

УДК 53.082.54

Бесконтактный интерферометрический измеритель вибраций на основе волоконной оптики^{*}

И.С. ГЛЕБУС¹, С.Н. МАКАРОВ², Ю.В. ЧУГУЙ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: ilya-neo@ya.ru

² 630058, РФ, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, старший научный сотрудник. E-mail: makarov@tdisie.nsc.ru

³ 630058, РФ, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, доктор технических наук, профессор. E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Представлены результаты работ по возможности создания измерителя вибраций на современной элементной базе. Описывается интерферометрический метод определения смещения поверхности для случаев фиксированного направления движения объекта. Основой метода является использование интерферометрической схемы, чувствительной к расстоянию до объекта, на основе интерферометра Майкельсона. Приводится квадратурный интерферометрический сигнал, получаемый при помощи модуляции тока накачки лазера и последующей фильтрацией сигнала, получаемого на фотоприемнике. Рассмотрен случай использования квадратурного сигнала при тональных вибрациях объекта. В результате проведения измерений и обработки полученных данных восстановлены сигналы смещения поверхности исследуемого объекта для режима вибраций с заданной частотой и амплитудой. Частота колебаний поверхности соответствует частоте сигнала генератора (30 Гц), амплитуда в исследуемой точке оказалась равной $4 \pm 0,05$ мкм. В режиме отсутствия подачи сигнала на объект определена амплитуда случайных смещений, которая составила 0,3 мкм. Выявлено, что макет измерителя вибраций на основе оптоволоконных компонент может регистрировать квадратурный интерферометрический сигнал и восстанавливать смещение поверхности вибрирующих объектов. Сделан вывод о перспективности дальнейшего исследования макета, улучшения его точностных характеристик и доведения до экспериментального образца.

Ключевые слова: вибрация, измеритель вибраций, интерферометр Майкельсона, интерферометрический сигнал, модуляция тока накачки, квадратурный сигнал, диффузор, смещение поверхности

DOI: 10.17212/1814-1196-2014-4-49-58

ВВЕДЕНИЕ

Измерение и контроль вибраций необходимы во многих областях промышленности [1, 2]: в микроэлектронике, машиностроении, энергетике, авиастроении, на железнодорожном транспорте и т. д.

Для того чтобы удовлетворять основным современным требованиям измерений вибраций, устройства должны обеспечивать бесконтактный способ, высокое разрешение измерений смещения поверхности (10...100 нм), большое рабочее расстояние до объекта (вынос на несколько метров), возможность работы с высокочастотными вибрациями поверхности объекта ($10^3 \dots 10^4$ Гц).

Потенциально всем этим требованиям удовлетворяют оптические методы измерений. Разработка подобного рода приборов и устройств находится на острие современных технологий, однако ведущие специалисты и исследователи, как правило, не публикуют подробности схем, алгоритмов и методов своих разработок. Кроме того, зарубежные экземпляры [3, 4] за-

^{*} Статья получена 17 июля 2014 г.

частую имеют высокую стоимость. Современная элементная база волоконно-оптических компонент, применяемых в телекоммуникационной области, предоставляет выбор относительно дешевых и надежных элементов [5], позволяющих конфигурировать когерентную оптическую схему измерителя вибраций из унифицированных блоков.

Цель работы заключается в исследовании возможности создания измерителя вибраций [6], а именно ее амплитуды, на основе волоконно-оптической схемы интерферометра Майкельсона, в проверке работоспособности макета измерителя и исследовании его характеристик. Одним из ключевых преимуществ волоконно-оптических компонент является то, что при правильно собранной оптической схеме не требуется дополнительной настройки и юстировки.

1. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИЙ

Основой данного метода является использование схемы интерферометра Майкельсона [7], чувствительной к расстоянию до объекта.

Результирующая интенсивность сигнала на фотоприемнике интерферометра описывается следующим выражением:

$$I(L) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi),$$

где

$$\Delta\varphi = 2kL \quad (1)$$

– сдвиг фазы между опорным пучком света с интенсивностью I_1 и сигнальным пучком света с интенсивностью I_2 .

Чтобы определить смещение объекта, необходимо считать периоды функции, например, путем нахождения точек пересечения сигнала фотоприемника с уровнем его среднего значения, которые можно получить при длительном усреднении сигнала:

$$I(L) = \langle I(L) \rangle = I_1 + I_2.$$

Для точек пересечения интерферометрического сигнала с его средним имеем следующее уравнение:

$$2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos(\Delta\varphi) = 0 \quad \text{или} \quad \Delta\varphi = \frac{\pi}{2} + m\pi, \quad (2)$$

где m – целое число.

Это означает, что если в разные моменты времени мы обнаружили два последовательных пересечения, когда $I(L_1) = I(L_2) = I_1 + I_2$, то разность фаз сигналов в эти два соседних момента времени пропорциональна смещению объекта ΔL :

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = 2k\Delta L. \quad (3)$$

Более того, в связи с периодичностью (2) можно сказать, что

$$\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = \pm\pi. \quad (4)$$

Используя (3) и (4), нетрудно получить следующее выражение:

$$\Delta L = \pm \frac{\lambda}{4},$$

где знак определяет направление смещения.

Если при наблюдении интерференции используется только пересечение функции с ее средним значением, то при перемещении объекта на расстояние, значительно превышающее период интерферометрической функции $\lambda/2$, и при фиксированном направлении смещения

модуль смещения между двумя положениями L_1 и L_2 поверхности объекта может быть вычислен следующим образом:

$$|L_2 - L_1| = \Delta L = p \frac{\lambda}{4},$$

где p – число зафиксированных пересечений функции с ее средним значением.

2. КВАДРАТУРНЫЙ СИГНАЛ В СХЕМЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ ВИБРАЦИЙ

Вышеописанные формулы применимы в случае, когда поверхность объекта движется только в одну сторону.

В общем случае расстояние от поверхности объекта до измерителя вибраций может как сокращаться, так и увеличиваться, что приводит к знакопеременному смещению и делает невозможным его правильное определение только по интерферометрическому сигналу, определяемому из (1):

$$x(L) \sim \cos(2kL).$$

Чтобы восстановить направление смещения поверхности, требуется квадратурное дополнение [8] интерферометрического сигнала вида

$$y(L) \sim \sin(2kL).$$

Эта проблема может быть решена путем использования лазеров с перестраиваемой длиной волны. Например, в качестве них могут быть применены лазеры с распределенной обратной связью (DFB лазеры) [9], частотная модуляция излучения которых может осуществляться при помощи тока накачки, например, следующим образом:

$$I(t) = I_0 + \Delta I(t) = I_0 (1 + \mu_I \cos(\Omega t)), \quad (5)$$

где I_0 – рабочий ток лазера; μ_I – индекс амплитудной модуляции тока накачки; Ω – частота модуляции.

В этом случае зависимость частоты от малого изменения тока можно приближенно представить в следующем виде:

$$\nu(I) \sim \nu_0 + k_\nu \Delta I(t) = \nu_0 + k_\nu I_0 \mu_I \cos(\Omega t) = \nu_0 (1 + \mu \cos(\Omega t)), \quad (6)$$

где ν_0 – частота излучения лазера при некотором фиксированном рабочем токе; k_ν – эмпирический коэффициент пропорциональности между изменением частоты DFB лазера и изменением его тока накачки; μ – индекс частотной модуляции излучения лазера.

Мгновенная фаза на выходе интерферометра может быть представлена в виде

$$\varphi(t) = 2k(t)L(t),$$

где $k(t)$ – волновое число в среде; $L(t)$ – текущее расстояние до объекта.

Найдем выражение для интерферометрического сигнала в схеме измерителя вибраций. Очевидно, что он пропорционален косинусу его фазы и может быть выражен следующим образом:

$$s(t) \sim \cos(\varphi(t)) = \cos(2k(t)L(t)). \quad (7)$$

Учитывая, что

$$k_0 = \frac{2\pi\nu_0}{c},$$

подставляем (6) в (7) и получаем

$$s(t) \sim \cos(2k_0 L(t)(1 + \mu \cos(\Omega t))) = \cos(2k_0 L(t)) \cos(2k_0 L(t) \mu \cos(\Omega t)) - \sin(2k_0 L(t)) \sin(2k_0 L(t) \mu \cos(\Omega t)). \quad (8)$$

Если индекс частотной модуляции μ выбрать достаточно малым, так чтобы

$$2k_0 L(t) \mu \cos(\Omega t) \ll 1 \text{ и } \cos(2k_0 L(t) \mu \cos(\Omega t)) \approx 1,$$

то (8) можно представить в виде суммы двух компонент:

$$s(t) = A(t) + B(t),$$

где $A(t) = \cos(2k_0 L(t))$ – низкочастотная компонента набега фазы, связанная с частотой лазера ν_0 ; $B(t) = -2k_0 L(t) \mu \cos(\Omega t) \sin(2k_0 L(t))$ – высокочастотная компонента набега фазы, связанная с частотной модуляцией (6) излучения лазера.

При достаточно большой Ω компонента $B(t)$ трансформируется в высокочастотный модулированный сигнал, в котором несущей является $\cos(\Omega t)$, а амплитудная модуляция описывается функцией

$$2\mu k_0 L(t) \sin(2k_0 L(t)) \approx 2\mu k_0 L(t) \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \sin(2k_0 L(t)),$$

где L_0 – расстояние от измерителя до вибрирующей поверхности; ΔL – амплитуда вибрации.

При $\Delta L/L \ll 1$, что обычно реализуется на практике, высокочастотная компонента $B(t)$ принимает вид

$$B(t) = 2\mu k_0 L_0 \cos \Omega t \sin(2k_0 L(t)).$$

После селекции фильтром низкочастотной и высокочастотной компонент и амплитудного детектирования $B(t)$ получается квадратурная пара сигналов:

$$A(t) = \cos(2k_0 L(t)) \text{ и } C(t) = \sin(2k_0 L(t)),$$

несущая информацию об амплитуде колебаний поверхности.

3. СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЯ ВИБРАЦИЙ С КВАДРАТУРНЫМ ВЫХОДОМ

За основу схемы измерителя была взята схема интерферометра Майкельсона в оптоволоконном исполнении, представленная на рис. 1.

Рассмотрим действие измерителя.

Когерентное излучение от DFB-лазера поступает в одномодовое оптическое волокно ОВ1. По волокну излучение попадает в волоконно-оптический смеситель. Пройдя смеситель, излучение попадает в оптическое волокно ОВ2 и распространяется по нему до его торца, расположенного в воздушной среде. Из-за наличия разницы между коэффициентами преломления сердцевины волокна и воздушной среды на торце ОВ2 излучение лазера разделяется на два направления: часть излучения выходит из волокна, собирается коллиматором и направляется к объекту (показано сплошной линией), а другая часть излучения отражается от торца волокна (показано пунктирной линией). Излучение, дошедшее до объекта, отражается им (показано штрихпунктирной линией), вновь собирается коллиматором и вводится в оптическое волокно ОВ2.

В результате в волокно ОВ2 попадает два взаимно когерентных пучка: отраженный от торца волокна (пунктирная линия) и рассеянный от объекта и собранный коллиматором обратно в волокно (штрихпунктирная линия). Эти два пучка передаются через смеситель на фотоприемник, где интерферируют друг с другом, формируя оптический сигнал, который преобразуется фотоприемником в фототок.

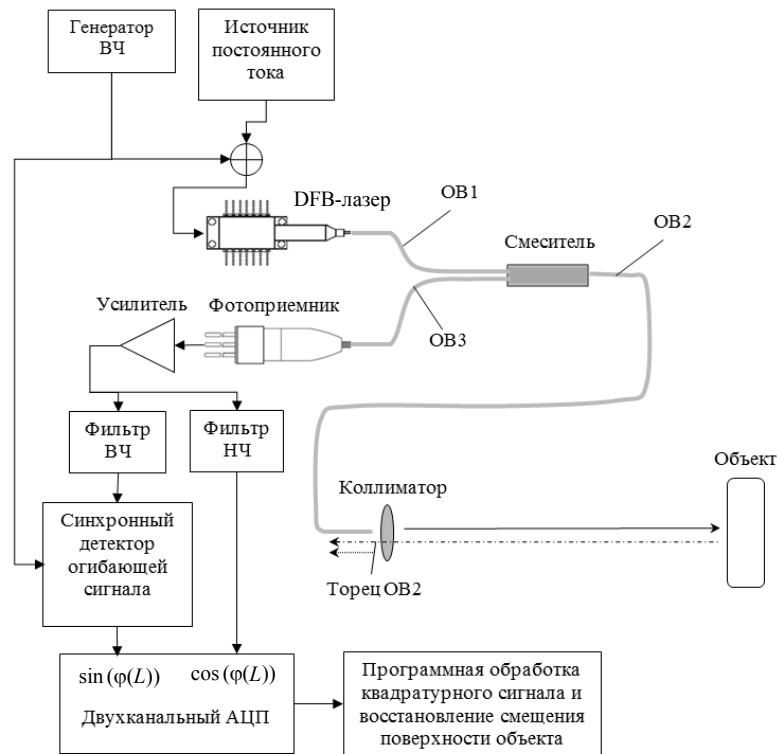


Рис. 1. Общая схема измерителя вибраций в оптоволоконном исполнении с квадратурным выходом

Однако, как было показано выше, для измерения вибраций необходимо получить квадратурный сигнал. Поэтому схеме (рис. 1) следует дополнить высокочастотной модуляцией тока лазера и последующей обработкой сигнала фотоприемника.

Таким образом, на DFB-лазер источником постоянного тока подается рабочий ток накачки, к которому добавляется небольшой по величине ток модуляции лазера ($\sim 10^{-6}$ А), задаваемый высокочастотным генератором. Вследствие модуляции DFB-лазер генерирует оптическое излучение с переменной длиной волны, которое используется в оптоволоконной схеме интерферометра для получения интерферометрического сигнала на фотоприемнике. Как показано в (11), сигнал фотоприемника содержит низкочастотную составляющую, которая соответствует работе интерферометра с фиксированной длиной волны, и высокочастотную составляющую, которая связана с модуляцией тока лазера. Далее фильтры низких и высоких частот [10] разделяют исходный сигнал фотоприемника на две составляющие. При этом низкочастотная составляющая соответствует интерферометрическому сигналу, пропорциональному косинусу разницы фаз оптических сигналов, задаваемой смещением поверхности объекта:

$$x(L) \sim \cos(2k\Delta L). \quad (9)$$

Что касается огибающей высокочастотного сигнала после синхронного детектирования, то она соответствует интерферометрическому сигналу, пропорциональному синусу разницы фаз оптических сигналов, задаваемой смещением поверхности объекта:

$$y(L) \sim \sin(2k\Delta L). \quad (10)$$

Сформированные сигналы (9) и (10) оцифровываются двухканальным АЦП. И, наконец, результирующий оцифрованный квадратурный сигнал записывается и обрабатывается с целью восстановления смещения поверхности и дальнейшего анализа ее вибраций.

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ВИБРАЦИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе схемы, представленной на рис. 1, был собран макет измерителя амплитуды вибраций, состоящий из следующих элементов:

- оптоволоконной интерферометрической схемы, включающей оптическое волокно (SMF-28e) [11] и оптоволоконный смеситель (Thorlabs 10202A-50-FC) [12];
- DFB-лазера с оптоволоконным выходом (FITEЛ FRL15DCWD-A81) [13] с рабочей длиной волны 1550 нм;
- фотоприемника со схемой усиления (JDSU EPM745) [14];
- электронной схемы получения квадратурного сигнала (в качестве двухканального АЦП используется компьютерная звуковая карта);
- выходного оптического волокна с установленным объективом-коллиматором (F810FC-1550) [15];
- малошумящего источника питания (аккумуляторная батарея 12 В).

Для проведения экспериментальных исследований измерения амплитуды вибраций поверхности диффузного объекта была собрана экспериментальная установка, структурная схема которой показана на рис. 2.

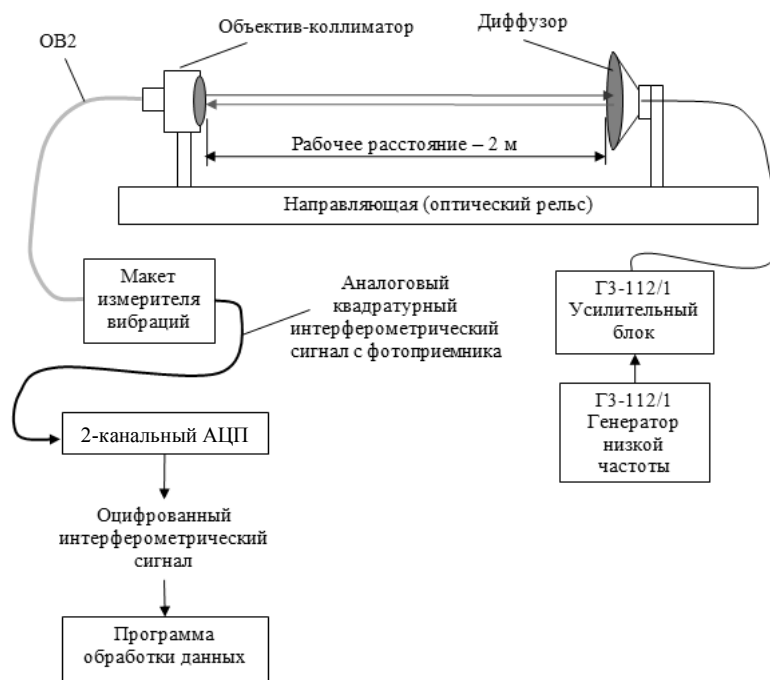


Рис. 2. Экспериментальная установка для проведения измерений вибраций объекта

При проведении измерений использовалось два режима работы.

• **Режим вибраций объекта с заданной частотой и амплитудой.** В этом режиме на катушку громкоговорителя подается синусоидальный сигнал с частотой 30 Гц и амплитудой, выбираемой таким образом, чтобы интерферометрический сигнал вибраций объекта попадал в полосу 0...22 кГц, поскольку выбранный для макета АЦП позволяет оцифровывать сигналы с частотой не более 44 кГц.

• **Режим отсутствия сигнала генератора низкой частоты.** В этом режиме на катушку громкоговорителя не подается ток от генератора низкой частоты, поэтому его поверхность не должна вибрировать. Однако вибрации могут присутствовать из-за наличия воздушных пото-

ков в помещении, которые могут заставить поверхность диффузора громкоговорителя колебаться. Кроме того, небольшие колебания расстояния могут быть вызваны механическими колебаниями установки, на которой закреплен диффузор и объектив-коллиматор.

Эксперимент проводился следующим образом. Сначала с помощью генератора низкой частоты осуществляем вибрации диффузора на частоте 30 Гц. По сигналу, полученному со звуковой карты, можно оценить амплитуду интерферометрического сигнала и отобразить его на компьютере. Далее, плавно изменяя расстояние между диффузором и объективом, определяется точка, в которой интерферометрический сигнал, получаемый в программе, достигает максимума. Затем подбирается амплитуда колебаний диффузора путем изменения уровня звукового сигнала. Поскольку скорость и амплитуда колебаний диффузора зависят друг от друга, то можно оценить, насколько получаемый интерферометрический сигнал высокочастотен. Это позволяет подобрать амплитуду колебаний диффузора так, чтобы частота интерферометрического сигнала была заведомо ниже, чем 20 кГц. Таким образом устанавливается режим вибраций объекта с заданной частотой и амплитудой. Происходит захват данных интерферометрического сигнала во времени с платы АЦП и их запись в файл.

Во второй части эксперимента генератор выключается. Это позволяет получить интерференционный сигнал во времени от условно-неподвижного диффузора (режим отсутствия вибраций объекта). Вновь записываются данные в файл. Полученные записи интерференционных сигналов во времени анализируются, и восстанавливается смещение поверхности объекта.

В результате проведения экспериментальных исследований были получены и проанализированы данные интерференционного сигнала во времени в двух режимах.

В первом режиме на диффузор с генератора подавался сигнал частотой 30 Гц. Фрагмент восстановленного сигнала смещения поверхности представлен на рис. 3.

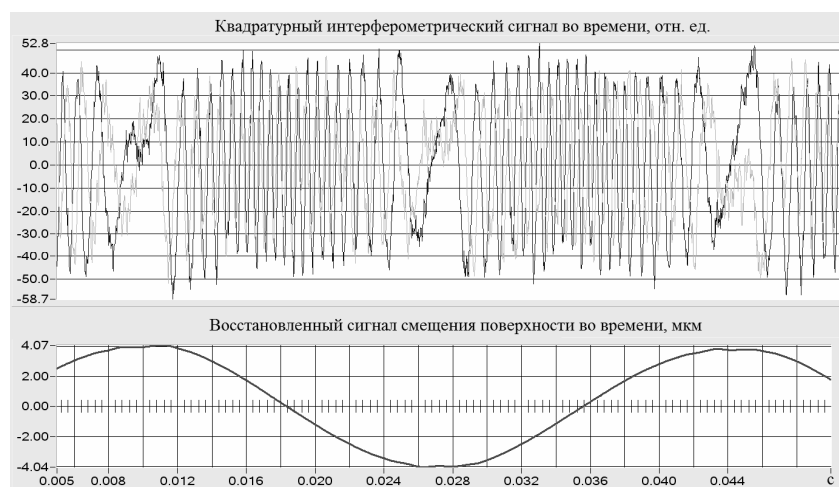


Рис. 3. Восстановленный сигнал смещения поверхности, вибрирующей на частоте 30 Гц (на верхнем графике черная кривая соответствует интерферометрическому сигналу, серая – его квадратурному дополнению)

При изменении расстояния интерференционная картинка, как следует из физики процесса, оказывается бегущей. В тех точках, где скорость движения поверхности нулевая (максимумы и минимумы серой кривой), интерференционная картинка неподвижна, поскольку смещения поверхности в этот момент времени не происходит. Частота колебаний поверхности соответствует частоте сигнала генератора, амплитуда в исследуемой точке равна $4 \dots 0,05$ мкм. Погрешность измерения смещения поверхности в каждый момент времени определялась по статистическому разбросу данных [16] из цифрового массива, соответствующего нижней кривой на рис. 3.

Фрагмент восстановленного сигнала смещения поверхности в режиме отсутствия сигнала генератора представлен на рис. 4: интерференционная картина – бегущая, интерферометриче-

ский сигнал и его квадратурное дополнение меняются во времени. Таким образом, имеет место вибрация поверхности, вызванная собственными колебаниями диффузора и механическими колебаниями установки. Оценка случайных смещений составляет $0,3 \pm 0,05$ мкм (рис. 4).



Рис. 4. Восстановленный сигнал смещения в режиме отсутствия сигнала генератора низкой частоты (на верхнем графике черная кривая соответствует интерферометрическому сигналу, серая – его квадратурному дополнению)

Очевидно, что естественная вибрация присутствовала в обоих режимах работы, однако была слабо заметна в первом режиме в силу малых своих значений по отношению к уровню полезного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы являлась демонстрация возможности создания измерителя вибраций на основе современной элементной базы.

В качестве метода измерения вибраций выбрана интерферометрическая схема виброметра. Апробировано использование в схеме оптоволоконных компонент. Собран макет измерителя вибраций, на котором проведены эксперименты по измерению амплитуды вибраций от диффузно-рассеивающей поверхности. В результате анализа показано, что макет измерителя вибраций на основе оптоволоконных компонент может регистрировать квадратурный интерферометрический сигнал и восстанавливать смещение поверхности вибрирующих объектов.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной возможности реализации измерителя вибраций с использованием оптоволоконных компонент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Науменко А.П. Методология виброакустической диагностики поршневых машин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2007. – Спец. вып.: Двигатели внутреннего сгорания. – С. 85–93.
2. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: справочник: в 2 кн.: кн. 1–2 / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1978. – 844 с.
3. VDD – Цифровой виброметр на базе ПК [Электронный ресурс] // MEDUS. – URL: http://www.medus.com.ua/pdf/polytec/vibrometru/1371_417_VDD_RUS.pdf (дата обращения: 10.05.2014).
4. Лазерный интерферометрический виброметр [Электронный ресурс] // NANOINTEK. – URL: <http://nanointek.ru/assets/images/LSV.pdf> (дата обращения: 10.05.2014).
5. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика: теория и практика. – СПб.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2008. – 320 с.
6. Атавин В.Г., Мохнатов А.А., Худяков Ю.В. Возможности измерений амплитуд вибраций гетеродинным лазерным виброметром // Измерительная техника. – 2000. – № 2. – С. 32–34.

7. Fercher A.F. Optical coherence tomography // Journal of Biomedical Optics. – 1996. – Vol. 1, iss. 2. – P. 157–173. – doi: 10.1117/12.231361.
8. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
9. Звельто О. Принципы лазеров: пер. с англ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1990. – 559 с.
10. Романов И. Активные RC-фильтры: схемы и расчеты // Радио. – 1995. – № 3. – С. 45–48.
11. Оптическое волокно Corning SMF-28e+: описание изделия [Электронный ресурс] // CORNING. – URL: http://www.corning.com/uploadedFiles/Corporate/Russia/Products_+_Services/Telecommunications/Optical_Fiber/Pdfs/SMF_28eplus.pdf (дата обращения: 01.07.2014).
12. SM Coupler [Electronic resource] // Thorlabs, Inc. – URL: <http://www.thorlabs.de/thorcat/1300/10202A-50-FC-AutoCADPDF.pdf> (дата обращения: 02.07.2014).
13. Laser diode module FRL15DCWD-A81-W1550 [Electronic resource] / The Furukawa Electric Co., Ltd // Data-Sheets.com: for electronic engineers & buyers. – URL: <http://www.datasheets.com/search/partdetail/FRL15DCWDA81W1550/The+Furukawa+Electric+Co-dot-+Ltd> (дата обращения: 10.07.2014).
14. JDSU Photodiode EPM-745 [Electronic resource] // Elcodis: Electronic Components Distributor. – URL: <http://elcodis.com/parts/524791/EPM7032AELC44-7.html#datasheet> (дата обращения: 03.07.2014).
15. FC/APC collimation package F810FC-1550 [Electronic resource] // Thorlabs Inc. – URL: <http://www.thorlabs.de/thorcat/13800/F810APC-1550-AutoCADPDF.pdf> (дата обращения: 03.07.2014).
16. Новицкий П.В., Зograf И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

Глебус Илья Сергеевич, аспирант Новосибирского государственного технического университета, инженер лаборатории 2-1 Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН. Основное направление научных исследований – оптические и оптико-электронные приборы и комплексы. Имеет четыре публикации. E-mail: ilya-neo@ya.ru

Макаров Сергей Николаевич, старший научный сотрудник лаборатории 2-1 Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН. Основное направление научных исследований – дальнометрия. Имеет более 20 публикаций. E-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru

Чугуй Юрий Васильевич, доктор технических наук, профессор, директор Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН. Основное направление научных исследований – системы технического зрения. Имеет более 100 публикаций. E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

*Noncontact interferometric fibre optics vibrometer**

I.S. GLEBUS¹, S.N. MAKAROV², Y.V. CHUGUI³

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marks Prospekt, Novosibirsk, 630073, RF postgraduate student. E-mail: ilya-neo@ya.ru

² Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the RF Academy of Sciences, 41 Russkaya Street, Novosibirsk, 630058, Russian Federation, senior staff scientist. E-mail: makarov@tdisie.nsc.ru

³ Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the RF Academy of Sciences, 41 Russkaya Street, Novosibirsk, 630058, Russian Federation, D.Sc, professor. E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Research results of designing a vibrometer based on the state-of-the-art circuitry are presented. An interferometric method to detect a surface offset in the case of a fixed direction of an object movement is described in the paper. An interferometric scheme sensitive to the distance to an object based on the Michelson interferometer is used in the proposed method. A quadrature interferometric signal is received by laser pumping current modulation and further signal filtering. A quadrature signal exposed to tonal object vibrations is studied. Object surface offset signals As a result of experimental measurements and processing of the data obtained signals of an object's surface offset are recovered for the vibration mode with the preset frequency and amplitude. The surface vibration frequency corresponds to the generator signal frequency (30 Hz), with the amplitude of the investigated point being equal to 4 ± 0.05 μm . A random offset amplitude determined in the no signal mode equals 0.3 μm . It is revealed that the vibrometer model based on fiber-optical components can detect quadrature interferometric signals and recover surface offsets of vibration objects. Further research on the proposed model as well as on improving its accuracy characteristics and bringing it to a prototype are planned.

Keywords: vibration, vibrometer, Michelson interferometer, interferometric signal, pumping current modulation, quadrature signal, diffuser, surface offset

* Received 17 July 2014.

REFERENCES

1. Naumenko A.P. Metodologiya vibroakusticheskoi diagnostiki porshnevnykh mashin [Methodology of vibration-acoustic diagnostics of reciprocating machines]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie. – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2007, Special issue. Internal Combustion Engines, pp. 85–93.
2. Klyuev V.V. *Pribory i sistemy dlya izmereniya vibratsii, shuma i udara: spravochnik*: v 2 kn.: kn. 1–2 [Devices and systems for measuring noise and shock vibration. Handbook: in 2 vol.: vol. 1–2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 844 p.
3. [VDD – Digital Vibrometer Based on PC]. *MEDUS*. Available at: http://www.medus.com.ua/pdf/polytec/vibrometru/1371_417_VDD_RUS.pdf (accessed 10.05.2014)
4. [Laser interferometric vibrometer]. *NANOINTEK*. Available at: <http://nanointek.ru/assets/images/LSV.pdf> (accessed 10.05.2014)
5. Bailey D., Wright E. *Practical Fiber Optics*. Oxford, Elsevier, 2003. (Russ. ed.: Beili D., Rait E. *Volokonnaya optika. Teoriya i praktika*. St. Petersburg, KUDITs-PRESS Publ., 2008. 320 p.).
6. Atavin V.G., Mokhnatov A.A., Khudyakov Yu.V. Vozmozhnosti izmerenii amplitud vibratsii geterodinnym lazernym vibrometrom [New possibilities for vibration-amplitude measurement by heterodyne laser vibrometer]. *Izmeritel'naya tekhnika – Measurement Techniques*, 2000, no. 2, pp. 32–34. (In Russian)
7. Fercher A.F. Optical coherence tomography. *Journal of Biomedical Optics*, 1996, vol. 1, iss. 2, pp. 157–173. doi: 10.1117/12.231361
8. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Process]. St. Petersburg, Piter Publ., 2002. 608 p.
9. Svelto O. *Principles of lasers*. Translated from Italian. New York, Springer, 1989. (Russ. ed.: Zvelto O. *Printsipy laz-erov*. Moscow, Mir Publ., 1990. 559 p.).
10. Romanov I. Aktivnye RC-fil'try: skhemy i raschety [Active RC-filters: schemes and calculations]. *Radio*, 1995, no. 3, pp. 45–48. (In Russian)
11. [Optical Fiber Corning SMF-28e+: product description]. *CORNING*. Available at: http://www.corning.com/uploadedFiles/Corporate/Russia/Products_+_Services/Telecommunications/Optical_Fiber/Pdfs/SMF_28eplus.pdf (accessed 01.07.2014)
12. SM Coupler. *Thorlabs, Inc.* Available at: <http://www.thorlabs.de/thorcat/1300/10202A-50-FC-AutoCADPDF.pdf> (accessed 02.07.2014)
13. Laser diode module FRL15DCWD-A81-W1550. The Furukawa Electric Co., Ltd. *DataSheets.com: For electronic engineers & buyers*. Available at: <http://www.datasheets.com/search/partdetail/FRL15DCWDA81W1550/The+Furukawa+Electric+Co-dot-+Ltd> (accessed 10.06.2014)
14. JDSU Photodiode EPM-745. Elcodis: Electronic Components Distributor. Available at: <http://elcodis.com/parts/524791/EPM7032AELC44-7.html#datasheet> (accessed 03.07.2014)
15. FC/APC collimation package F810FC-1550. *Thorlabs, Inc.* Available at: <http://www.thorlabs.de/thorcat/13800/F810APC-1550-AutoCADPDF.pdf> (accessed 03.07.2014)
16. Novitskii P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostei rezul'tatov izmerenii* [Measurements results tolerances estimation]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991. 304 p.