

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 681.7.069.24

В.А. Гречихин<sup>1</sup>, В.П. Маслов<sup>2</sup>, Б.И. Минеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: GrechikhinVA@mpei.ru*  
<sup>2</sup> *ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д.2,  
E-mail: gorchkov@ciam.ru, mineev@ciam.ru*

**АНАЛИЗ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ  
ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

**АННОТАЦИЯ**

Проведён анализ возможности использования оптического метода для высокоточного измерения параметров быстропеременного смещения оптической метки, нанесенной на образцовый камертон. Разработана предварительная математическая модель обработки информационного сигнала и проведено макетирование измерительной схемы. Проведены оценки чувствительности и погрешности метода.

**ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ,  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ**

**ВВЕДЕНИЕ**

Измерение динамических (быстропеременных) деформаций элементов конструкции газотурбинных авиационных двигателей и энергетических установок (газовых турбин) при их испытаниях позволяет получать важнейшую информацию о динамической прочности, надежности и ресурсе этих конструкций. В условиях постоянного повышения параметров рабочего процесса во вновь разрабатываемых газовых турбинах точная информация о динамических деформациях высоконапряженных деталей является крайне важной и актуальной.

Например, современные лопатки компрессора и турбины представляют собой сложные, трехмерные, облегченные конструкции, испытывающие высокие силовые и тепловые нагрузки в условиях наличия высокоамплитудных виброколебаний. При этом наблюдаются различные моды колебаний лопаток со своими частотами и своим распределением амплитуд деформаций. Измерение динамических деформаций во время испытаний газовых турбин позволяет определить наиболее критичные места конструкции лопаток с точки зрения их прочности и внести соответствующие изменения в конструкцию.

В качестве первичных преобразователей используются тензорезисторы, приклеиваемые к исследуемой детали. Несмотря на важность измерений динамических деформаций, современное метрологическое обеспечение этих измерений далеко от совершенства. Для тензорезисторов коэффициент преобразования деформации в сигнал надежно определяется только в статических условиях. Для того чтобы определить изменение коэффициента преобразования в зависимости от частоты вибронгрузки (возникающее из-за инерционности тензодатчика) на авиадвигателестроительных предприятиях используется методика, разработанная в ЦИАМ еще в прошлом веке. Тензодатчик наклеивается на ножку камертона

и определяется коэффициент преобразования измеряемой деформации в сигнал тензодатчика при изгибных колебаниях ножки камертона. При этом амплитуда деформации определяется расчетным способом по параметрам вибрации, которые измеряются недостаточно точно. Коэффициент преобразования для тензодатчика в этом случае определяется только для одной «камертонной» частоты, хотя виброколебания лопаток характеризуются достаточно широким спектром с несколькими резонансами и их гармониками.

На данном этапе работы проведён анализ возможности использования оптического метода [1] для высокоточного измерения параметров быстропеременного смещения оптической метки, нанесенной на образцовый камертон. Разработана предварительная математическая модель обработки информационного сигнала и проведено макетирование измерительной схемы. Проведены оценки чувствительности и погрешности метода.

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Для экспериментальной проверки метода была собрана экспериментальная установка, включающая в себя ЛДА с электронным блоком гетеродинамирования, цифровой осциллограф и исследуемый образец, в качестве которого был взят образцовый камертон, используемый при динамической калибровке тензорезисторов. К поверхности камертона был приклеен сферический рассеиватель. Оптическая схема ЛДА юстировалась таким образом, чтобы рассеиватель находился в измерительном объеме ЛДА. Разность частот зондирующих пучков составляла 40 МГц за счет пропускания одного из них через ячейку Брэгга. Эксперимент заключался в записи сигнала на выходе электронного блока ЛДА для случаев неподвижного и колеблющегося рассеивателя. Колебания рассеивателя вызывались путем ударного возбуждения камертона и регистрировались на частотах 130 и 810 Гц. Сигнал на выходе электронного блока ЛДА  $u(t)$  имел несущую частоту 2 кГц и оцифровывался с периодом дискретизации  $\Delta=20\text{мкс}$ . При этом модель сигнала на выходе блока преобразования частоты имеет вид:

$$u(t) = U_m \cos[\omega t + m_1 \cdot \sin(\Omega_1 t + \Phi_1) + m_2 \cdot \sin(\Omega_2 t + \Phi_2) + \varphi],$$

где  $m_1 = \frac{2\pi L_1}{\Lambda}$ ,  $m_2 = \frac{2\pi L_2}{\Lambda}$ ,  $\Lambda$  – период интерференционной картины в области измерительного объема ЛДА,  $L_1$  и  $L_2$  – амплитуды колебаний на частотах  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  соответственно.

На рис.1 приведена временная диаграмма отсчетов сигнала  $u_k$  для случая неподвижного камертона. Видно, что в сигнале вследствие сетевых наводок присутствуют паразитные периодические составляющие на гармониках частоты 50 Гц.

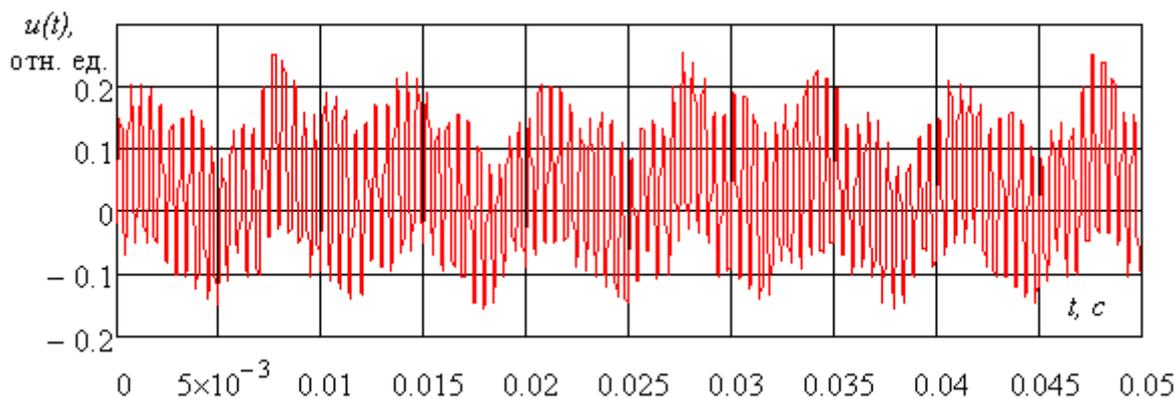


Рис. 1. Временная диаграмма сигнала для случая неподвижного камертона

На рис.2 приведена временная диаграмма сигнала от колеблющегося рассеивателя, регистрируемого после возбуждения колебаний камертона. Видно, что сигнал также содержит паразитные сетевые наводки. Закон изменения во времени фазы сигнала приведен на рис.3.

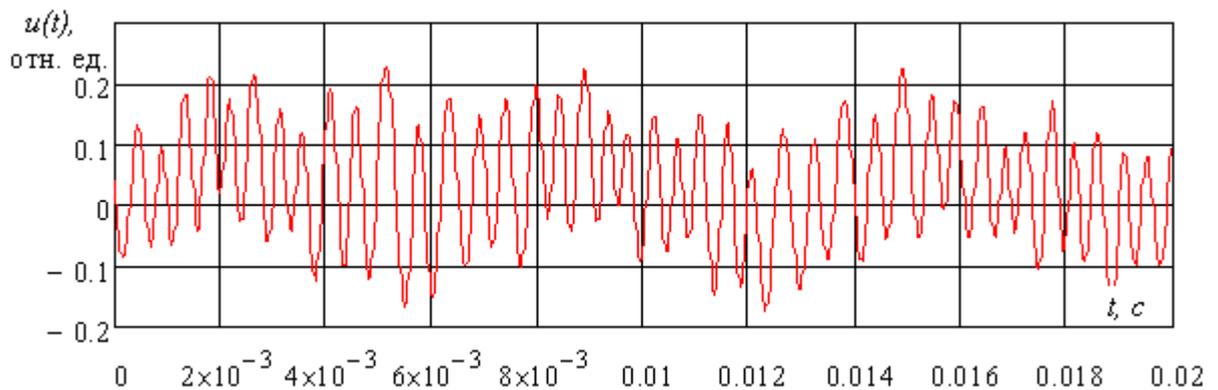


Рис. 2. Временная диаграмма сигнала для случая колеблющегося камертона

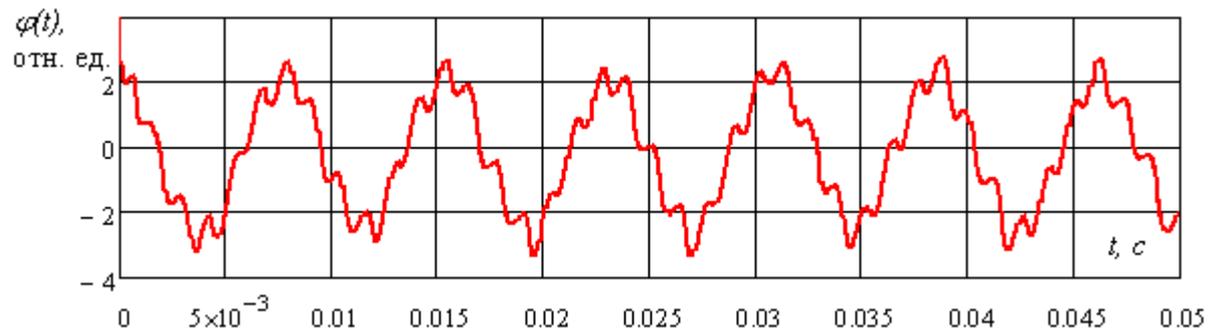


Рис. 3. Временная диаграмма флуктуаций фазы сигнала для случая колеблющегося камертона

Оценку характеристик вибросмещения можно получить при анализе спектра флуктуаций фазы [2]. График модуля спектральной плотности флуктуаций фазы сигнала от колеблющегося рассеивателя приведен на рис.4. Из анализа рисунка видно, что колебания рассеивателя происходят на двух частотах, а относительная амплитуда вибросмещения составляет на частоте 130 Гц значение  $L_1/\Lambda=0,37$ , а на частоте 810 Гц -  $L_2/\Lambda=0,078$ .

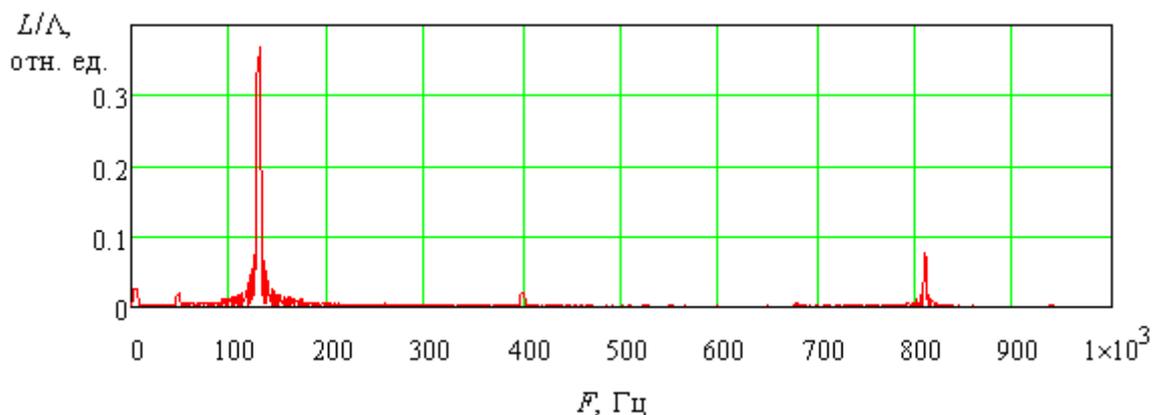


Рис. 4. Модуль спектральной плотности флуктуаций фазы сигнала для случая колеблющегося камертона

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕТОДА

Для исследования характеристик погрешности, имеющей место для заданных условий эксперимента, была введена модель смеси сигнала и аддитивного гауссова шума, близкая по своим параметрам к экспериментальному сигналу, приведенному на рис.2.

Параметры модели выбирались из следующих условий:

- приближенное равенство амплитуд гармоник несущей частоты модели и экспериментального сигнала;
- приближенное равенство амплитуд гармоник боковых частот спектра;
- приближенное равенство среднеквадратических значений (СКО) модельного и реального шума в полосе сигнала.

Найденные по данным критериям значения параметров сигнала составили:

- амплитуда сигнала  $U_m = 0,13$  отн. ед.;
- СКО шума в полосе сигнала  $\sigma = 0,025$  отн. ед.;
- отношение сигнал-шум  $U_m/\sigma = 5$  в полосе от 0 до 25 кГц;
- частота несущей  $\omega = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ;
- частоты виброколебаний  $\Omega_1 = 2\pi \cdot 130 \text{ с}^{-1}$ ,  $\Omega_2 = 2\pi \cdot 810 \text{ с}^{-1}$ ;
- индексы угловой модуляции  $m_1 = 2\pi \cdot 0,37$ ,  $m_2 = 2\pi \cdot 0,1$ ;
- начальные фазы модулирующего и несущего колебаний выбраны равными  $\Phi_{1,2} = 2$  рад,  $\varphi = -3,5$  рад.

Моделирование реализации проводилось с теми же параметрами устройства регистрации, что и в эксперименте:

- объем выборки  $N = 16384$ ;
- период дискретизации  $T_d = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ;
- длительность обрабатываемой реализации  $T_r \approx 0,33 \text{ с}$ .

Анализ спектра сигнала показал, что его спектр несимметричен (уровни соответствующих гармоник боковых частот различны на частотах больше частоты несущей и меньше нее). Такие искажения в спектре сигнала могут быть объяснены наличием на выходе блока понижения частоты фильтра низких частот с недостаточно широкой полосой пропускания. Было смоделировано искажение сигнала фильтром низких частот (ФНЧ), аналогичное искажениям в экспериментальном сигнале. Для моделирования искажений использовался активный фильтр Баттерворта 4-го порядка с частотой среза 2150 Гц и коэффициентом передачи 1,2 в области низких частот. График амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра  $|K(f)|$  приведен на рис.5.

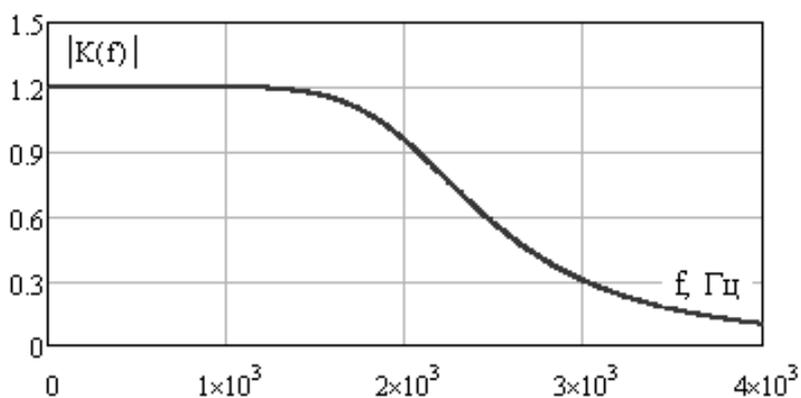


Рис. 5. График АЧХ фильтра Баттерворта низких частот

Перед оценкой параметров сигнала для снижения влияния шума проводилась фильтрация гармоник спектра полосовым фильтром с полосой от 300 Гц до 4 кГц. В результате статистических испытаний модели сигнала (усреднение по 40 реализациям) были получены следующие статистические характеристики погрешностей оценки значений  $L_1/\Lambda$  и  $L_2/\Lambda$ :

Оценка  $L_1/\Lambda$ :

- среднее значение относительной погрешности оценки  $L_1/\Lambda$   $\delta_{\text{ср1}} = -0,1 \%$ ;
- СКО относительной погрешности оценки  $L_1/\Lambda$   $\sigma_{\text{ср1}} = 0,027 \%$ ;

- интервальная оценка  $\delta_1 = (-0,10 \pm 0,08) \%$  при доверительной вероятности  $P_d=0,997$ .

Оценка  $L_2/\Lambda$ :

- среднее значение относительной погрешности оценки  $L_2/\Lambda$   $\delta_{ср2} = -2,12 \%$ ;

- СКО относительной погрешности оценки  $L_2/\Lambda$   $\sigma_{ср2} = 0,073 \%$ ;

- интервальная оценка  $\delta_2 = (-2,1 \pm 0,2) \%$  при доверительной вероятности  $P_d=0,997$ .

Результаты показывают, что систематическая составляющая погрешности измерений оказывается существенной на частоте виброколебаний 810 Гц.

Полученные при моделировании результаты позволили осуществить коррекцию искажений экспериментального сигнала, приведенного на рис. 2. Сигнал был пропущен через фильтр с АЧХ, обратной частотной характеристике искажающего фильтра. Спектр полученного сигнала приведен на рис.6.

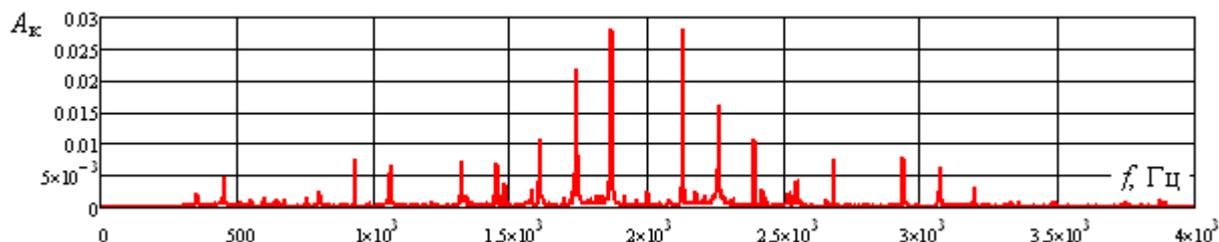


Рис. 6. Спектр сигнала на выходе корректирующего фильтра

Видно, что на выходе корректирующего фильтра уровни гармоник  $A_k$  боковых частот спектра сигнала выравниваются, что позволяет говорить о возможности коррекции искажений, обусловленных экспериментальной установкой. В случае устранения искажающего действия фильтра погрешность измерения относительной амплитуды существенно снижается.

Методом статистических испытаний при усреднении по 40 реализациям установлено, что для модельного сигнала характеристики оценки  $L_2/\Lambda$  становятся равными:

- среднее значение относительной погрешности оценки  $L_2/\Lambda$   $\delta_{ср2} = -0,26 \%$ ;

- СКО относительной погрешности оценки  $L_2/\Lambda$   $\sigma_{ср2} = 0,082 \%$ ;

- интервальная оценка  $\delta_2 = (-0,26 \pm 0,25) \%$  при доверительной вероятности  $P_d=0,997$ .

Если до коррекции искажений экспериментального сигнала оценки относительных амплитуд виброколебаний составляли  $L_1/\Lambda=0,37$ , а  $L_2/\Lambda=0,078$ , то после коррекции эти значения стали равными соответственно  $L_1/\Lambda=0,37$ , а  $L_2/\Lambda=0,09$ . Видно, что измеренная относительная амплитуда  $L_2/\Lambda$  стала ближе к значению параметра модели сигнала (для модели  $L_2/\Lambda=0,1$ ), выбираемой по критериям «близости» к экспериментальному сигналу. Данный результат косвенно подтверждает вывод о возможности и целесообразности использования предварительной коррекции спектра обрабатываемых сигналов перед началом процедуры оценки относительной амплитуды вибросмещения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований теоретически и экспериментально показана возможность оценки параметров быстропеременных вибросмещений оптической метки, нанесенной на поверхность образцового камертона. Погрешность метода для реальных условий эксперимента имеет параметры, достаточные для калибровки рабочих средств измерения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Застрогин Ю.Ф. и др.** Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования. – М.: Машиностроение. 1995. – 320с.

2. **Гречихин В.А.** Оценка относительной амплитуды вибросмещения в лазерном доплеровском виброметре // Автометрия. 2012, Т.48, № 3, С.33-38.

V.A. Grechikhin <sup>1</sup>, V.P. Maslov <sup>2</sup>, B.I. Mineev <sup>2</sup>,

<sup>1</sup> National research university "MPEI", Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14,  
E-mail: GrechikhinVA@mpei.ru

<sup>2</sup> "CIAM", 111116, Russia, Moscow, Aviamotornaya St., 2.  
E-mail: gorchkov@ciam.ru, mineev@ciam.ru

## **ANALYSIS OF THE MEASUREMENT METHOD OF FAST-VARIABLE DEFORMATIONS OF SOLID BODIES**

*The analysis of possibility of use of an optical method for high-precision measurement of parameters of fast-variable shift of the optical tag, which is put on the standard tuning fork, is carried out. The preliminary mathematical model of information signal processing is developed and the measuring scheme prototyping is carried out. The estimations of sensitivity and method errors are found.*

**OPTICAL METHOD OF FAST-VARIABLE DEFORMATIONS MEASUREMENT,  
EXPERIMENTAL INSTALLATION, MEASUREMENT ERRORS**