

24. Характеристики датчиков малых угловых перемещений, построенных с применением дифракционных оптических элементов

В. А. Комоцкий¹, Ю. М. Соколов¹, Н. В. Суетин¹, Х. П. Уаман²

¹ Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

² Национальный инженерный университет, Лима, Перу

Исследованы датчики малых угловых перемещений и угловых колебаний объектов, которые построены с применением дифракционных оптических элементов (ДОЭ) двух типов: с применением рельефной отражательной дифракционной структуры и с применением системы из двух фазовых дифракционных решёток (ДР), расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Приведены схемы датчиков, расчётные соотношения, результаты экспериментальных исследований рабочих характеристик и оценки чувствительности датчиков. На экспериментальных образцах датчиков чувствительность при регистрации угловых колебаний составила 10^{-5} радиан.

Ключевые слова: Оптика, Дифракционные оптические элементы, Датчики угловых перемещений, рельефные дифракционные структуры.

Цитирование: **Комоцкий, В. А.** Характеристики датчиков малых угловых перемещений, построенных с применением дифракционных оптических элементов / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов, Н. В. Суетин, Х. П. Уаман // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 147–155.

Введение

В работе проведены исследования характеристик датчиков малых угловых колебаний и перемещений. Датчики построены с применением дифракционных оптических элементов (ДОЭ) двух типов: с применением глубокой рельефной отражательной дифракционной структуры и с применением системы из двух фазовых дифракционных решёток (ДР), расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Датчики малых угловых колебаний могут найти применение при физических исследованиях, в составе измерительных геофизических приборов, при построении различных машин.

1. Датчик малых угловых колебаний, построенный с применением рельефной отражающей структуры

В основе работы датчиков этого типа лежат эффекты дифракции при отражении лазерного излучения от глубокой отражающей рельефной периодической структуры (решётки) с прямоугольным профилем рельефа. Типичные значения отношения глубины рельефа h к длине волны оптического излучения λ лежат в диапазоне $h/\lambda = 1 \dots 5$.

Если на такую глубокую рельефную структуру (ГРС) падает пучок излучения лазера и отражается от неё, то в отражённой дифракционной картине мощность излучения в порядках

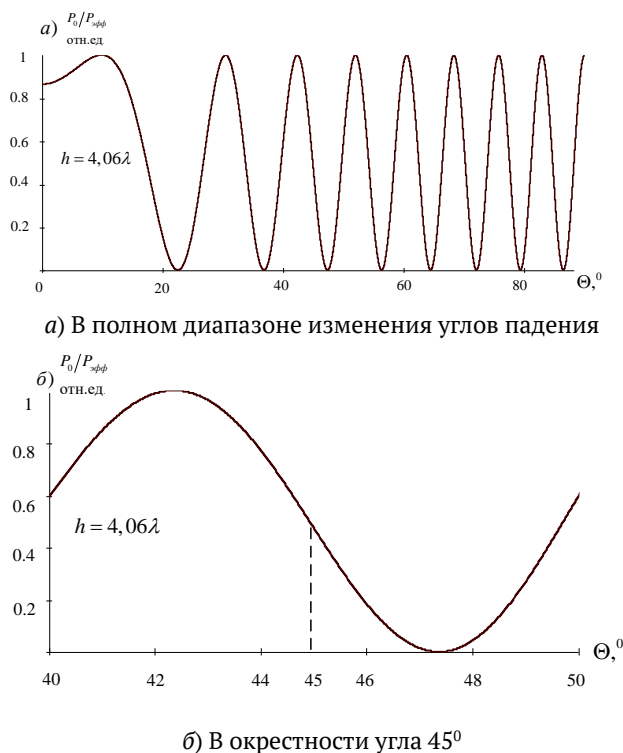


Рис. 1. Зависимость мощности излучения в нулевом порядке дифракции от угла падения для отражающей ГРС с глубиной $h = 4,06\lambda$

дифракции сильно зависит от угла падения Θ излучения лазера на поверхность ГРС. Выражение для мощности в нулевом порядке дифракции от угла падения излучения Θ на ГРС имеет вид

$$P_0 = P_{\text{эфф}} \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} h \cos \Theta\right), \quad (1)$$

где $P_{\text{эфф}} = P_{\text{пад}}R$ — эффективная мощность, $P_{\text{пад}}$ — мощность падающего лазерного излучения, R — коэффициент отражения излучения от поверхности ГРС.

Зависимость мощности отражённого излучения в нулевом порядке дифракции от угла падения излучения на ГРС приведена на рисунке 1 для глубины $h = 4,06\lambda$. Данная глубина соответствует глубине рельефа при проведении одного из экспериментов. Экспериментальные измерения показали очень близкое совпадение расчётных и экспериментальных зависимостей в области углов падения от $\Theta = 0$ до $\Theta = 70^\circ$.

На зависимости $P_0(\Theta)$ существует ряд участков, лежащих в окрестности точек $P_0/P_{\text{эфф}} = 0,5$, на которых зависимость $P_0(\Theta)$ близка к линейной. Выбрав один из таких участков, мы можем преобразовать отклонения и колебания угла Θ в отклонения и колебания мощности излучения в нулевом порядке дифракции. Крутизну преобразования угловых отклонений $\Delta\Theta$ в изменения мощности $S_{\Theta-P} = \partial P_0 / \partial \Theta$, для этих участков можно рассчитать по формуле [1]

$$S_k = (-1)^k P_{\text{эфф}} \frac{2\pi h}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{2k+1}{8} \frac{\lambda}{h}\right)^2}, \quad \text{где } k \geq 0. \quad (2)$$

Табл. 1. Расчётные значения углов падения крутизны преобразования S_k [мВт/радиан] в точках на линейных участках зависимостей $P_0(\Theta)$ при $P_{\text{эфф}} = 1$ мВт

| | | | | |
|-----------------|--|--|--|---|
| $h/\lambda = 1$ | $k = 3$ | $k = 2$ | $k = 1$ | $k = 0$ |
| | $\Theta_3 = 29^\circ$ $S_3 = -3$ | $\Theta_2 = 51,3^\circ$ $S_2 = 4,9$ | $\Theta_1 = 68^\circ$ $S_1 = -5,8$ | $\Theta_0 = 82,8^\circ$ $S_0 = 6,2$ |
| $h/\lambda = 2$ | $k = 7$ | $k = 6$ | $k = 5$ | $k = 4$ |
| | $\Theta_7 = 20,4^\circ$ $S_7 = -4,4$ | $\Theta_6 = 35,7^\circ$ $S_6 = 7,3$ | $\Theta_5 = 46,6^\circ$ $S_5 = -9$ | $\Theta_4 = 55,8^\circ$ $S_4 = 10,4$ |
| $h/\lambda = 4$ | $k = 14$ | $k = 13$ | $k = 12$ | $k = 11$ |
| | $\Theta_{14} = 14,3^\circ$ $S_{14} = -6,05$ | $\Theta_{13} = 25^\circ$ $S_{13} = 9,1$ | $\Theta_{12} = 32,5^\circ$ $S_{12} = -14$ | $\Theta_{11} = 38,6^\circ$ $S_{11} = 15,2$ |

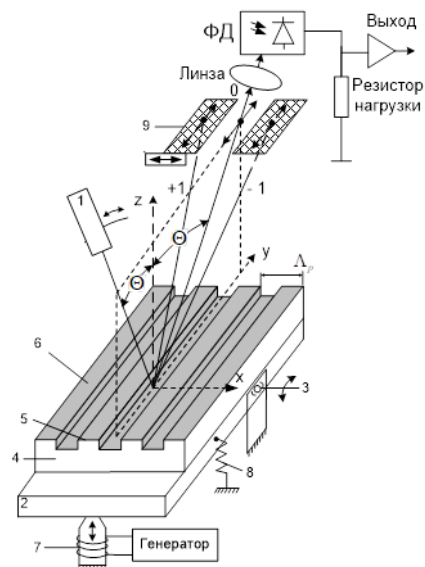
Несколько значений величины крутизны S_k для ДР с глубинами $h = 1\lambda$, $h = 2\lambda$ и $h = 4\lambda$ при мощности излучения $P_{\text{эфф}} = 1$ мВт приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы, крутизна преобразования возрастает при увеличении глубины рельефа, и при вполне реальных значениях величины h/λ она может составлять порядка 10–15 мВт/радиан.

Минимальная пороговая детектируемая величина колебаний ограничивается рядом факторов: собственными шумами схемы фотодетектора, резистора нагрузки и усилителя, шумами, идущими от флуктуаций лазерного излучения, а также низкочастотными флуктуациями, происхождение которых связано с механическими нестабильностями в измерительной схеме. Если расчёт пороговой чувствительности провести только с учётом шумов электронной схемы, то в полосе частот 10 кГц при отношении сигнал/шум, равном 10, расчётная пороговая детектируемая амплитуда составит около $\Delta\Theta = 10^{-6}$ радиана. Реальная пороговая чувствительность при отношении сигнал/шум, равном 10, при тех же параметрах схемы, которая была измерена на экспериментальной установке, составила $\Delta\Theta = 10^{-5}$ радиан. Динамический диапазон датчика определяется длиной линейного участка и как видно из графика на рисунке 1 составляет 1–2°.

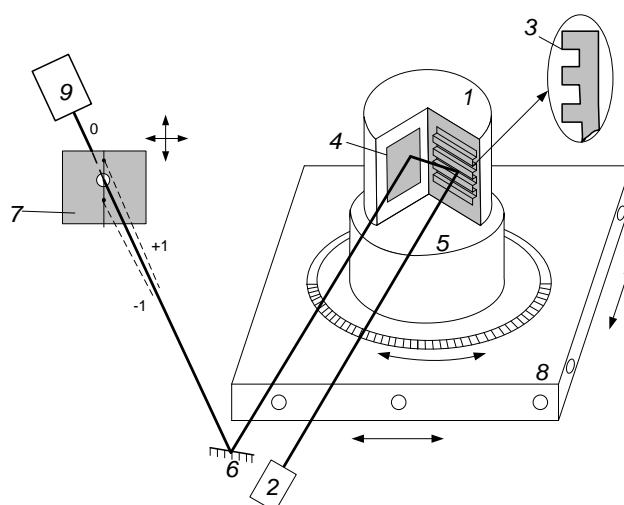
На рисунках 2 и 3 приведены две схемы измерителей вибраций с ГРС. В схеме, представленной на рисунке 2, дифракционная решётка нанесена на тонкую пластинку, которая приклеивается к исследуемой вибрирующей поверхности. Излучение лазера направляется на ГРС, а в отражённом пучке расположены линза, диафрагма, выделяющая пучок нулевого порядка дифракции, и фотодетектор. Недостатком такой схемы является то, что выходной отражённый пучок не сохраняет направление в процессе работы, а отклоняется на угол $2\Delta\Theta$ при отклонении ГРС на угол $\Delta\Theta$. Положительное качество этой схемы состоит в том, что ГРС, расположенная на тонкой пластинке или на плёнке, создаёт минимальную механическую нагрузку на исследуемый объект.

В схеме, изображённой на рисунке 3, ГРС установлена на одной из граней блока уголкового отражателя (БУО), а на второй грани БУО расположено зеркало. Пучок излучения лазера последовательно отражается от ГРС и от зеркала, а из отражённой дифракционной картины



1 – лазер, 2 – вибрирующая поверхность, 3 – ось поворота, 4 – подложка, 5 – ГРС, 6 – зеркальная пленка, 7 – электромеханический или пьезоэлектрический вибратор, 8 – возвратная пружина, 9 – диафрагма

Рис. 2. Блок-схема макета датчика угловых колебаний на основе ГРС



1 – БУО, 2 – лазер, 3 – ДР, 4 и 6 – зеркала, 5 – электромеханический привод, 7 – диафрагма, 8 – регулируемый столик возвратная пружина, 9 – фотодиод

Рис. 3. Блок-схема макета датчика угловых колебаний на основе ГРС с использованием БУО

мы выделяем нулевой порядок дифракции и направляем его на фотодетектор. В схеме с БУО отражённый световой пучок не изменяет направления при повороте БУО. Датчик этого типа предназначен для применения в составе измерительных приборов и установок, например, при конструировании сейсмометров с оптоэлектронными датчиками угловых смещений.

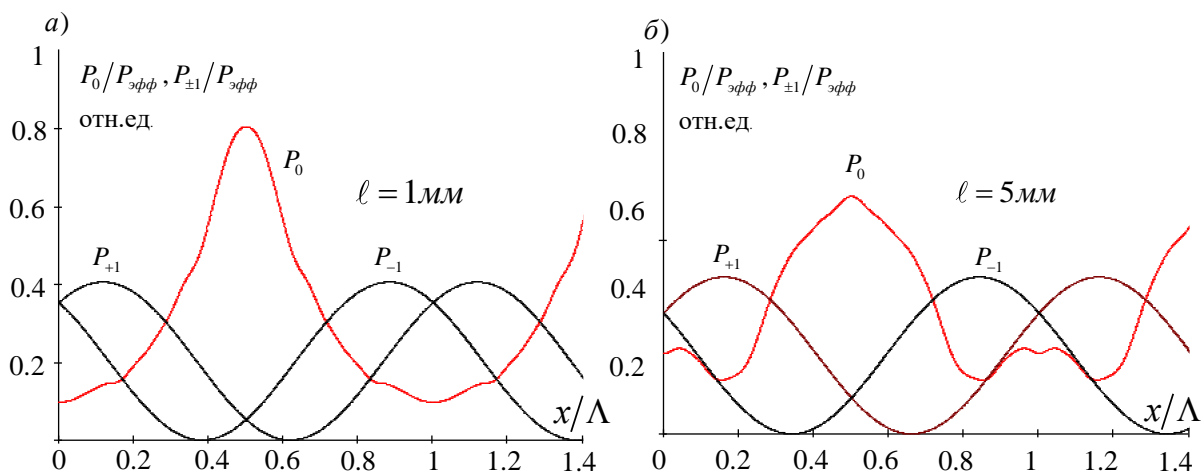


Рис. 4. Зависимости мощности излучения в нулевом и первых порядках дифракции от относительного смещения одной из ДР относительно другой, для ДР с оптимальной глубиной ПФМ, равной: $\Phi_M = \pi/4$, при различных расстояниях между решетками: 1 мм (а) и 5 мм (б)

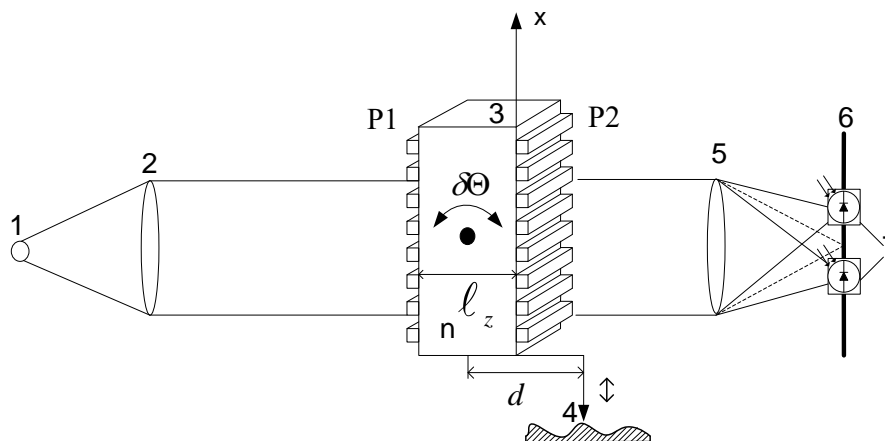
2. Датчики малых угловых перемещений с применением последовательной дифракции излучения лазера на двух тонких фазовых дифракционных решётках (ДР)

В [2] была исследована оптическая схема, в которой пучок лазерного излучения последовательно проходит две тонких фазовых ДР, образованных рельефом на поверхности. Оптимальный рельеф имеет прямоугольный профиль типа «меандр». Оптимальной является глубина рельефа решёток, при которой амплитуда пространственной фазовой модуляции (ПФМ) волнового фронта равна $\Phi_M = \pi/4$. При смещении одной из ДР относительно другой в направлении поперёк штрихов решетки наблюдаются изменения мощности излучения в дифракционных порядках. Наибольший интерес представляют изменения мощности в первых порядках дифракции, так как именно в первых порядках мощность изменяется по гармоническому закону, и эту зависимость при оптимальных параметрах схемы можно выразить формулой

$$P_{\pm 1}(x) = P_{эфф} \left(\frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi^2} \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} x \mp L \right) \right), \quad (3)$$

где x — смещение ДР в направлении поперёк штрихов, Λ — период ДР, $L = \pi \frac{\lambda}{\Lambda^2} \ell_z$ — безразмерный параметр расстояния между ДР, ℓ_z — расстояние между ДР

Выражение для мощности в нулевом порядке дифракции более сложное, содержит бесконечное число гармоник, фазы которых сложным образом зависят от расстояния между решетками. Графики зависимостей мощностей в первых и в нулевом дифракционных порядках от смещения решеток при двух значениях расстояния между решетками приведены на рисунке 4.



P1 и P2 — дифракционные решетки, 1 — полупроводниковый лазер, 2 — коллиматор,
3 — блок решеток, 4 — щуп, 5 — линза, 6 — диафрагма, 7 — фотодетекторы

Рис. 5. Блок-схема датчика малых угловых перемещений с использованием блока решеток

Зависимости мощности в первых дифракционных порядках являются гармоническими функциями при любом расстоянии между ДР. Это свойство важно для конструирования схем датчиков перемещений и колебаний. На графиках можно выделить линейные участки, на которых мощность в одном из первых порядков дифракции пропорциональна смещению одной из решеток относительно другой.

Использование нулевого порядка в качестве выходного пучка датчика перемещений возможно, но нецелесообразно ввиду сложного вида зависимости мощности излучения в нулевом порядке от смещения поперёк штрихов и от расстояния между ДР.

На рисунках 5 и 6 приведены два варианта схем датчиков малых угловых перемещений, построенных с применением плоских фазовых ДР. В первом варианте, изображённом на рисунке 5, основным элементом конструкции датчика является блок решеток — стеклянный параллелепипед с показателем преломления n и длиной l_z , на противоположных гранях которого размещены две рельефные фазовые дифракционные решетки с одинаковым периодом Λ и с профилем в виде меандра. Штрихи решеток параллельны. Блок закреплен на поворотной оси, и его просвечиваем лазерным пучком. Предусмотрена возможность поворота блока решеток для установки начального положения. Выходной пучок — первый порядок дифракции — выделяем с помощью пространственного фильтра и направляем на фотодетектор. Электрический сигнал с выхода фотодетектора поступает на устройство для регистрации электрического сигнала. При повороте блока относительно центральной оси на угол $\delta\Theta$ происходит смещение одной решетки относительно другой на величину $\Delta x = \delta\Theta l_z/n$. В результате поворота блока изменяются мощности первых порядков. Если начальный угол падения соответствует середине линейного участка зависимости $P_1(\Theta)$, то сигнал на выходе фотодетектора будет пропорционален наклону исследуемого объекта.

Датчик наклона с блоком ДР, который изображён на рисунке 5, был использован в конструкции макета профилометра. Чувствительность измерений профиля была 1 нм при работе в полосе частот 100 Гц и отношении сигнал/шум, равном 3 [3].

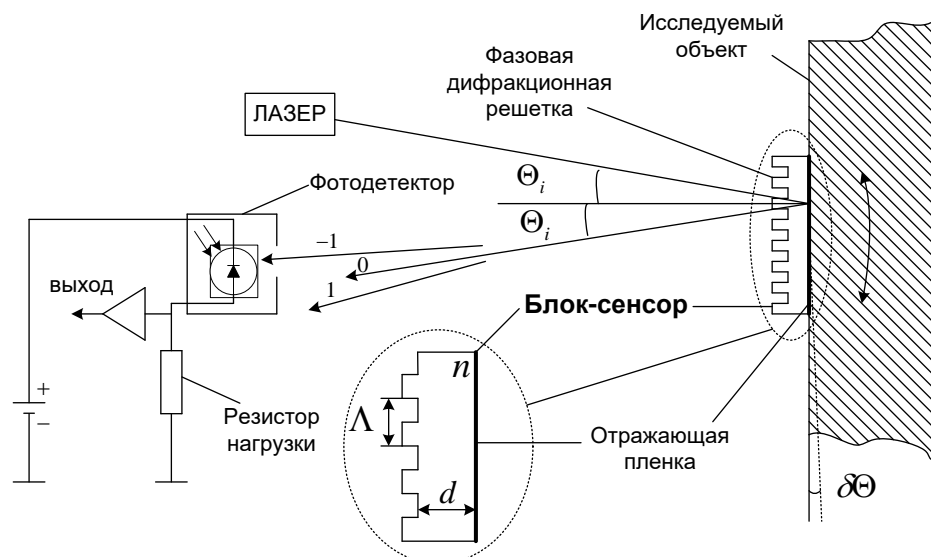


Рис. 6. Блок-схема оптоэлектронного датчика для измерения угловых колебаний с использованием блок-сенсора с зеркальной пленкой

В другом варианте датчика угловых колебаний, схема которого изображена на рисунке 6, основным элементом является прозрачная пластина, на одной стороне которой расположена фазовая дифракционная решетка с прямоугольным профилем, а на другой стороне — зеркальная отражающая пленка алюминия. Пластину закрепляем на исследуемой конструкции и зондируем лазерным пучком, который дифрагирует на фазовой ДР, распространяется в прозрачном материале пластины, отражается от зеркальной пленки и повторно дифрагирует на той же ДР. Один из первых дифракционных порядков выделяем пространственным фильтром и направляем на фотодетектор. С выхода фотодетектора электрический сигнал поступает на схему усиления и обработки сигнала. При наклоне пластины происходит смещение следов падающего и отраженного пучков по поверхности решетки. Связь между относительным смещением этих следов Δx и углом наклона блока-сенсора $\delta\Theta$ можно выразить приближенной формулой $\Delta x \approx 2\delta\Theta d/n$, где d — толщина, а n — показатель преломления материала блока-сенсора. Зависимость мощности излучения в первом дифракционном порядке от угла наклона пластины подобна зависимости, изображенной на рисунке 4. Для измерения малых угловых колебаний используется один из линейных участков зависимости мощности первого порядка дифракции от угла наклона блока-сенсора. Выбор оптимальной рабочей точки достигается настройкой начального угла падения лазерного пучка.

Крутизну преобразования угловых отклонений в изменения мощности первого порядка дифракции на середине линейного участка $S_{\Theta-P} = \delta P/\delta\Theta$ можно рассчитать по формуле [4]

$$S_{\Theta-P} = \frac{8}{\pi} P_{\text{эфф}} \frac{\ell_z}{n\Lambda}. \quad (4)$$

3. Практическое применение датчиков

В качестве примера использования датчика на практике были измерены угловые колебания в разных точках пробной конструкции, схема которой показана на рисунке 7. Металлическая

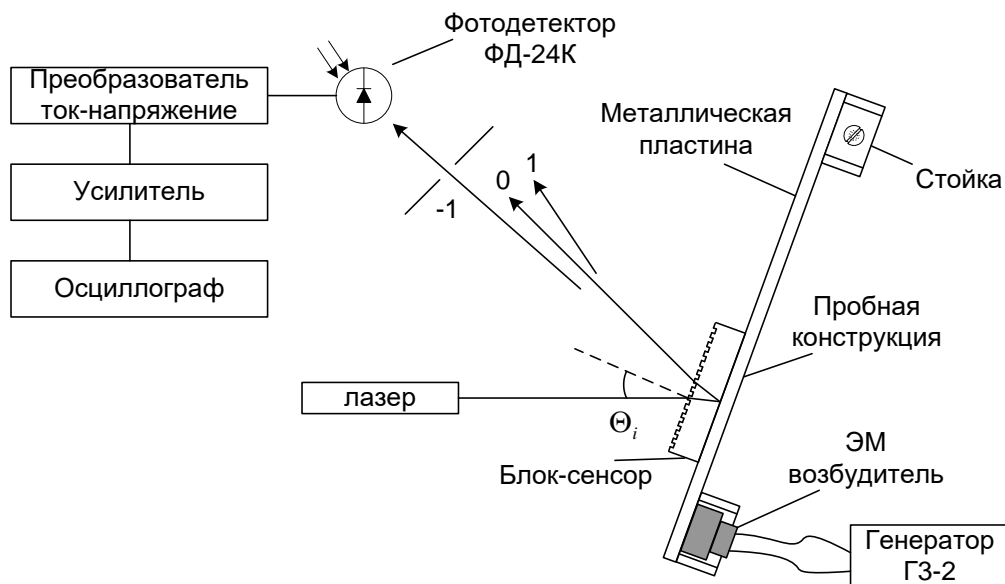


Рис. 7. Схема экспериментальной установки для измерения угловых колебаний пробной конструкции

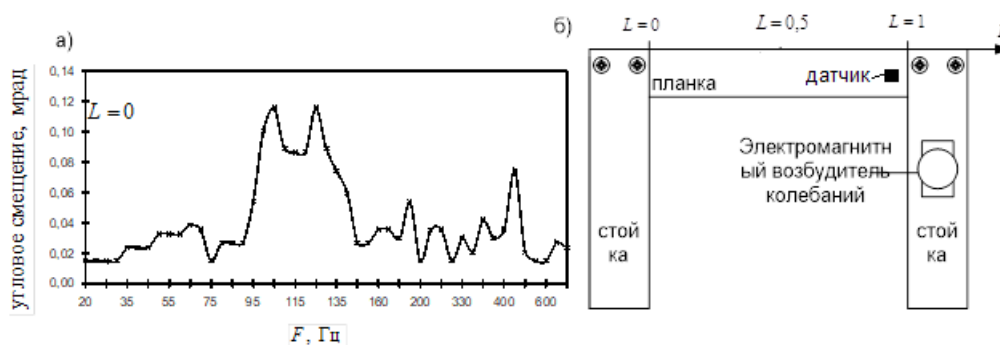


Рис. 8. Зависимость амплитуды угловых колебаний конструкции от частоты внешнего возбуждения (а) и схема расположения датчика на металлической планке (б)

планка сечением 6 мм × 30 мм и длиной 400 мм, была закреплена на двух вертикальных стойках. На одной из стоек устанавливали электромагнитный вибратор, который возбуждал колебания с частотами от $F_1 = 20$ Гц до $F_M = 1$ кГц. Блок-сенсор прикрепляли к металлической планке в разных точках с помощью клейкой ленты. Толщина блока-сенсора составляла $d = 7,5$ мм, его поперечные размеры 10 мм × 10 мм, а период ДР равен $\Lambda = 100$ мкм. На блок — сенсор направляли пучок излучения лазера. Одна из измеренных зависимостей амплитуды угловых колебаний от частоты генератора при положении датчика на краю балки показана на рисунке 8. На зависимости видны резонансные пики на частотах 105 Гц и 125 Гц.

Экспериментально измеренная чувствительность составила 10^{-5} радиан при отношении сигнал / шум = 1 и полосе частот 1 кГц. Область линейности зависимости амплитуды выходного сигнала от углового отклонения равна 10^{-3} при условии, что расчётная ошибка отклонения характеристики от линейной не будет более 3%.

При навешивании дополнительного груза на планку частоты резонансных пиков снижались. Из-за сейсмических колебаний в экспериментальной установке, а также из-за других

неучтённых факторов, измеренный порог чувствительности датчика на два порядка хуже предельного, рассчитанного с учетом только дробовых шумов фототока и собственных шумов усилителя сигнала.

Заключение

Были исследованы четыре схемы оптоэлектронных датчиков малых угловых колебаний с использованием ДОО и лазеров. Конструкции датчиков просты, и не имеют в своём составе дорогих компонентов. В качестве источников излучения могут применяться недорогие полупроводниковые лазеры. Практически реализованная чувствительность детектирования угловых смещений составляет порядка 10^{-5} радиан. Особенность рассмотренных датчиков состоит в том, что они могут регистрировать не только колебания, но также и статические угловые отклонения объекта. Датчики могут быть применены для измерения колебаний крупногабаритных конструкций, размер которых во много раз превышает поперечные размеры датчика, а также могут найти применение при конструировании сейсмометров, при измерении колебаний в физических экспериментах и приборах [3].

Список источников

- [1] **Комоцкий, В. А.** Исследование оптоэлектронного датчика угловых смещений на основе глубокой отражательной фазовой дифракционной решетки / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов, А. Н. Алексеев, Е. В. Басистый // Вестник РУДН. Серия Физика. — 2009. — №4. — С. 95–101.
- [2] **Комоцкий, В. А.** Анализ интенсивностей дифракционных порядков в оптической схеме, содержащей две фазовые дифракционные решетки / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов // Вестник РУДН. Серия Физика. — 2006. — №1. — С. 90–95.
- [3] **Комоцкий, В. А.** Исследование датчика малых линейных перемещений на основе двух фазовых дифракционных решеток / В. А. Комоцкий, В. И. Корольков, Ю. М. Соколов // Автометрия. — 2006. — Том 42. — №6. — С. 105–112.
- [4] **Комоцкий, В. А.** Оптоэлектронный измеритель угловых колебаний конструкций / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов // Вестник РУДН. Серия Математика, информатика, физика. — 2007. — №1. — С. 90–95.
- [5] **Патент 2411620 РФ.** Модулятор лазерного излучения / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов. — Оpubл. 13.08.2009.
- [6] **Патент 80563 РФ.** Оптоэлектронный датчик угловых отклонений и колебаний / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов. — Оpubл. 15.08.2008.
- [7] **Патент 57895 РФ.** Оптоэлектронное устройство для измерения угловых колебаний конструкций / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов. — Оpubл. 23.05.2006.