УДК 539.3:621.375

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2015 М.Н. Осипов, Н.А. Шарафутдинов, Ю.Д. Щеглов, И.Н. Фалилеев, М.Е. Федина

Самарский государственный университет

Поступила в редакцию 30.07.2015

В данной статье представлен автоматизированный комплекс определения форм и частотных характеристик собственных колебаний механических конструкций. Ключевые слова: автоматизированные системы, спекл-интерферометрия, неразрушающие методы исследований, измерения вибраций, резонансные колебания.

Классическая реализация интерферометрических измерений предполагает обеспечение жестких условий измерения, исключающих различного рода помехи. Как правило, интерферометрические установки стационарны и часто требуют механического контакта с контролируемым объектом. Расшифровка экспериментальных интерферограмм также является чрезвычайно трудоемким процессом, в результате которого могут появляться неоднозначные результаты. Особое внимание в настоящее время уделяется интерферометрическим методам основанных на применении цифровой спекл-интерферометрии. Цифровая спекл-интерферометрия позволяет исследовать реальные объекты в отличие от классической интерферометрии. Однако процесс записи и обработки интерферограмм в полном объеме не автоматизирован. Также не в полном объеме решены задачи определения частотных характеристик элементов механических конструкций при динамических нагрузках [1-5].

В данной работе представлена автоматизированная система определения форм колебаний и частотных характеристик колебательного процесса, состоящая из оптоэлектронного помехоустойчивого спекл-интерферометра с пакетом прикладного программного обеспечения.

Разработанный оптоэлектронный спеклинтерферометр представлен на рис 1. Основными элементами спекл-интерферометра являются: лазерный модуль LCM-S-111-50-NP25

E-mail: nikas.shar@gmail.com

Щеглов Юрий Денисович, ведущий инженер кафедры безопасности информационных систем.

Фалилеев Иван Николаевич, магистр кафедры безопасности информационных систем. E-mail: falileev@samsu.ru Федина Мария Ефимовна кандидат физико-математических наук, доцент кафедры безопасности информационных систем. E-mail: phedina@samsu.ru



Рис. 1. Внешний вид оптоэлектронного спекл-интерферометра

(длина волны 532 нм, мощность 50 мВт, длина когерентности более 50 м), цифровая видеокамера ВИДЕОСКАН-285/П-USB с размером ячейки 6.45х6.45 мкм, разрешением 1392х1040 пикселей и скоростью записи информации 7.7 Гц [6].

Одной из особенностей разработанного оптоэлектронного спекл-интерферометра является то, что в качестве опорного сигнала используется диффузно-рассеянное излучение. При такой оптической схеме можно контролировать взаимное распределение в спекл-структурах опорного и предметного пучков и, следовательно, нет жестких требований на гладкость волнового фронта опорной волны. Для получения интерферограммы приемлемого качества опорный сигнал должен быть согласован с предметным сигналом. Теоретически и экспериментально показано, что для этого необходимо хотя бы приблизительное равенства наиболее вероятных яркостей точек предметного и опорного сигналов.

Для выполнения этих требований в разработанном программном обеспечении предусмотрена специальная функция для определения и отображения соответствующих гистограмм яркости. Для уравнивания яркостей в устройстве пред-

Осипов Михаил Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности информационных систем. E-mail: osipov7@yandex.ru Шарафутдинов Никита Андреевич, аспирант кафедры безопасности информационных систем.

E-mail: sheglov@samsu.ru

усмотрена регулировка интенсивности опорного сигнала с помощью аттенюатора, а регулировка интенсивности предметного сигнала осуществляется апертурной диафрагмой объектива. Также для повышения четкости изображения применяется подавление вредного влияния внешних случайных (с нулевым средним) колебаний измерительной оптической схемы путем регистрация массива кадров и последующее усреднение изображения интерферограммы по этим кадрам.

Принцип расшифровки интерферограммы, реализованный в разработанной автоматизированной системе, заключается в моделировании такой виртуальной волны с гладким криволинейным волновым фронтом – сплайна, которая, интерферируя с плоской волной, давала бы интерференционную картину по расположению полос совпадающую с экспериментальной полученной интерферограммой. В результате получается псевдоинтерферограмма. На рис. 2 на фоне экспериментальной интерферограммы представлена наложенная псевдоинтерферограмма.



Рис. 2. Экспериментальная спеклинтерферограмма с участком наложенной откорректированной псевдоинтерферограммой

Программное обеспечение, разработанного оптоэлектронного спекл-интерферометра, позволяет «отрихтовать» сплайн так, чтобы срединные линии псевдоинтерферограммы проходили посредине полос исходной интерферограммы, как показано на рисунке. В программном обеспечении предусмотрено по «отрихтованным» интерферограммам построение топограмм смещений – семейство линий равной величины смещений (изотоп), а также по топограммам однозначно определяется величина линейного смещения точек объекта. Такое решение позволяет ускорить процесс обработки спеклинтерферограмм и повысит точность определения полей перемещений.

Разработанный оптоэлектронный помехоустойчивый спекл-интерферометр позволяет производить исследование полей перемещений, как при статических, так и при динамических испытаниях различных элементов конструкций в условиях наличия внешних шумов. Однако наличие собственных шумов – спекл структур, ограничивает диапазон измерения частотных характеристик колебаний исследуемых конструкций, как по амплитуде, так и по частоте. Для решения данной проблемы в конструкцию оптоэлектронного спекл-интерферометра введен дополнительно быстродействующий точечный фотодетектор. Оптическая схема оптоэлектронного спекл-интерферометра представлена на рис. 3.



Рис. 3. Оптическая схема оптоэлектронного спекл-интерферометра

В данной схеме лазерное излучение с помощью делителя BS1 расщепляется на два луча, один из которых (предметный) с помощью оптической системы L1 освещает исследуемый объект. Отраженное излучение от объекта с помощью оптической системы L2 (объектив видеокамеры) формирует изображение исследуемой поверхности в плоскости ПЗС-матрицы видеокамеры (Cam) и в плоскости быстродействующего фотодетектора PD. Второй луч (опорный), проходя через диффузор D и делитель BS2, накладывается на предметный пучок, образуя вторичную интерференционную картину в плоскости ПЗС-матрицы видеокамеры (Cam) и в плоскости быстродействующего фотодетектора PD. Как результат, в данной оптической схеме одновременно регистрируется - быстродействующим фотодетектором PD изменение интенсивности одиночного спекла, а видеокамерой регистрируется спекл интерферограммы, определяющие формы колебаний. Размеры рабочей поверхности быстродействующего точечного фотодетектора PD должны быть согласованы с размерами объективной спекл структуры и периодом вторичных интерференционных полос образованных в плоскости фотодетектора. Данные условия выполняются подбором параметров оптической схемы – диафрагма, фокусное расстояние, наклон опорного пучка относительно предметного пучка [7].

На рис. 4 представлены спекл-интерферограммы колебаний тонкой металлической мембраны с жёсткой обечайкой, возбужденных на



Рис. 4. Спекл-интерферограммы собственных частот колебаний металлической мембраны

собственных частотах, которые зарегистрированы разработанным спекл-интерферометром.

Поведение выходного напряжения с фотодетектора имеет сложный характер. Как показано в работах [7-10], при перемещениях исследуемой поверхности на величину меньше $\lambda/8$ выходное напряжение фотодетектора полностью соответствует данному перемещению. При перемещениях больше $\lambda/8$, вид выходного напряжения фотодетектора имеет сложный характер и представляет набор осциллирующих пакетов. При исследовании собственных колебаний, вид осциллирующих пакетов выходного напряжения фотодетектора имеет периодический характер. Характерный вид осциллограммы выходного напряжения фотодетектора для резонансных колебаний исследуемой поверхности с амплитудой больше $\lambda/8$, на представлен на рис. 5.



Рис. 5. Осциллограмма выходного напряжения быстродействующего фотодиода при колебании исследуемой поверхности с амплитудой больше *\lambda/8*.

Количество осцилляций внутри пакета пропорционально удвоенной амплитуде собственных колебаний. Для данной оптической схемы одно полное колебание внутри пакета соответствует перемещению исследуемой точки поверхности на величину равную $\lambda/2$. Таким образом, амплитуда колебаний поверхности составляет порядка $7\lambda/4$. Верхняя граница измерения амплитуды колебаний определяется быстродействием фотодетектора и разрядностью регистрирующего модуля и может составлять нескольких миллиметров, что существенным образом расширяет диапазон измеряемых перемещений.

Период следования осциллирующих пакетов соответствует удвоенной частоте собственных колебаний исследуемой точки поверхности.

Таким образом, представленный автоматизированный оптоэлектронный спеклинтерферометр позволяет регистрировать бесконтактным способом основные частотные характеристики собственных колебаний в широком диапазоне с использованием предлагаемого метода цифровой спекл-интерферометрии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-08-06330-а и № 13-01-97009-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wang Wei-Chung, Jiong-Shiun Hsu. Investigation of vibration characteristics of bonded structures by timeaveraged electronic speckle pattern interferometry // Optics and Lasers in Engineering. 2010. 48. P. 958-965.
- Yang L.X., Schuth M., Thomas D., Wang Y.H. Stroboscopic digital speckle pattern interferometry for vibration analysis of microsystem // Optics and Lasers in Engineering. 2009. 47. P. 252-258.
- Santoyo F.M., Pedrini G., Schedin S., Tiziani H.J. 3D displacement measurements of vibrating objects with multi-pulse digital holography // J. Meas. Sci. Technol. 1999. №10. December. P. 1305-1308.
- 4. *Peter Martin, Steve Rothberg* Introducing speckle noise maps for Laser Vibrometry. // Optics and Lasers in Engineering. 2009. 47. P. 431-442.
- Arai Y., Hirai H., Yokozeki S. High-resolution dynamic measurement using electronic speckle pattern interferometry based on multi-camera technology.//

Optics and Lasers in Engineering. 2008. 46. P. 733-738.

- Осипов М.Н., Щеглов Ю.Д. Оптоэлектронный спеклинтерферометр для определения полей перемещений // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 4. С. 1672-1675.
- 7. Осипов М.Н., Фалилеев И.Н., Чекменев А.Н., Щеглов Ю.Д. Применение спекл-интерферометрии для регистрации акустического сигнала // Ползуновский вестник. 2012. № 3/2. С. 87-92.
- 8. Осипов М.Н., Попов М.А. Измерения малых динамических смещений интерферометром Майкельсона

со сферическими волновыми фронтами // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 4. С. 55-57.

- Осипов М.Н., Попов М.А., Попова Т.А. Поведение выходного сигнала в системе измерения на основе оптоэлектронного интерферометра Майкельсона // Ползуновский вестник. 2011. № 3/1. С. 38-41
- Осипов М.Н., Хохлов В.А., Чекменев А.Н. Развитие цифровой спекл интерферометрии для исследования динамических процессов в реальном времени // Вестник СамГУ. 2013. № 9/2 (110). С. 109-117.1.

AUTOMATED SYSTEM FOR DETERMINING THE SHAPE AND FREQUENCY CHARACTERISTICS OF NATURAL VIBRATIONS

© 2015 M.N. Osipov, N.A. Sharafutdinov, Y.D. Sheglov, I.N. Falileev, M.E. Fedina

Samara State University

This paper presents an automated system for determining the shape and frequency characteristics of natural vibrations of mechanical structures.

Key words: automated systems, speckle interferometry, non-destructive research methods, measurement of vibration, resonance oscillations

Michael Osipov, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Head at the Security of Information Systems Department. E-mail: osipov7@yandex.ru Nikita Sharafutdinov, Postgraduate Student at the Security of Information Systems Department. E-mail: nikas.shar@gmail.com Yuri Sheglov, Leading Engineer at the Security of Information Systems Department. E-mail: sheglov@samsu.ru Ivan Falileev, Undergraduate Student at the Security of

Information Systems Department. E-mail: falileev@samsu.ru Mariya Fedina, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Security of Information Systems Department. E-mail: phedina@samsu.ru