

УДК 681.7

Оптоэлектронный измеритель угловых колебаний конструкций

В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов

*Кафедра радиофизики
Российский университет дружбы народов
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

Исследовано устройство для измерения угловых колебаний конструкций на основе фазовой дифракционной решетки с профилем в виде меандра. Выполнен теоретический анализ аппаратных характеристик и расчет оптимальных параметров датчика. Изготовлено несколько образцов датчиков с различными параметрами и проведено экспериментальное исследование угловых колебаний пробной конструкции.

Введение

Измерение малых угловых колебаний различных деталей и конструкций представляет практический интерес во многих областях науки и техники. Для этой цели могут использоваться различные варианты датчиков, например, пьезоэлектрические, волоконно-оптические, датчики с зеркальными отражателями. В настоящей работе мы рассмотрим оригинальное устройство измерителя малых угловых колебаний [1], которое дает возможность исследовать их форму, проводить измерение зависимости амплитуды колебаний от координаты расположения блока-сенсора на конструкции и от частоты, выявлять резонансные частоты.

Датчики для измерения угловых колебаний на основе фазовой дифракционной решетки рассматривались ранее в [2], где была исследована схема измерения угловых колебаний с применением дифракционной решетки, отделенной от исследуемой поверхности. К недостаткам этой схемы следует отнести возможность искажений результатов измерений за счет неучтенных вибраций держателя решетки. Новый датчик является более удобным в работе и не требует сложной настройки. По сравнению с предыдущим вариантом датчика в нем уменьшено количество отражающих поверхностей, поэтому снижается уровень помех из-за переотражений оптического пучка. Существенно, что данный датчик чувствителен только к угловым колебаниям поверхности и не реагирует на ее поступательное движение.

1. Устройство и физический принцип работы измерителя

Основным элементом измерителя, схема которого приведена на рис. 1, является блок-сенсор, представляющий собой прозрачную пластину, на одной стороне которой находится фазовая дифракционная решетка с профилем в виде меандра, а на другой стороне — зеркальная отражающая пленка. Блок-сенсор закрепляем на исследуемой конструкции и просвечиваем лазерным пучком. Луч лазера, направленный на блок, дифрагирует на фазовой дифракционной решетке, распространяется в прозрачном материале пластины, отражается от зеркальной пленки и повторно дифрагирует на фазовой решетке. Таким образом, в основе работы устройства лежит двойная дифракция оптического пучка на фазовой дифракционной решетке, имеющей профиль в виде меандра.

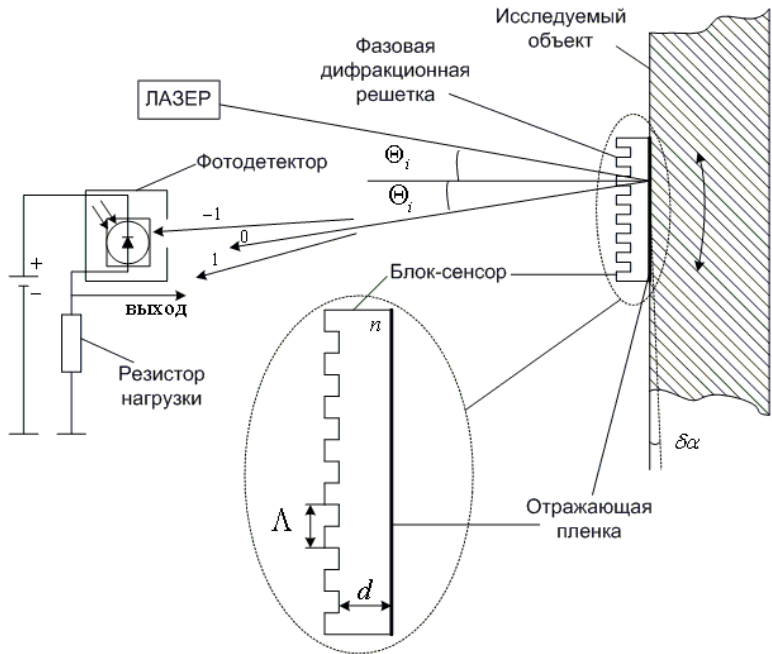


Рис. 1. Схема оптоэлектронного устройства для измерения угловых колебаний конструкций.

При наклоне блока-сенсора, закрепленного на конструкции, на небольшой угол $\delta\alpha$ происходит смещение следов падающего и отраженного пучков по поверхности решетки. Если заменить отраженный луч зеркально симметричным, то анализ взаимодействия оптического пучка с блоком-сенсором можно заменить анализом эквивалентной схемы из двух решеток, находящихся на расстоянии, равном удвоенной толщине блока-сенсора $2d$. Ранее в работе [3] был проведен теоретический анализ системы из двух фазовых решеток при просвечивании ее лазерным пучком, поэтому все теоретические результаты, полученные в [3], могут быть использованы также при анализе данного датчика.

При прохождении плоского волнового фронта с длиной волны λ через фазовую дифракционную решетку образуется пространственная фазовая модуляция (ПФМ) с амплитудой Φ_M , которая равна половине разности фаз между лучами, проходящими через выступ и впадину решетки (рис. 2). При падении светового пучка по нормали к поверхности решетки выражение для амплитуды Φ_M имеет вид

$$\Phi_M = \frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\lambda} h(n - 1). \tag{1}$$

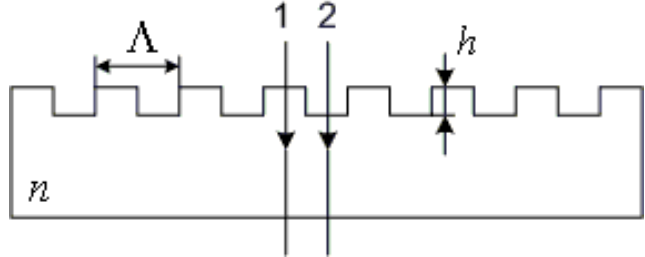


Рис. 2. Прохождение оптического излучения через выступ и впадину дифракционной решетки.

В [3] было показано, что для решеток с профилем в виде идеального меандра зависимости интенсивностей первых дифракционных порядков от смещения следа оптического пучка вдоль решетки описываются гармоническими функциями вида

$$I_{\pm 1}(\Delta x) = 2a_0^2 a_1^2 + 2a_0^2 a_1^2 \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} \Delta x \mp L\right). \quad (2)$$

Выражение (2) записано для нормального падения луча. В нем $a_0 = \cos(\Phi_M)$ и $a_1 = \frac{2}{\pi} \cos(\Phi_M)$ — коэффициенты разложения в ряд Фурье функции пропускания фазовой решетки с формой меандра, величина $L = 2d\pi \frac{\lambda}{n\Lambda^2}$ — безразмерный параметр расстояния, соответствующий датчику на рис. 1. Для упрощения анализа в (2) коэффициент отражающей пленки R и интенсивность падающей волны $I_{\text{пад}}$ приняты равными единицам.

Второе слагаемое выражения (2) представляет собой переменную составляющую зависимости $I_{\pm 1}(\Delta x)$, амплитуда которой равна $I_{\pm 1}^{\approx} = 2a_0^2 a_1^2 = \frac{2}{\pi^2} \sin^2(2\Phi_M)$. Максимальное значение этого слагаемого достигается при $\Phi_M = \frac{\pi}{4}$. Это значение Φ_M и соответствующее ему значение физической глубины рельефа h являются оптимальными, так как при этом достигается максимальное значение крутизны линейного участка этой зависимости. Выражение (2) при $\Phi_M^{\text{opt}} = \frac{\pi}{4}$ принимает вид

$$I_{\pm 1}(\Delta x) = \frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi^2} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} \Delta x \mp L\right). \quad (3)$$

Приведем численную оценку оптимальной глубины рельефа. При значениях $\Phi_M^{\text{opt}} = \frac{\pi}{4}$, $\lambda = 0,65$ мкм, $n = 1,51$ (стекло) оптимальная глубина рельефа равна $h = 0,319$ мкм.

В формуле (3) смещение Δx следа оптического пучка вдоль решетки пропорционально углу наклона $\delta\alpha$, поэтому зависимости интенсивностей первых порядков от угла наклона блока-сенсора также будут описываться гармоническими функциями. Связь между Δx и $\delta\alpha$ найдем с помощью рис. 3, на котором показан вид блока-сенсора при наклоне на небольшой угол (*а*) и эквивалентная схема для анализа (*б*).

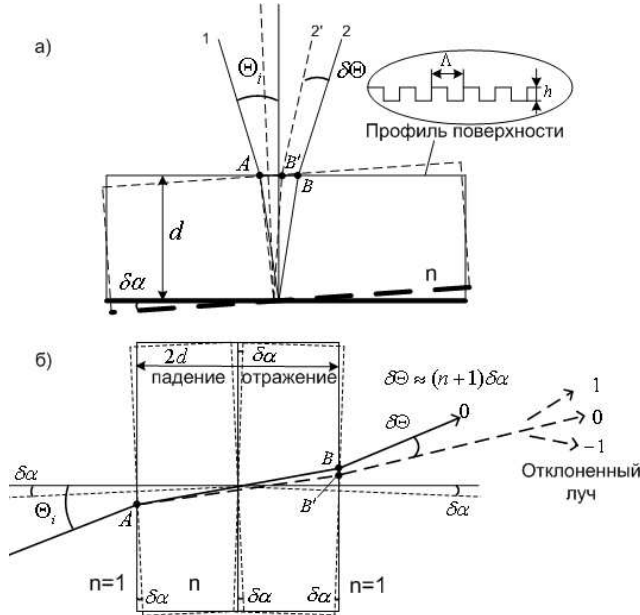


Рис. 3. Схема блока-сенсора при наклонном падении пучка (*а*). Эквивалентная схема из двух решеток в среде с показателем преломления n (*б*).

Линейное смещение Δx определится как разница расстояний между следами падающего и отраженного пучков до и после наклона датчика на угол $\delta\alpha$ с учетом преломления на границах разделов двух сред:

$$\Delta x = AB - AB' = 2d \left\{ \tan\left(\frac{\Theta_i}{n}\right) - \tan\left(\frac{\Theta_i - \delta\alpha}{n}\right) \right\} \approx 2d \frac{\delta\alpha}{n}. \tag{4}$$

Соотношение (4) справедливо для малых углов Θ_i и $\delta\alpha$.

Используя последнее выражение (4), связывающее смещение следа оптического пучка Δx с наклоном блока-сенсора на малый угол $\delta\alpha$, получим выражения для зависимостей интенсивностей первых дифракционных порядков от угла наклона блока

$$I_{\pm 1}(\delta\alpha) = \frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi^2} \cos\left(\frac{4\pi d}{n\Lambda} \Delta x \mp L\right). \tag{5}$$

Дифференцируя выражение (5), определим максимальное значение крутизны преобразования изменения интенсивности при изменении угла наклона блока-сенсора

$$S_{I\alpha \max} = \left| \frac{dI_{\pm 1}}{d(\delta\alpha)} \right|_{\max} = \frac{8d}{\pi n\Lambda}. \tag{6}$$

Для регистрации и измерения малых угловых колебаний используется один из множества линейных участков гармонической зависимости интенсивности одного из первых дифракционных порядков от угла наклона блока-сенсора $I_{\pm 1}(\delta\alpha)$ или в других терминах от эквивалентного смещения следа пучка $I_{\pm 1}(\Delta x)$. Зависимость от эквивалентного смещения следа пучка показана на рис. 4. Для работы устройства требуется обеспечить расположение рабочей точки на середине линейного участка. Это достигается выбором начального угла падения.



Рис. 4. Зависимость интенсивности первого дифракционного порядка от относительного смещения решеток. Рабочая точка находится на середине линейного участка.

Расчет начальных углов падения оптического пучка. Обозначим через Θ_{ik} углы падения, соответствующие положению рабочей точки на середине линейного участка зависимости $I_{\pm 1}(\Delta x)$. Расчет Θ_{ik} можно провести с помощью формулы (5), заменив угол $\delta\alpha$ углом Θ_{ik} и приравняв аргумент косинуса величине $\frac{\pi}{2} + \pi k$. В результате получим выражение для расчета Θ_{ik}

$$\Theta_{ik} = \frac{n\Lambda}{8d}(1 + 2k), \quad k = 0, 1, 2, \dots \tag{7}$$

На практике угол падения определялся в ходе калибровки, методика которой описана ниже.

2. Результаты экспериментальных исследований

Для проведения экспериментов были изготовлены образцы блоков-сенсоров с различными параметрами, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1
Параметры используемых в экспериментах блоков-сенсоров

датчик 1	датчик 2	датчик 3	датчик 4
$\Lambda = 100 \text{ мкм}$	$\Lambda = 200 \text{ мкм}$	$\Lambda = 100 \text{ мкм}$	$\Lambda = 200 \text{ мкм}$
$d = 7,5 \text{ мм}$	$d = 11,2 \text{ мм}$	$d = 1,5 \text{ мм}$	$d = 7,2 \text{ мм}$
$\Phi_M = 22^\circ$	$\Phi_M = 40^\circ$	$\Phi_M = 38^\circ$	$\Phi_M = 40^\circ$

Измерение статических характеристик и калибровка датчиков. После изготовления блоков-сенсоров проводилось измерение статических характеристик и калибровка датчиков. Схема измерений приведена на рис. 5.

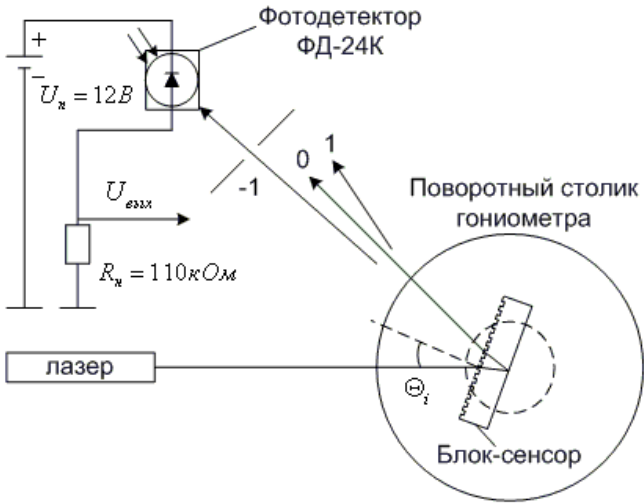


Рис. 5. Схема измерения статических характеристик и калибровки датчика.

При измерении статических характеристик блок-сенсор помещали на поворотный столик гониометра так, чтобы штрихи решетки были параллельны оси вращения столика. После этого выставляли некоторый небольшой начальный угол падения пучка и, поворачивая столик на угол $\delta\alpha$, проводили измерение величин выходных напряжений на нагрузках фотодетекторов первых порядках дифракции. Результаты измерений для датчика 1 приведены на рис. 6а. Измерения проводились с шагом $\delta\alpha = 1'$, начальный угол падения был равен $\Theta_i = 4^\circ$. На рис. 6б показаны расчетные зависимости интенсивностей первых дифракционных порядков от угла поворота для датчика 1 (толщина $d = 7.5 \text{ мм}$). Из сравнения рис. 6а и 6б видно, что экспериментальные и теоретические зависимости датчика 1 хорошо согласуются между собой.

Одновременно с измерением статических характеристик проводилась калибровка датчиков. Калибровка датчика включала следующие операции:

а) определение угла падения Θ_i , соответствующего положению рабочей точки на середине одного из множества линейных участков гармонической зависимости мощности первого дифракционного порядка от угла поворота датчика,

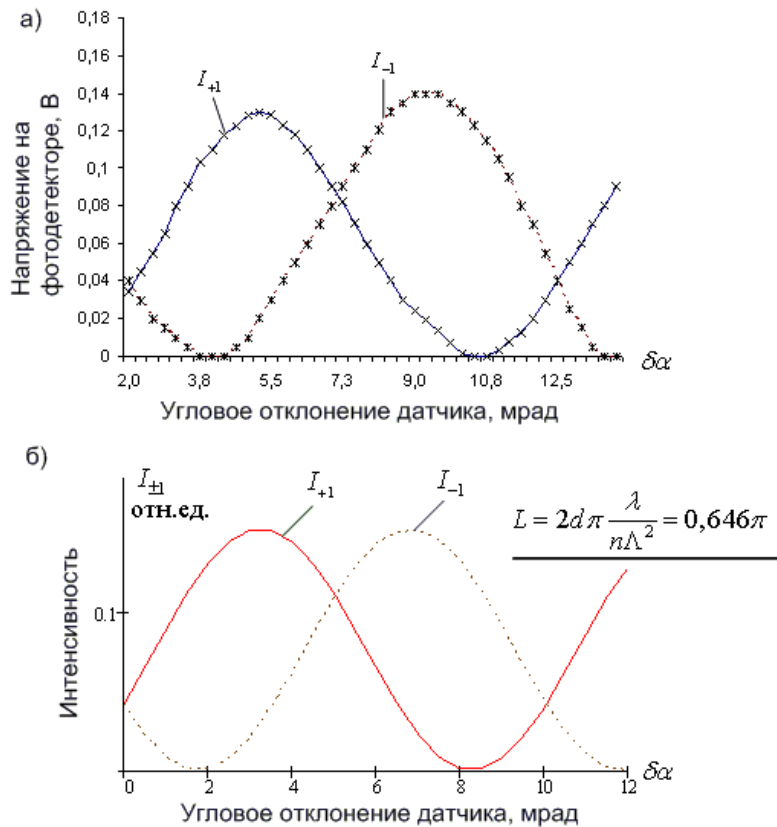


Рис. 6. Экспериментальные (а) и расчетные (б) статические характеристики первых дифракционных порядков для датчика 1.

б) определение крутизны преобразования $S_{U\alpha}$ изменения выходного сигнала ΔU при изменении угла поворота датчика.

Начальный угол падения пучка Θ_i выбирался таким, чтобы мощность дифрагированного пучка первого порядка была равна средней величине между ее максимальным и минимальным значениями. Поскольку ток и напряжение на нагрузке фотодетектора пропорциональны мощности падающего излучения, то на практике установка рабочей точки осуществлялась по уровню постоянного напряжения на выходе схемы, которое должно быть равно

$$U_{cp} = \frac{U_{max} + U_{min}}{2}, \tag{8}$$

где U_{max} и U_{min} — максимальное и минимальное значение напряжения выходного сигнала.

После установки рабочей точки на середину линейного участка производили калибровку крутизны преобразования. Для этого, давая малые приращения поворота блока-сенсора $\pm \delta\alpha$, измеряли приращения $\pm \Delta U$, а затем рассчитывали крутизну преобразования для данного блока-сенсора $S_{U\alpha} = \frac{\Delta U}{\delta\alpha}$. Для датчика 1 измеренное значение крутизны составило $S_{U\alpha} = 0,675$ В/мрад.

Результаты измерений колебаний конструкции. В качестве наглядного примера использования датчика на практике были измерены угловые колебания эталонной конструкции, которая представляла собой металлическую планку, закрепленную на двух вертикальных стойках. На одной из стоек устанавливали электромагнитный возбудитель, который возбуждал в пластине колебания с частотой от $F = 20$ Гц до $F = 1$ кГц. В качестве внешнего источника колебаний использовали генератор низких частот ГЗ-2. Схема экспериментальной установки показана на рис. 7.

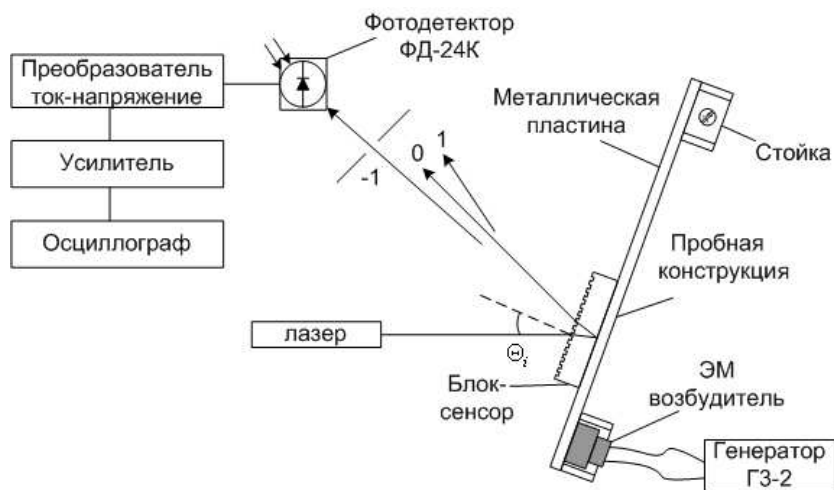


Рис. 7. Схема экспериментальной установки для измерения угловых колебаний эталонной конструкции.

При проведении эксперимента блок-сенсор приклеивали к металлической планке в различных точках. Угол падения, соответствующий середине линейного участка, определяли в процессе калибровки. Под этим углом на датчик направляли лазерный пучок. В образованной дифракционной картине выделяли один из первых порядков и направляли его на фотодетектор. После усиления сигнал с выхода фотодетектора поступал на осциллограф. Зная крутизну преобразования $S_{U\alpha}$, определенную при калибровке датчика и измерив амплитуду выходного сигнала, рассчитывали величину амплитуды угловых колебаний металлической конструкции $\Delta\alpha = \frac{\Delta U}{S_{U\alpha}}$. Изменяя частоту возбуждения и положение блока-сенсора на конструкции, измеряли частотные зависимости амплитуды угловых колебаний планки в различных ее точках. Результаты экспериментов, проведенных с применением датчика 1, показаны на рис. 8а, 8б, 8в. Из графиков на рис. 8 можно легко определить резонансные частоты колебаний. Так, на всех графиках хорошо проявляется резонансная область колебаний в районе $F = 95\text{--}120$ Гц.

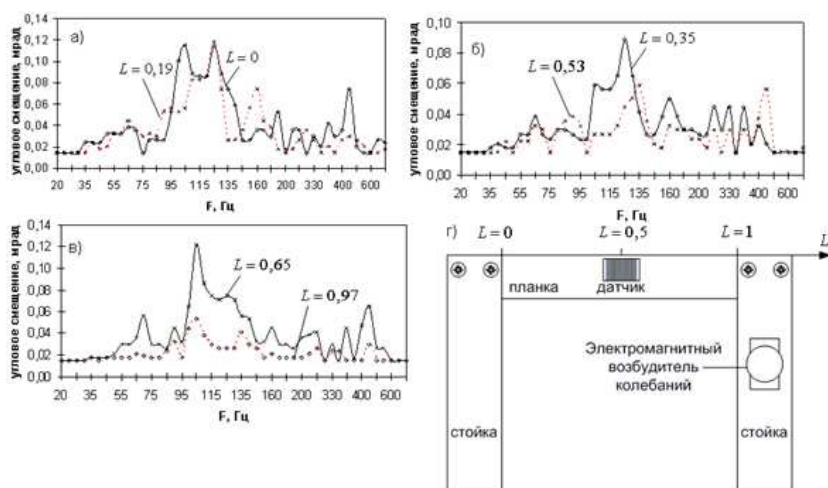


Рис. 8. Зависимости амплитуд угловых колебаний от частоты внешнего возбуждения при разных положениях датчика на конструкции: (а, б, в). Схема расположения датчика в различных точках на металлической планке показана на рисунке (г).

Так как датчик имеет небольшие размеры, то его легко перемещать вдоль конструкции. Таким образом было измерено распределение колебаний в различных точках конструкции на фиксированных частотах. Результаты измерений показаны на рис. 9 для четырех значений частот: $F = 105$ Гц, $F = 125$ Гц, $F = 160$ Гц и $F = 300$ Гц.

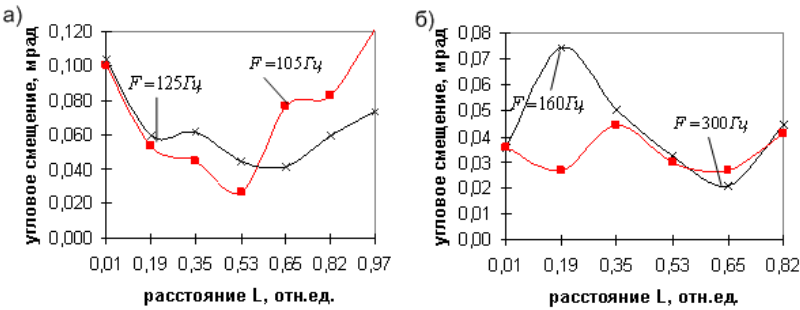


Рис. 9. Зависимости амплитуд угловых колебаний при разных положениях датчика на конструкции на фиксированных частотах (а, б).

В дополнение к проведенным исследованиям был выполнен специальный эксперимент по измерению колебаний конструкции с увеличенной массой. В этом эксперименте на конструкцию прикрепляли дополнительный груз, как это показано на рис. 10б, и проводили измерения частотных зависимостей амплитуды колебаний конструкции с грузом. Результаты этих измерений показаны на рис. 10а. Из сравнения двух экспериментальных кривых, соответствующих различным массам колеблющихся конструкций, видно, что при увеличении массы конструкции происходит уменьшение резонансных частот. Этот факт хорошо согласуется с теорией.

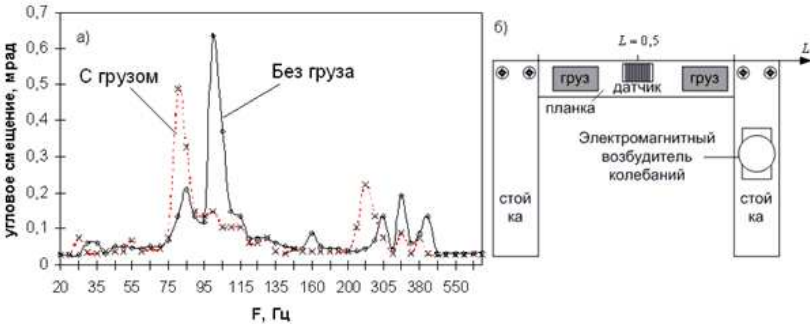


Рис. 10. Зависимости амплитуд угловых колебаний от частоты внешнего возбуждения при разных массах конструкций.

Заключение

Предложенный в настоящей работе датчик дает возможность проводить измерения зависимостей амплитуды колебаний от частоты, выявлять резонансные частоты, исследовать зависимость амплитуды колебаний от координаты расположения датчика на конструкции, а также исследовать форму колебаний. Он может быть использован на практике для исследования низкочастотных колебаний крупногабаритных конструкций. Отличительной чертой измерителя является то, что он способен регистрировать колебания с очень низкими частотами, вплоть до нулевых частот.

Технология изготовления датчика и методика проведения эксперимента достаточно просты. Экспериментально измеренная пороговая чувствительность датчика составила величину порядка сотых долей миллирадиана при полосе канала регистрации от 0 Гц до 1000 Гц.

Датчик нечувствителен к поступательным колебаниям конструкций и случайным вибрациям фотодетектора и позволяет получать результаты, выраженные в абсолютных единицах углов, а не в относительных единицах.

Литература

1. *Комоцкий В. А., Соколов Ю. М.* Оптоэлектронное устройство для измерения угловых колебаний конструкций. — Патент на полезную модель (приоритет от 23.05.2006 по заявке № 2006117556).
2. *Комоцкий В. А., Никулин В. Ф.* Бесконтактный дифракционный метод измерения угловых смещений и вибраций отражающих поверхностей // *Оптика и спектроскопия*. — Т. 72, № 2. — 1992. — С. 479–486.
3. *Ниибизи А., Комоцкий В. А.* Теоретический анализ взаимодействия оптической волны с системой пространственно разделенных периодических решеток // *ВИНИТИ* № 661-B86. — 1985.

UDC 681.7

Optoelectronic Device for Measurements Angular Oscillations of Constructions

V. A. Komotskii, Yu. M. Sokolov

*Department of Radiophysics
Peoples' Friendship University of Russia
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia*

New optoelectronic device for measurements angular displacements of constructions based on phase diffraction grating with square waveform is investigated. Theoretical calculation and optimization of characteristics are executed. Some samples of transducers are manufactured, and experimental investigation of angular oscillations of standard construction is executed.