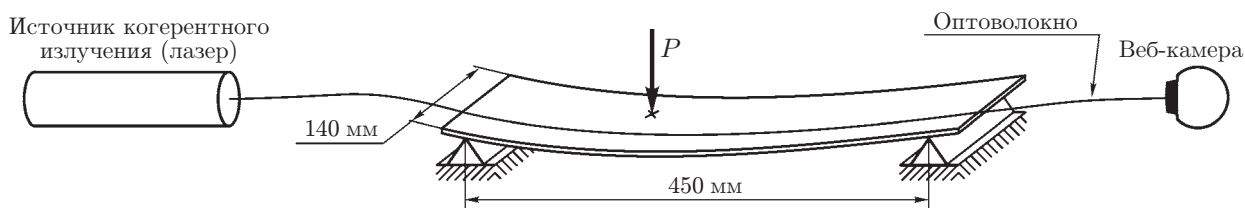


Рис. 1. Схема нагружения объекта диагностики и регистрации его деформации

этой технологии измерения является связанная с ней сложность перехода от общей интегральной картины, регистрируемой по всей длине чувствительной части измерительного преобразователя, к частным воздействиям на него, представляющим интерес в большинстве случаев. Вместе с тем использование таких измерительных преобразователей уже нашло коммерческое применение в некоторых областях (в частности, в области охранных систем [4]) и видится весьма перспективным направлением в развитии систем мониторинга технического состояния сложных конструкций, где к настоящему времени главенствующее положение занимает практика измерений в локальных точках (оценка состояния отдельных элементов конструкции) [5].

Данная работа выполнена в рамках развития и исследования методов использования оптоволоконных измерительных преобразователей с интегральной чувствительностью в системах мониторинга технического состояния конструкций. Анализ и натурные эксперименты выполнены на примере задачи диагностики напряженно-деформированного состояния пластины, находящейся под действием сосредоточенной силы (рис. 1). Для оценки деформационного изменения длины оптоволоконна, жестко закрепленного на поверхности пластины и испытывающего тождественные с ней деформации, в работе используется метод, базирующийся на зависимости коэффициента корреляции случайно-неоднородной спекловой картины многомодовой интерференции от фазовых изменений мод деформируемого световода [6–9]. Регистрация спеклов выполнена с помощью их проекции на светочувствительную матрицу веб-камеры, данные с которой поступают для обработки на персональный компьютер.

Цель предлагаемой работы состоит в выработке такой геометрии крепления оптоволоконна на поверхности деформируемого тела, при которой однозначное определение положения и величины приложенной силы окажется возможным при минимальном числе измерительных каналов.

Поле деформации балки при прямом изгибе. При некоторых видах нагружения пластины во всех ее продольных сечениях возникают близкие деформации, что позволяет рассматривать ее как балку. На рис. 2, *a* представлен результат силового расчета

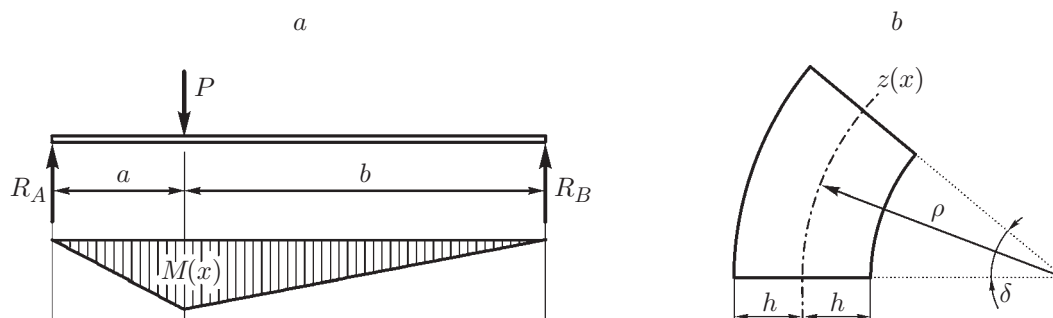


Рис. 2. Расчет напряженно-деформированного состояния конструкции: эпюра изгибающего момента (*a*), схема расчета поверхностной деформации (*b*)

рассматриваемой конструкции, полученный с учетом положений теории сопротивления материалов и этого допущения. Здесь ось x принята совпадающей с осью балки, реакции опор R_A и R_B найдены из условия ее равновесия, а эпюра изгибающего момента $M(x)$ построена методом отсечений.

В соответствии с выбранной методикой измерения регистрации подлежат деформации, возникающие на поверхности балки. Получим их из выражения для определения прогиба балки, связывающего кривизну ее оси $1/\rho$ с изгибающим моментом [10] (рис. 2, б):

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{M(x)}{EJ}, \quad (1)$$

где E и J — модуль упругости и осевой момент инерции соответственно.

Приращение длины поверхности балки вдоль оси x запишем в виде

$$\Delta L = \int \Delta(x) dx. \quad (2)$$

Здесь $\Delta(x)$ — элементарное приращение в сечении x . Величину $\Delta(x)$ получим как отношение длин дуг, взятых на нейтральной оси балки $z(x)$ и ее поверхности (см. рис. 2, б):

$$\Delta(x) = \frac{\delta(\rho(x) \pm h)}{\delta\rho(x)} - 1 = \pm \frac{h}{\rho(x)}, \quad (3)$$

где знак определяется выбором растягивающихся или сжимающихся волокон. Выражая радиус кривизны $\rho(x)$ из (1) и подставляя его в (3), получим

$$\Delta(x) = \pm M(x) \frac{h}{EJ}, \quad (4)$$

описывающее элементарное приращение длины поверхности балки в сечении x . Входящий в выражение (4) множитель h/EJ является константой, а поэтому не оказывает качественного влияния на общий вид картины. Таким образом, характер распределения поля деформации на поверхности балки совпадает с характером распределения изгибающего момента.

Геометрия укладки оптоволоконна как способ регулирования его чувствительности к ориентированным деформациям. Рассмотрим случай, когда регистрирующий элемент расположен под некоторым углом α к оси x . Геометрическая интерпретация этой ситуации представлена на рис. 3. Отрезки AB и AD иллюстрируют длину элементарного участка оптоволоконна до и после деформации Δ . Предполагая равенство катетов BC и DE в образовавшихся треугольниках ABC и ADE , получим фактическое приращение длины оптоволоконна Δ_α на элементарном участке при деформации его поверхности на величину Δ :

$$\Delta_\alpha = AD - AB = \sqrt{(1 + \Delta)^2 + f'(x)^2} - \sqrt{1 + f'(x)^2}, \quad (5)$$

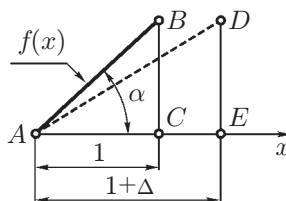


Рис. 3. Деформация оптоволоконна на единичном элементарном участке

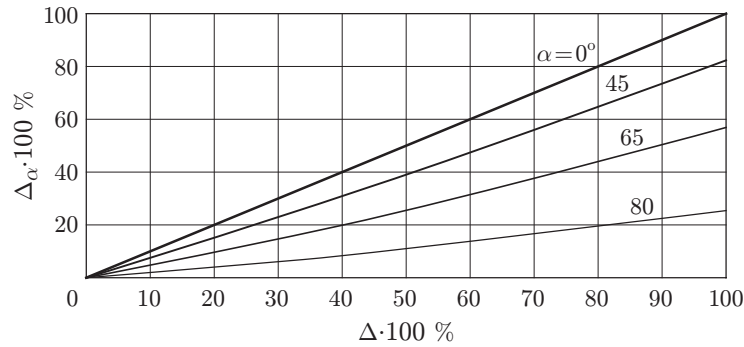


Рис. 4. Зависимости величин Δ и Δ_α для различных α

где $DE = BC = \tan(\alpha)AC = \tan(\alpha) = f'(x)$. На рис. 4 представлены примеры соотношения величин Δ и Δ_α в зависимости от α . Этот рисунок иллюстрирует характер нелинейности преобразования (5) и возможность его линеаризации относительно случая малых деформаций Δ (в большинстве практических задач деформация не превышает единиц процентов). Линеаризация необходима для удобства дальнейших преобразований. Упростим (5), приведя его к виду уравнения касательной в точке начала координат:

$$\Delta_\alpha \approx \Delta \left. \frac{d\Delta_\alpha(\Delta)}{d\Delta} \right|_{\Delta=0} = \frac{\Delta}{\sqrt{1 + f'(x)^2}}. \quad (6)$$

Подставляя (4) в (6) и интегрируя полученный результат на интервале укладки чувствительной части оптоволоконна, получим регистрируемое изменение его длины для случая крепления на поверхности деформируемого тела по произвольной траектории $f(x)$:

$$\Delta L = \pm \frac{h}{EJ} \int_0^l \frac{M(x)}{\sqrt{1 + f'(x)^2}} dx, \quad (7)$$

где $l = a + b$ — расстояние между опорами (см. рис. 2, а). Из (7) следует, что выбор геометрии укладки оптоволоконна открывает возможность регулирования его чувствительности к ориентированным деформациям конструкции.

Общий принцип построения измерительной системы. Первый этап разработки измерительной системы состоит в определении числа параметров, с достаточной точностью описывающих состояние деформированного тела. В качестве этих параметров могут выступать как непосредственно независимые параметры схемы силового нагружения конструкции, так и, например, переменные аналитической формы записи распределения поля деформации. Состояние конструкции будем рассматривать как точку в пространстве этих параметров. Тогда общий принцип построения измерительной системы можно сформулировать как разработку такой схемы укладки оптоволоконна, при которой любая точка пространства возможных состояний конструкции окажется связанной с уникальной точкой пространства фактически измеряемых величин. Известно, что для однозначного перехода из пространства размерностью v в пространство размерностью n необходимо выполнение условия [11]

$$n \geq v. \quad (8)$$

Применительно к рассматриваемому случаю это положение устанавливает, что число измеряемых величин n не может быть меньше числа параметров v , описывающих состояние

конструкции. Далее с учетом цели работы будут исследоваться случаи минимального числа оптоволоконных измерительных линий, т. е. когда $n = v$.

Состояние конструкции на плоскости фактически регистрируемых величин. Рассмотрим двухпараметрическую схему нагружения диагностируемой конструкции, определяемой величиной сосредоточенной силы P и ее положением a вдоль координаты x ($v = 2$), что с учетом ранее изложенного предполагает использование двух измерительных линий ($n = 2$). Положение первой измерительной линии выберем совпадающим с осью x ($f'_1(x) = \text{const} = 0$). Показания с нее (в соответствии с (7) знак опущен) запишем как

$$\Delta L_1 = \frac{h}{EJ} \int_0^l M(x) dx.$$

Измерительная линия с такой ориентацией представляет самостоятельный интерес, поскольку несет информацию о площади эпюры изгибающего момента $M(x)$. В совокупности со знанием характера распределения изгибающего момента (см. рис. 2, а) становится возможным вычисление его максимального значения

$$M_{\max} = \Delta L_1 \frac{2EJ}{hl},$$

играющего важную роль в прочностных расчетах и соответственно представляющего потенциальный интерес в задачах мониторинга. Для получения информации о положении сечения, в котором возник максимальный момент (положение силы P), воспользуемся отношением показаний двух измерительных линий с постоянной и переменной по длине балки чувствительностью к деформации:

$$\begin{aligned} q = \frac{\Delta L_2}{\Delta L_1} &= \left(\frac{h}{EJ} \int \frac{M_{\max} \tilde{M}(x)}{\sqrt{1 + f'_2(x)^2}} dx \right) / \left(\frac{h}{EJ} \int M_{\max} \tilde{M}(x) dx \right) = \\ &= \int \frac{\tilde{M}(x)}{\sqrt{1 + f'_2(x)^2}} dx / \int \tilde{M}(x) dx, \end{aligned} \quad (9)$$

где операция нормирования изгибающего момента $M(x) = M_{\max} \tilde{M}(x)$, $\tilde{M}(x) = \frac{M(x)}{M_{\max}}$, введена для демонстрации инвариантности выражения (9) по отношению к абсолютным значениям $M(x)$. Таким образом, при заданной укладке измерительных элементов, значение переменной q зависит только от положения максимума изгибающего момента, т. е. только от положения приложенной силы.

На рис. 5, а изображены примеры производных траектории крепления оптоволоконна $f'_2(x)$, а на рис. 5, б — соответствующие им графики изменения переменной q в зависимости от положения a приложенной силы относительно опоры пластины (см. рис. 2, а). Из рисунка видно, что величина q принимает более высокие значения тогда, когда максимальная величина изгибающего момента приходится на участки балки с большей чувствительностью (с меньшей производной, т. е. с меньшим углом к оси x) второго регистрирующего элемента (с переменной чувствительностью), и наоборот. Окончательный выбор схемы укладки оптоволоконна представляет собой компромисс между удобством практической реализации, диапазоном изменения величины q и ее линейностью, а также соотношением амплитуд полезного сигнала и шума, где первая по мере увеличения диапазона изменения производной $f'_2(x)$ уменьшается, а вторая, наоборот, возрастает из-за увеличения общей протяженности оптоволоконна.

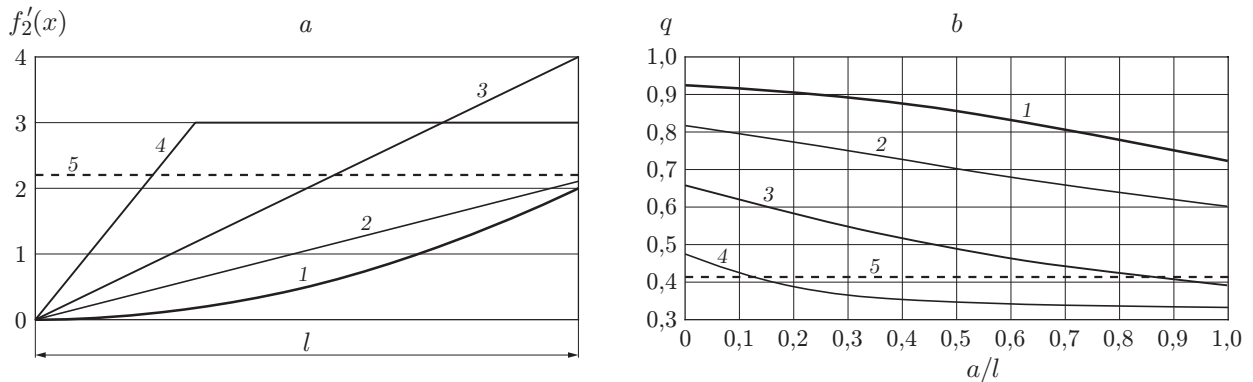


Рис. 5. Выбор траектории укладки оптоволокна: примеры графиков производных траектории укладки по длине l (а), соответствующие им графики изменения переменной q (б)

Фактическая траектория укладки оптоволокна $f(x)$ образуется путем интегрирования функции $f'(x)$. Однако может оказаться, что ограниченные размеры диагностируемой конструкции не позволят реализовать желаемую геометрию укладки. Это не является серьезным препятствием, поскольку из выражения (7) видно, что знак входящей в него производной $f'(x)$ не оказывает влияния на результат, а поэтому при интегрировании его можно скачкообразно изменить на противоположный при достижении краев конструкции, вследствие чего образуется зигзагообразная траектория укладки. Возникшие при этом участки резкого разворота траектории необходимо сгладить, чтобы избежать потерь мощности при прохождении их светом. Таким образом, в качестве траектории укладки регистрирующего элемента с переменной чувствительностью можно принять функцию косинуса (синуса) с линейно изменяющейся частотой, отвечающую вышеизложенным требованиям.

Исследуемая схема крепления оптоволокна и результаты натурных экспериментов представлены на рис. 6. Здесь изображены 16 уникальных состояний конструкции, вызванные различными воздействиями на нее. Для формирования этих воздействий использовались две различные массы, которые поочередно помещались в одно из восьми положений

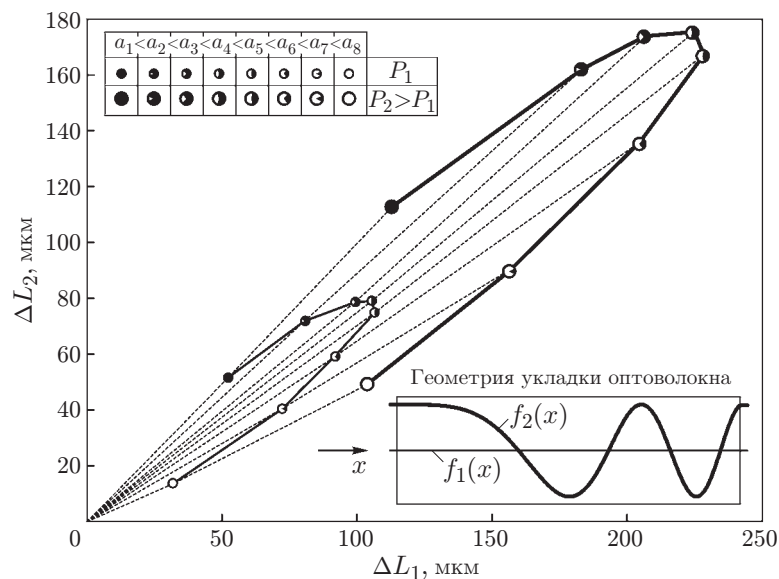


Рис. 6. Состояние конструкции на плоскости регистрируемых величин

a_1, \dots, a_8 на продольной оси пластины, проходящей через ее центр.

Совокупность представленных состояний конструкции образует веерообразную фигуру, построенную на лучах, исходящих из начала координат. Каждый такой луч соответствует своему положению силы a и проходит в системе координат $\Delta L_1 \Delta L_2$ под некоторым углом, величина которого непосредственно связана с ранее введенным параметром q (9). Таким образом, каждое состояние конструкции, определяемое в данном случае двумя параметрами: силой P и ее положением a , оказывается связанным с уникальной точкой на плоскости регистрируемых величин $\Delta L_1 \Delta L_2$.

Состояние конструкции в объеме фактически регистрируемых величин.

Рассмотрим случай трехпараметрической схемы нагружения диагностируемой конструкции. В качестве третьего параметра в исследовании использовалась возможность смещения приложенной силы в направлении, перпендикулярном оси x (обозначим его y). Применение ранее рассмотренной схемы укладки двух измерительных линий ($n = 2$) при наличии третьего элемента в векторе состояния конструкции ($v = 3$) приводит к нарушению условия (8). Это выражается в искажении результирующей картины на плоскости $\Delta L_1 \Delta L_2$, причем характер искажения явно зависит от поперечного положения приложенной силы. Следовательно, геометрию третьей измерительной линии (необходимой в данном случае) достаточно выбрать такой, чтобы снимаемые с нее показания в совокупности с двумя уже существующими приносили информацию о поперечном положении силы.

Из условий закрепления пластины (см. рис. 1) понятно, что смещение положения силы P в направлении y к одному из краев пластины приведет к увеличению прогиба этого края по отношению к другому. Данный очевидный факт избавляет от необходимости полномасштабного теоретического анализа напряженно-деформированного состояния пластины, позволяя сразу предложить решение. Информацию о поперечном положении силы получим как отношение деформаций в двух продольных сечениях, проходящих через центр и один из краев пластины.

Окончательный вид геометрии укладки оптоволокон и результаты натуральных экспериментов представлены на рис. 7. Ракурс выбран так, чтобы отчетливо выделялись три плоскости, в которых расположены все те же веерообразные фигуры. Каждая из этих фигур построена аналогично предыдущему случаю (для упрощения использовалась одна масса)

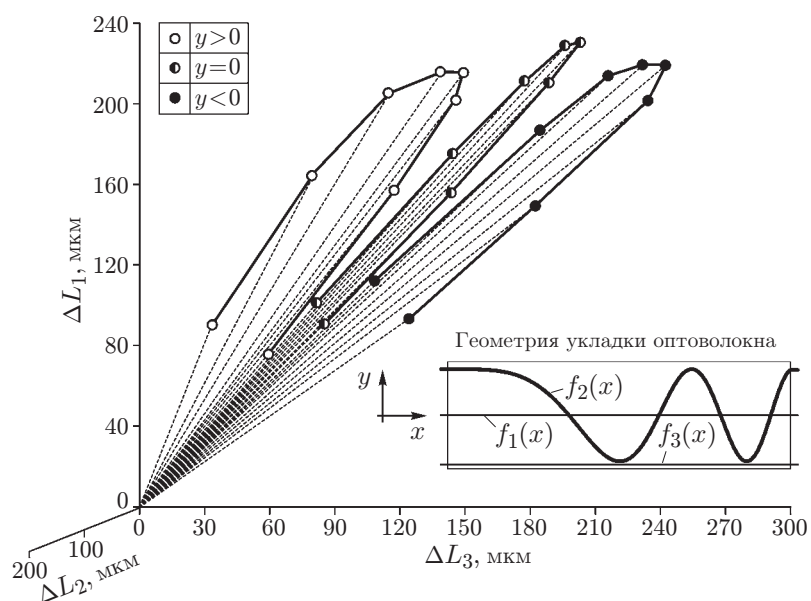


Рис. 7. Состояние конструкции в объеме регистрируемых величин

и соответствует своему положению силы по координате y (рассмотрены центр ($y = 0$) и противоположные края пластины). Из рисунка видно, что каждая из 24 представленных точек пространства состояний конструкции связана с уникальной точкой пространства регистрируемых величин $\Delta L_1 \Delta L_2 \Delta L_3$. Выявление функциональной связи между этими пространствами представляет, безусловно, разрешимую, но все же отдельную задачу, подробное изучение которой выходит за рамки данной работы.

Заключение. В представленной работе предложен подход к синтезу распределенных оптоволоконных измерительных систем, ориентированный на минимизацию числа регистрирующих элементов. Теоретический анализ и натурные эксперименты выполнены на примере диагностики напряженно-деформированного состояния пластины. Исследованы случаи двух- и трехпараметрических схем нагружения. Показано, что число измерительных линий может быть сведено к размерности вектора состояния диагностируемой конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бородин Ю. П., Харебо В. Г.** Система диагностического мониторинга опасных производственных объектов // Контроль. Диагностика. 2003. № 3. С. 28–32.
2. **Гордиенко В. Е., Гордиенко Е. Г.** К выбору методов неразрушающего контроля при техническом диагностировании конструкций зданий и сооружений // Контроль. Диагностика. 2005. № 3. С. 45–47.
3. **Кульчин Ю. Н.** Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2001. 272 с.
4. **Введенский Б.** Волоконно-оптические сенсоры в системах охраны периметра // Мир и безопасность. 2006. № 4. С. 34–42; № 5. С. 9–17.
5. **Поспелов В. И., Неугодников А. П.** Волоконно-оптические датчики и системы мониторинга строительных конструкций: зарубежный и российский опыт // Строительный тендер. 2007. № 29. С. 13–17.
6. **Кульчин Ю. Н., Быковский Ю. А., Обух В. Ф., Смирнов В. Л.** Коррелированная перестройка спеклов в интерферометре на многомодовом световоде // Квантовая электрон. 1990. 17, № 8. С. 561–564.
7. **Кульчин Ю. Н., Витрик О. Б., Максаев О. Г. и др.** Метод электронной корреляционной обработки спекл-картин для выделения полезного сигнала одноволоконных многомодовых интерферометров // ЖТФ. 1996. 66, № 12. С. 137–140.
8. **Kulchin Yu., Vitrik O., Kirichenko O. et al.** Method of single-fiber multimode interferometer speckle-signal processing // Opt. Eng. 1997. 36, N 5. P. 84–87.
9. **Кульчин Ю. Н., Витрик О. Б., Ланцов А. Д.** Корреляционная обработка сигналов одноволоконного многомодового интерферометра в режиме возбуждения малого числа мод при измерениях деформационных воздействий // Квантовая электрон. 2008. 38, № 1. С. 56–58.
10. **Горшков А. Г., Трошин В. Н., Шалашилин В. И.** Сопротивление материалов: Учеб. пособие. М.: Физматлит, 2005. 544 с.
11. **Кострикин А. И., Манин Ю. И.** Линейная алгебра и геометрия: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1986. 304 с.

Поступила в редакцию 20 февраля 2009 г.