

## ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ ПРИ ШИРОКОПОЛОСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

© 2003 В. П. Шорин<sup>1</sup>, Д. С. Еленевский<sup>2</sup>, О. А. Журавлев<sup>1</sup>, С. Ю. Комаров<sup>1</sup>,  
Ю. Н. Шапошников<sup>2</sup>, Ю. Д. Щеглов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup>Самарский научный инженерный центр АПИДМ

<sup>3</sup>ОАО «Моторостроитель», г. Самара

Рассмотрены задачи, которые необходимо решить для создания цифрового спекл-интерферометра, позволяющего исследовать вибрации механических элементов, возбуждаемых одновременно на нескольких частотах. На основе анализа методов голографической и спекл-интерферометрии разработан способ регистрации спеклограмм, обеспечивающих выделение отдельных спектральных составляющих колебаний поверхности при широкополосном возбуждении объекта. В основе разработанного способа лежит временная модуляция лазерных пучков в интерферометре.

Цифровая спекл-интерферометрия (ЦИ) все более широко применяется для исследования виброакустических характеристик разнообразных машин и механизмов. Основное ее достоинство заключается в использовании преимуществ современной компьютерной техники в части обработки информации. Имеется возможность автоматизации как процесса регистрации смещений и деформаций элементов механических конструкций, так и представления результатов в виде распределения интенсивности света, привязанного к уровням величин смещения точек исследуемой поверхности. В ЦИ интерференционная картина формируется непосредственно в памяти компьютера, и благодаря этому существенно сокращается во времени процесс получения количественной информации (расчет полей вибро смещений).

Известны задачи, которые должны быть решены при создании цифрового интерферометра, предназначенного для исследования вибро смещений объекта, помещенного в динамическую рабочую среду и возбуждаемого этой средой. Во-первых, спекл-интерферометр должен визуализировать смещения диффузной поверхности исследуемого объекта, наблюдаемого через динамическую среду, оптическое пропускание которой является неоднородным и переменным. Во-вторых, поскольку колебания поверхности объекта,

возбуждаемого пространственно распределенной нагрузкой, могут иметь весьма сложный характер, регистрируемые интерферограммы должны однозначно интерпретироваться с тем, чтобы можно было описать характер этих колебаний.

Однако прежде чем решать задачи, связанные с воздействием на объект нестационарной среды, необходимо разработать способ регистрации собственных форм колебаний объекта при его многочастотном возбуждении, которое характерно для реальных условий работы элементов конструкции.

В основе спекл-интерферометрических измерений лежит регистрация изменений фазы спеклов, формируемых соответствующими участками исследуемой поверхности под действием приложенной к объекту нагрузки [1, 2]. В цифровой голографии используются два основных метода регистрации колебаний поверхности диффузных объектов: метод усреднения во времени и двухэкспозиционный (двухимпульсный) метод [3-9].

В обоих методах колеблющийся объект освещается когерентным светом и рассеянное излучение собирается объективом, который переносит изображение объекта на светочувствительную поверхность телевизионной камеры как прибора с зарядовой связью (ПЗС). Относительное отверстие объектива подбирается таким, чтобы размер спеклов в

изображении разрешался ПЗС-матрицей телекамеры. Спекл-изображение объекта на светочувствительной поверхности телеприемника складывается с однородным когерентным опорным полем, и результирующее изображение вводится в компьютер.

Мгновенное распределение интенсивности  $I_t$  на светочувствительной поверхности телевизионной камеры имеет вид

$$I_t(x, y) = I_o(x, y) + I_s(x, y) + 2\sqrt{I_o(x, y)I_s(x, y)} \times \cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_s(x, y) + \frac{4\pi}{\lambda}F(t)], \quad (1)$$

где  $\varphi_s$  и  $\varphi_o$  – фазы спекла и опорного пучка в рассматриваемой точке  $(x, y)$  изображения при стационарном состоянии поверхности исследуемого объекта;  $I_o$  и  $I_s$  – интенсивности опорного поля и спекл-изображения;  $\lambda$  – длина волны излучения лазера, используемого в интерферометре;  $F(t)$  – функция движения объекта.

Телевизионная камера усредняет эту интенсивность по времени  $T$  формирования кадра. Таким образом, в компьютер вводится распределение вида

$$I(x, y) = I_o(x, y) + I_s(x, y) + \frac{2}{T}\sqrt{I_o(x, y)I_s(x, y)} \times \int_0^T \cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_s(x, y) + \frac{4\pi}{\lambda}F(t)]dt. \quad (2)$$

В случае синусоидальных колебаний исследуемого объекта его функция движения имеет вид  $\bar{F}(t) = \bar{A} \sin \omega t$ , где  $\bar{A}$  – вектор амплитуды колебаний,  $\omega$  – частота.

Если поверхность колеблющегося объекта в течение времени регистрации кадра изображения постоянно освещается лазерным излучением, то результирующая усредненная по времени ввода кадра яркость  $B$  наблюдаемого на экране монитора изображения в точке с координатами  $(x, y)$  описывается выражением [1]:

$$B(x, y) = \left[ I_s + I_o + 2\sqrt{I_s I_o} J_0 \left[ \frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right] \cos(\varphi_o - \varphi_s) \right], \quad (3)$$

где  $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $A$  – проекция вектора амплитуды колебаний точки  $(x, y)$  объекта на вектор  $K$  чувствительности интерферометра, который определяется как разность направлений векторов освещения и наблюдения рассматриваемой точки объекта.

Для повышения контраста интерференционной картины в компьютер обычно вводятся два кадра усредненных изображений вида (3), которые отличаются тем, что фаза опорного пучка в одном из них смещена на  $\pi$ . Вычитание этих изображений по модулю позволяет устранить в (3) постоянную составляющую  $(I_s + I_o)$  и дает спекл-картину, распределение яркости в которой модулировано функцией Бесселя [3].

Функция  $J_0$  в данном случае описывает характерный вид регистрируемых интерференционных полос. В голографической интерферометрии такая функция называется характеристической функцией интерферограммы [2]. Аргумент этой функции привязан к уровню амплитуды колебаний.

Если движение объекта во время регистрации носит более сложный характер, то более сложный вид будет иметь и характеристическая функция, рассчитываемая при взятии интеграла в (2). Например, для случая экспоненциально затухающих гармонических колебаний, т. е. когда функция движения имеет вид  $F(t) = \exp(-\beta t) \sin \omega t$ , где  $\beta$  – декремент затухания, характеристическая функция не имеет аналитического представления. Ее графическое представление, рассчитанное для голографической интерферометрии, приведено в [10].

Если объект участвует одновременно в нескольких колебательных процессах с выделяемыми независимыми временными функциями, то его характеристическая функция является произведением характеристических функций индивидуальных колебаний [2]. Например, если объект колеблется одновременно на двух различных формах колебаний, т. е.

$$F(t) = A_1 \cos(\varpi_1 t + \theta_1) + A_2 \cos(\varpi_2 t + \theta_2), \quad (4)$$

то его характеристическая функция, рассчитанная по формуле (2), будет иметь вид

$$J_0\left(\frac{4\pi A_1}{\lambda}\right)J_0\left(\frac{4\pi A_2}{\lambda}\right). \quad (5)$$

Вид картины таких полос достаточно сложен. Результирующая картина подобна результату наложения друг на друга двух картин, описывающих каждое из колебаний.

Если колеблющаяся поверхность в течение времени формирования кадра освещается двумя короткими лазерными импульсами, длительность которых существенно меньше периода колебаний, то регистрируется интерференционная картина, распределение яркости в которой зависит от разности фаз колебаний поверхности в моменты лазерных импульсов. Однако, как и в методе усреднения, контраст интерференционной картины при таком способе регистрации мал. Для повышения контраста интерференционных полос обычно регистрируют два последовательных кадра, каждый из которых формируется своим лазерным импульсом. После вычитания этих кадров распределение яркости в спекл-картине будет привязано к разности фаз  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  колебаний объекта в моменты лазерных импульсов:

$$B(x, y) = 2\sqrt{I_o(x, y)I_s(x, y)}|\cos(\Delta\Psi/2)|, \quad (6)$$

где  $\Delta\Psi$  определяется как

$$\Delta\Psi = \frac{4\pi A(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)}{\lambda}. \quad (7)$$

Так же, как и метод усреднения во времени, двухимпульсный метод применяется, в основном, для исследования синусоидальных колебаний объектов. Если исследуемый объект колеблется на резонансной частоте, то первый импульс обычно формируется, когда поверхность находится в нулевой фазе колебаний, а второй - в положении своего максимального отклонения. В этом случае зарегистрированное распределение яркости интерферограммы будет соответствовать распределению амплитуд колебаний по поверхности, поскольку разность фаз связана с проекцией амплитуды колебаний на вектор чувствительности интерферометра:  $\Delta\Psi = 4\pi A/\lambda$ .

Если колебания объекта носят сложный характер, то интерферограмма, полученная вычитанием интерференционных картин, зарегистрированных двухимпульсным методом, будет показывать только изменение фаз колебаний поверхности, произошедшее за время между лазерными импульсами. Естественно, интерферограммы, соответствующие разным временным интервалам между импульсами, будут существенно отличаться. Используя серию парных лазерных импульсов, можно получить последовательный ряд интерференционных картин, которые могут дать только некоторое представление о характере колебаний исследуемой поверхности, но не могут полностью описать сложный колебательный процесс.

Положим, что исследуемый объект, возбуждаемый прикладываемой к нему нагрузкой, вибрирует одновременно на  $N$  синусоидальных модах. В этом случае его функция движения имеет вид

$$F(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \theta_n). \quad (8)$$

Пусть опорный пучок модулируется по амплитуде гармонической функцией  $S(t) = \sin(\omega t)$ . Интерференционная картина, регистрируемая телевизионной камерой в каждый момент времени  $t$ , в этом случае имеет вид

$$I_t(x, y) = I_o(x, y)\sin^2(\omega t) + I_s(x, y) + 2\sqrt{I_o(x, y)I_s(x, y)}\sin(\omega t)\cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_s(x, y) + \frac{4\pi}{\lambda}\sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \theta_n)]. \quad (9)$$

Телевизионная камера усредняет эту картину. Первые два члена выражения (9) суть постоянные, распределение яркости на мониторе будет определяться интерференционным членом

$$B(x, y) \approx \frac{2}{T}\sqrt{I_o(x, y)I_s(x, y)} \times \int_0^T \sin(\omega t)\cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_s(x, y) + \frac{4\pi}{\lambda}\sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \theta_n)]dt. \quad (10)$$

Для вычисления интеграла в (10) переписав подынтегральное выражение в комплексном виде и для краткости записи положим, что разность фаз опорного и объектного пучков ( $\varphi_0 - \varphi_s$ ) в стационарном состоянии в рассматриваемой точке изображения равна нулю:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \exp(-i\omega t) \exp\left[i \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \theta_n)\right] dt. \quad (11)$$

Используя тождество [11]

$$\exp(iz \cos \Omega) = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} J_m(z) \exp(im\Omega),$$

интеграл (11) можно представить в виде

$$\frac{1}{T} \int_0^T \exp(-i\omega t) \prod_{n=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m\left(\frac{4\pi}{\lambda} A_n\right) \exp[im(\omega_n t + \theta_n)] dt. \quad (12)$$

Интегрирование проведем в предположении, что длительность формирования кадра изображения велика по сравнению с периодами модуляции пучков  $2\pi/\omega$  и периодами колебаний  $2\pi/\omega_n$ . В этом случае при интегрировании члены за исключением тех, в которых частота модуляции  $\omega$  совпадает с одной из частот  $m\omega_n$  колебаний, обращаются в нуль. Ненулевой вклад в (12) вносят только интегралы, для которых

$$\frac{1}{T} \int_0^T \exp[i(m\omega_n - \omega)t] dt = \delta(m\omega_n - \omega), \quad (13)$$

где  $\delta$  – дельта-функция Дирака.

В результате получим, что если объект не имеет кратных собственных частот  $\omega_n$  колебаний и частота  $\omega$  модуляции совпадает с этой собственной частотой ( $m=1$ ), то в компьютер вводится изображение, распределение яркости в котором зависит от амплитуд колебаний объекта на этой частоте:

$$B(x, y) \approx 2\sqrt{I_s(x, y)I_0(x, y)} J_1\left(\frac{4\pi A_n}{\lambda}\right) \cos[\varphi_s(x, y) - \varphi_0(x, y)]. \quad (14)$$

Из (14) видно, что эта зависимость определяется функцией Бесселя первого порядка.

Вычитанием друг из друга изображений вида (14), у которых фаза опорного пучка отличается на  $\pi$ , можно устранить постоянные составляющие яркости в изображении и получить спеклограмму, яркость которой так же, как и в традиционном методе усреднения во времени, будет определяться уровнем амплитуд колебания точек поверхности.

Таким образом, модулируя амплитуду излучения лазера на одной из собственных частот колебаний объекта, возбуждаемого приложенной нагрузкой в широком спектре частот, можно зарегистрировать распределение амплитуд колебаний объекта на этой частоте. Знание распределения амплитуд колебаний на каждой из собственных частот позволяет полностью описать характер колебаний объекта под действием приложенной к нему нагрузки.

Блок-схема спекл-интерферометра, реализующего разработанный метод регистрации колебаний объекта, приведена на рис. 1.

Поверхность колеблющегося объекта 9 освещается когерентным пучком света от лазера 1. Соответствующая система 7 формирует такой пучок. Опорный пучок, выделяемый светоделителем 6, зеркалом 4 направляется в систему формирования 8, которая позволяет сфокусировать его в плоскости диафрагмы объектива телекамеры. Расходимость пучка устанавливается такой, чтобы он полностью освещал светочувствительную матрицу телекамеры 13. Светоделитель 12, установленный перед объективом телекамеры, сводит по оси объектива опорный и объектный пучки.

Вибродатчик 10, размещенный на поверхности исследуемого объекта, выдает сигнал отклика объекта на возбуждающее усилие. Этот сигнал поступает на спектральный анализатор 11. Как показано в [12], анализ спектра позволяет определить все возбуждаемые резонансные частоты в рабочем диапазоне частот. После того, как установлены резонансные частоты, на каждой из них проводится регистрация изображений. Для этого на электрооптический модулятор 5 с блока питания 2 подается управляющий сигнал на частоте, которая задается звуковым генератором 3 и равна одной из резонансных частот

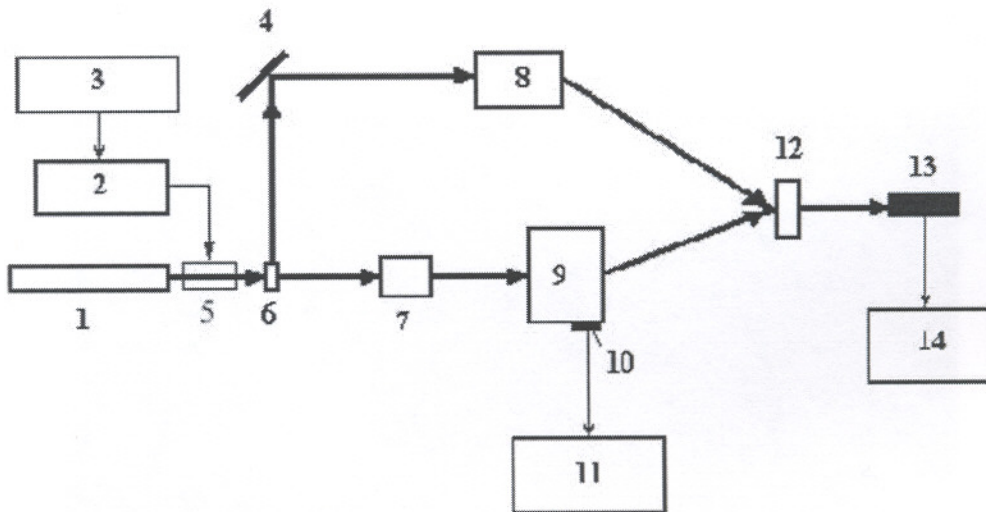


Рис. 1. Блок-схема цифрового интерферометра с модуляцией пучка: 1 – лазер; 2 – блок питания модулятора; 3 – звуковой генератор; 4 – поворотное зеркало; 5 – модулятор; 6 – светоделитель; 7 – формирователь предметного пучка; 8 – формирователь опорного пучка; 9 – объект; 10 – вибродатчик; 11 – анализатор спектра; 12 – система сведения пучков; 13 – цифровая телекамера; 14 – компьютер

колебаний объекта. Последовательность кадров вводится в компьютер 14 и обрабатывается. Результаты обработки в виде распределения яркости выводятся на монитор.

Была проведена экспериментальная проверка метода выделения частотных составляющих колебаний объекта, возбуждаемого широким спектром частот. В качестве объекта исследования использовалась рабочая лопатка компрессора газотурбинного двигателя.

Предварительно у лопатки были определены собственные частоты и формы колебаний. Лопатка закреплялась по замку в массивном приспособлении, в корпус которого был встроен пьезоэлектрический возбудитель колебаний, и размещалась на платформе спекл-интерферометра. На возбудитель колебаний подавался синусоидальный сигнал от звукового генератора. Микрофон, установленный вблизи пера лопатки, регистрировал

акустический отклик лопатки на возбуждающее усилие. Сигнал от микрофона поступал на осциллограф, на который также подавался сигнал от генератора, возбуждающего колебания. При сканировании частоты звукового генератора момент резонанса определялся по фигуре Лиссажу на экране осциллографа (сигнал отклика лопатки резко возрастал), резонансная частота фиксировалась частотомером. С помощью цифрового спекл-интерферометра на каждой резонансной частоте методом усреднения во времени регистрировалась форма колебаний. Подробно методика исследования резонансных колебаний описана в [3]. Исследования резонансных колебаний лопатки проводились в частотном диапазоне до 5 кГц. Зарегистрированные формы колебаний и соответствующие им частоты, за исключением колебаний лопатки по основному тону, приведены на рис. 2.

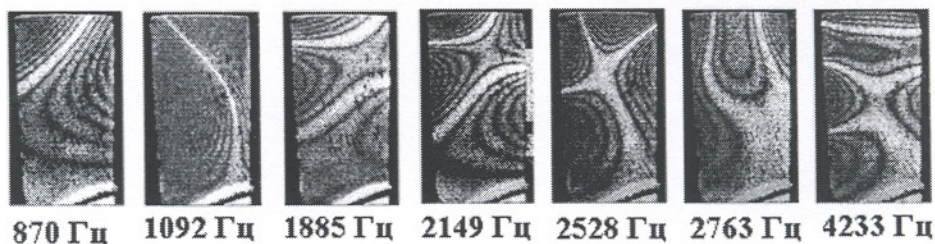


Рис. 2. Частоты и формы колебаний лопатки компрессора

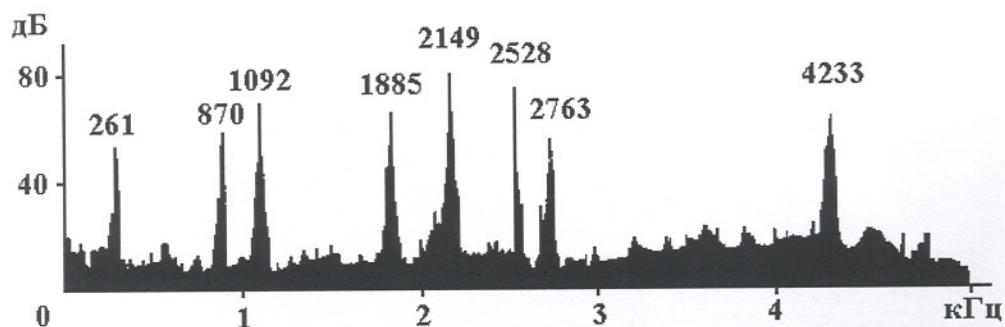


Рис. 3. Спектрограмма колебаний лопатки компрессора, возбуждаемой белым шумом

При исследовании колебаний лопатки при широкополосном возбуждении использовался генератор белого шума. Сигнал от генератора усиливался и поступал на пьезоэлектрический возбудитель колебаний. Спектр возбуждающего сигнала был ограничен частотно-передающей характеристикой усилителя (УМ-50), которая имеет резкий спад в области частот выше 6 кГц. Спектрограмма колебаний лопатки в диапазоне частот до 5 кГц, полученная при спектральном анализе сигнала, регистрируемого вибродатчиком, закрепленным на перо лопатки, приведена на рис. 3. На спектрограмме частоты максимальных уровней отклика лопатки на возбуждающее широкополосное усилие совпадают с резонансными частотами лопатки.

Регистрация отдельных частотных составляющих сложного колебательного процесса лопатки при широкополосном возбуждении осуществлялась цифровым спекл-интерферометром методом, описанным ранее. Однако с целью увеличения времени усред-

нения спекл-картины при подаче на электрооптический модулятор синусоидального сигнала с выбранной частотой регистрировалось последовательно несколько кадров спекл-изображений (в проведенном эксперименте 6 кадров). Эти кадры программно складывались. Затем фаза пучка смещалась, и вновь регистрировалось шесть последовательных кадров изображений. Эти кадры складывались, и результирующее изображение вычиталось по модулю из результата сложения первых шести кадров. Полученные таким образом интерференционные картины, зарегистрированные на частотах 2149 Гц и 4233 Гц, представлены на рис. 4.

Сравнение этих картин с интерференционными картинками соответствующих резонансных колебаний лопатки (рис. 2) показывает, что применение временной модуляции опорного и объектного пучков, а также статистическая обработка последовательности кадров позволяют выделить и зарегистрировать отдельные частотные составляю-

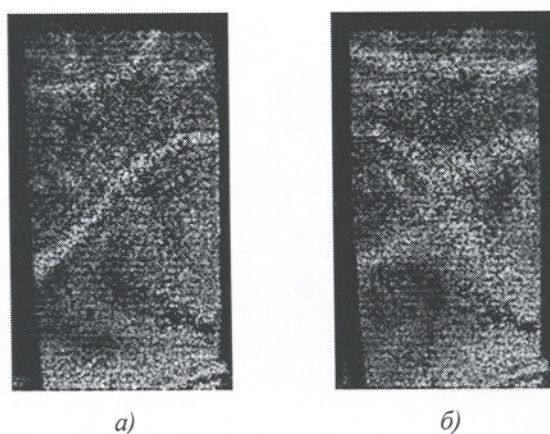


Рис. 4. Интерференционные картины лопатки, возбуждаемой белым шумом, зарегистрированные при синусоидальной модуляции пучков с частотой 2149 Гц (а) и 4233 Гц (б)

щие колебаний объекта, возбуждаемого широкополосной нагрузкой.

В результате выполненных исследований показано, что при широкополосном возбуждении элементы конструкции одновременно колеблются на многих резонансных частотах и, следовательно, собственных формах колебаний. При этом для малых амплитуд не происходит взаимного влияния собственных форм колебаний друг на друга. Таким образом, ЦСИ играет роль анализатора собственных форм линейных колебаний сложных конструкций.

#### Список литературы

1. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М., Мир, 1986.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
3. Еленевский Д. С., Шапошников Ю. Н. Лазерно-компьютерная система получения и анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов // Известия Самарского научного Центра РАН, 1999, № 1, с. 138.
4. Комаров С. Ю., Попов К. Н., Шапошников Ю. Н., Щеглов Ю. Д. Электронный спекл-интерферометр для определения вибрационных характеристик конструкций // Вибрационные машины и технологии / Сборник научных трудов. Курск, 2001, С. 99-103.
5. Pedrini G., Tiziani H.J., Zou Y. Digital Double Pulse-TV-Holography.- Opt. and Laser Eng. 1997. v. 26, p. 199.
6. [http://www.uni-stuttgart.de/ito/institut/Research\\_Fields/digholo/htm](http://www.uni-stuttgart.de/ito/institut/Research_Fields/digholo/htm).
7. [http://www.sensorsmag.com/articles/0699/0699\\_p16/main.html](http://www.sensorsmag.com/articles/0699/0699_p16/main.html)
8. Krupka R., Walz T., Ettemeyer A. New Techniques and Applications for 3D-Brake Vibration Analysis // SAE Brake Colloquium, San Diego, Oct. 1-4, 2000.
9. Pedrini G., Schedin S., Tiziani H.J. Pulsed Digital Holography Combined with Laser Vibrometry for 3D Measurements of Vibrating Objects. // Opt. and Lasers in Eng. Article in Press. 2002.
10. Gupta P.C., Singh K. Time-average Hologram Interferometry of Periodic, Noncosinusoidal Vibrations//Appl. Phys. 1975, v. 6, p. 233.
11. Смирнов В. Н. Курс высшей математики, т. 3, ч. 2. М.: Высшая школа, 1951, 531 с.
12. Еленевский Д. С., Шапошников Ю. Н. Исследование процессов звукоизлучения конструкций методами электронной спекл-интерферометрии // Известия Самарского научного Центра РАН, 2001, т. 3, № 2, 232 с.

### DIGITAL SPECKLE INTERFEROMETER FOR THE INVESTIGATION OF VIBRATION CHARACTERISTICS OF OBJECTS EXCITED SIMULTANEOUSLY AT SEVERAL FREQUENCIES

© 2003 V. P. Shorin, D. S. Elenevsky, O. A. Zhouravlev, S. Y. Komarov,  
Y. N. Shaposhnikov, Y. D. Shcheglov

Samara State Aerospace University  
Samara Scientific Research Center "APIDM"  
FSC "Motorostroitel", Samara

The paper deals with the problems to be solved for the creation of a digital speckle interferometer that makes it possible to study vibration of mechanical elements excited simultaneously at several frequencies. The method of registering specklograms has been developed on the basis of methods of holography and speckle-interferometry. Separate spectral components of surface oscillations in case of broadband object stimulation are shown. The method developed is based on time modulation of laser beams in the interferometer.