

УДК 681.7.069.24

В.А. Гречихин¹, В.П. Маслов², Б.И. Минеев², Б.С. Ринкевичюс¹, А.В. Толкачев¹

¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,*

111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: GrechikhinVA@mpei.ru

² *ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д.2,*

E-mail: mineev@ciam.ru

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ЛАЗЕРНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты исследования оптического лазерного метода измерения параметров быстропеременных деформаций, основанного на оценке вибросмещения оптических меток, нанесенных на поверхность ножки образцового камертона на небольшом расстоянии друг от друга. Проведено обоснование необходимости использования дифференциальной схемы измерения относительного вибросмещения оптических меток. Предложена оптическая схема лазерного дифференциального измерителя динамических деформаций на базе двухканального лазерного доплеровского анемометра.

**ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ,
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ
СХЕМА, ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ, АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ
СИГНАЛОВ**

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения бесконтактных измерений параметров вибросмещений узлов машин и механизмов широко применяются устройства, принцип действия которых основан на использовании доплеровского сдвига частоты электромагнитных колебаний для регистрации движения участков поверхности контролируемого объекта. К таким устройствам, в частности, относятся лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) [1].

Начиная с 90-х годов прошлого столетия, в МЭИ активно проводятся работы по созданию оптико-электронных датчиков скорости потоков жидкости и газа, основанных на применении полупроводниковых лазеров и элементов волоконной оптики [2], новых цифровых методов обработки интерференционных и доплеровских сигналов лазерных информационно-измерительных систем [3-7]. Разработанные в МЭИ лазерные оптико-электронные датчики и аппаратно-программные средства ввода и обработки данных позволяют регистрировать виброколебания поверхностей объектов, а также гидроакустические колебания с амплитудой в сотые доли микрона, исследовать их характер в режиме ударных воздействий. При этом область измерительного объема (область пространства, в которой в результате взаимодействия зондирующего излучения с исследуемым объектом формируется информационный сигнал), может быть сформирована с размерами в несколько десятков микрон, что позволяет проводить измерения с высоким

пространственным разрешением. Такое разрешение, в частности, дает возможность проводить измерения параметров быстропеременных упругих деформаций твердых тел [8,9]. Для проведения измерений амплитуды быстропеременных деформаций достаточно измерить амплитуды тангенциальной составляющей колебаний поверхности испытываемого образца в двух соседних точках. Для измерений амплитуд колебаний поверхности целесообразно использовать двухканальный гетеродинный лазерный доплеровский анемометр (ЛДА).

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Предлагаемый метод был реализован с использованием экспериментальной установки лазерного измерителя деформаций (ЛИД), включающей в себя двухканальный гетеродинный ЛДА с электронным блоком гетеродинирования, цифровой осциллограф и исследуемый образец, в качестве которого был взят образцовый камертон, применяемый при динамической калибровке тензорезисторов. К поверхности ножки камертона у её основания на расстоянии $l=7$ мм друг от друга были приклеены два сферических рассеивателя. Оптическая схема ЛИД юстировалась таким образом, чтобы каждый из рассеивателей находился в измерительном объеме своего канала ЛИД. Разность частот зондирующих пучков в каждом из каналов составляла 40 МГц за счет использования акустооптического модулятора на базе ячейки Брэгга. В ходе экспериментов проводилась запись сигналов с выходов электронных блоков каналов ЛИД. Колебания рассеивателей вызывались путем ударного возбуждения камертона. Математическая модель сигналов на выходах электронных блоков каждого из каналов имеет вид:

$$u(t) = U_m \cos[\omega t + m \cdot \sin(\Omega t + \Phi) + \varphi],$$

где ω – частотный сдвиг, задаваемый электронным блоком, $m = 2\pi L/\Lambda$, Λ – период интерференционной картины в области измерительного объема, L – амплитуда вибро смещений рассеивателя соответствующего канала. Доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала, определяется соотношением

$$\omega_d(t) = m\Omega \cdot \cos(\Omega t + \Phi).$$

Проводя оценивание информационных параметров m_1 и m_2 в каждом из каналов ЛДА, можно определить амплитуды вибро смещений рассеивателей.

Алгоритм обработки сигналов на выходах электронных блоков каналов заключается в восстановлении гармонического закона изменения начальной фазы каждого из сигналов и измерении амплитуды вибро смещений обоих рассеивателей $L_{1,2} = m_{1,2}\Lambda_{1,2}/(2\pi)$ спектральным методом. Оценка относительной деформации рассчитывается как отношение разности амплитуд вибро смещений рассеивателей к расстоянию между ними.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментальной проверки рассматриваемого метода были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых оценивались относительные деформации образца на трех различных частотах. Результаты измерений сравнивались с показаниями тензорезистора, приклеенного к ножке камертона на одном уровне с рассеивателями.

На рис. 1 приведен сигнал первого канала ЛИД, полученный с использованием камертона с частотой колебаний около 130 Гц. Несущая частота сигнала – 20 кГц. На рис. 2 приведена спектральная диаграмма сигнала. На рис. 3 приведена временная диаграмма реконструированной фазы сигнала 1-го канала, а на рис. 4 – выходной сигнал тензометрического датчика. Из сравнения рисунков легко видеть, что фаза сигнала канала ЛИД и сигнал на выходе схемы тензодатчика меняются синхронно во времени. Оценка амплитуды вибро колебаний по данным ЛИД проводится спектральным методом. График модуля спектра вариаций реконструированной фазы сигнала 1-го канала приведен на рис. 5.

Аналогично находится оценка амплитуды сигнала тензодатчика, пропорциональной амплитуде деформации. Спектр сигнала на выходе схемы с тензорезистором приведен на рис. 6.

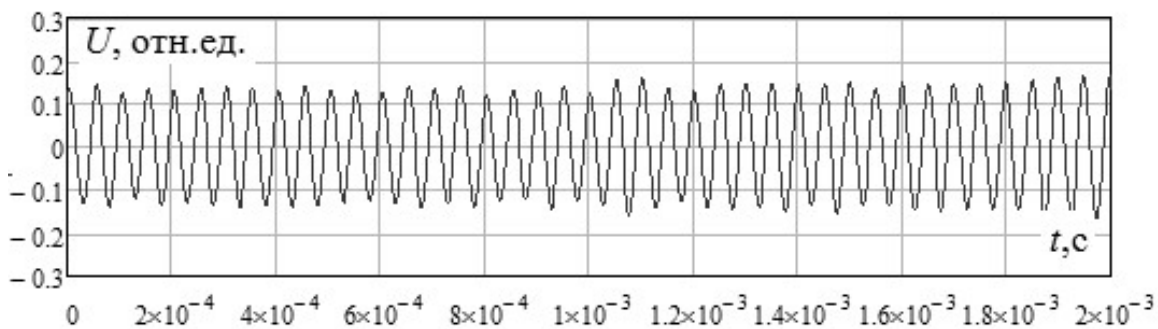


Рис.1. Сигнал первого канала ЛДА, частота 130 Гц

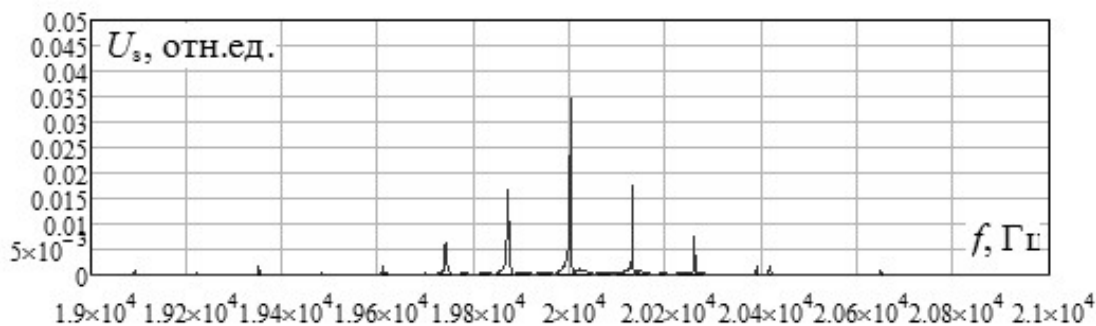


Рис.2. Спектральная диаграмма сигнала первого канала ЛДА, частота 130 Гц

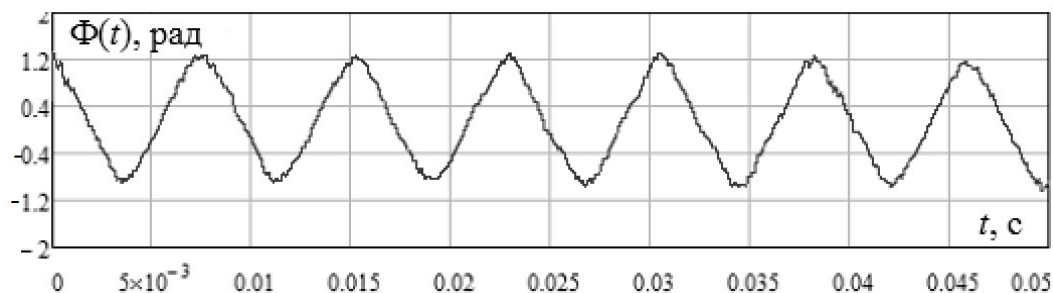


Рис. 3. Временная диаграмма реконструированной фазы сигнала 1-го канала, частота 130 Гц

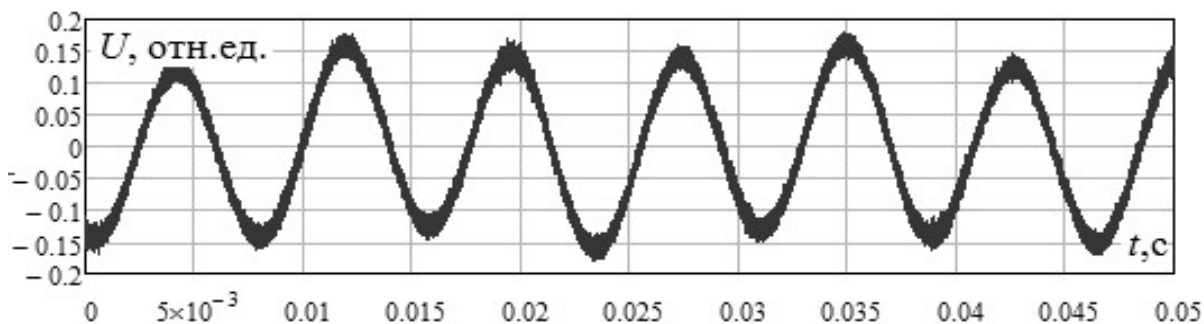


Рис. 4. Выходной сигнал схемы тензодатчика

В проведенных экспериментах использовалась оптическая схема ЛДА, в которой период

интерференционного поля в области измерительных объемов составлял 13,6 мкм. Эксперименты по измерению деформации одновременно двумя методами проводились с использованием камертонов с частотами колебаний 130 Гц, 2 кГц и 4 кГц. Относительная деформация образца рассчитывалась по формуле $d=(L_2-L_1)/l$, где L_1 и L_2 – амплитуды колебаний рассеивателей 1-го и 2-го каналов, l – расстояние между рассеивателями. Коэффициент преобразования K напряжения U на выходе схемы тензодатчика в деформацию d рассчитывался, исходя из соотношения $d = K \cdot U$ по измеренным значениям d и U на каждой из частот. Результаты измерений сведены в таблицу 2.1.

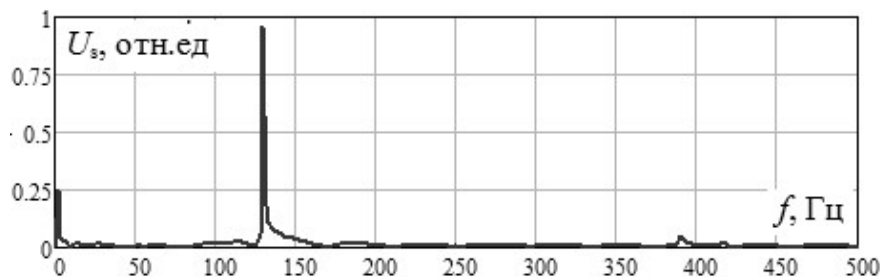


Рис. 5. Спектр фазы сигнала 1-го канала

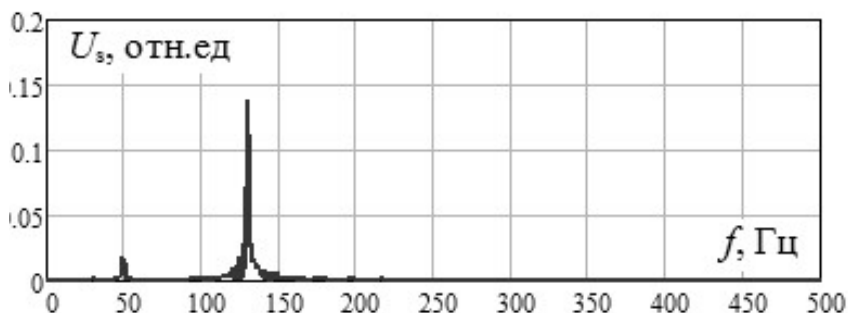


Рис. 6. Спектр сигнала на выходе схемы тензодатчика

Таблица. Результаты экспериментальной апробации метода калибровки

Частота колебаний, Гц	Амплитуда колебаний рассеивателя канала 1, мкм	Амплитуда колебаний рассеивателя канала 2, мкм	Расчетное значение относительной деформации	Выходное напряжение схемы тензодатчика, мВ	Коэффициент преобразования, В ⁻¹
130 Гц	2,53	3,15	$8,79 \cdot 10^{-5}$	42,3	$2,08 \cdot 10^{-3}$
2050 Гц	0,564	1,10	$7,64 \cdot 10^{-5}$	13,4	$4,18 \cdot 10^{-3}$
4100 Гц	0,356	0,553	$2,81 \cdot 10^{-5}$	5,6	$5,06 \cdot 10^{-3}$

Найденные по результатам измерений на трех частотах виброколебаний значения коэффициента преобразования K являются калибровочными константами, которые должны были позволить оценивать амплитуды деформаций объектов на данных частотах с использованием калибруемых тензометрических датчиков.

Однако проведенные дополнительные исследования показали, что статистические характеристики полученных результатов измерений не позволяют дать достаточно достоверной оценки значений коэффициентов преобразования. При проведении статистических испытаний оказалось, что среднее квадратическое отклонение (СКО)

результатов измерений относительной деформации при имеющихся нагрузках оказывается сравнимым с их средним значением, что не удовлетворяет поставленным требованиям к точности измерений. Недопустимо большая относительная погрешность измерений имеет место вследствие того, что окончательный результат находится в процессе косвенного измерения, при котором абсолютная деформация рассчитывается как разность амплитуд вибросмещений рассеивателей. При этом указанная разность оказывается настолько малой, что становится сравнимой с погрешностью измерения амплитуд вибросмещений рассеивателей. Выходом из создавшегося положения является организация дифференциальной схемы измерения, при которой информационным параметром сигнала на выходе фотоприемника является разность амплитуд вибросмещений.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Для реализации дифференциального лазерного метода измерения деформаций была разработана модифицированная схема двухканального ЛДА, на выходе которой формировался сигнал с составляющей, содержащей доплеровскую добавку, равную разности доплеровских сдвигов частоты, вызванных колебаниями каждого из рассеивателей. Проводя обработку выходного сигнала фотоприемника с применением того же алгоритма, что и в вышерассмотренной схеме, можно получить оценку разности амплитуд вибросмещений рассеивателей, с использованием которой далее провести расчет относительной деформации.

Принцип измерений был проверен на численной модели аппаратно-программного комплекса. На рис. 7 приведена осциллограмма сигнала, полученного на выходе фотоприемника в результате когерентного смешения на его фотокатоде четырех рассеянных волн, содержащих доплеровские сдвиги частоты. Доплеровские сдвига формировались программно с использованием в качестве источника вибросмещения модели камертона с частотой колебаний около 130 Гц. Сигнал содержит спектральные составляющие частот, равных частотам гетеродинов в каналах ЛИД, а также составляющую разностной частоты гетеродинов 20 кГц, несущую полезную информацию.

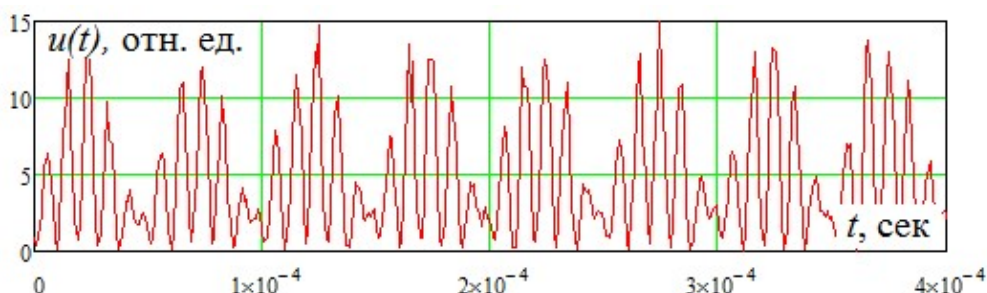


Рис.7. Сигнал с выхода фотоприемника схемы лазерного дифференциального измерителя деформаций, частота виброколебаний 130 Гц

На рис. 8 приведена спектральная диаграмма сигнала. Временная диаграмма реконструированного закона изменения фазы сигнала приведена на рис. 9. Оценка амплитуды абсолютной деформации проводится, как и ранее, путем расчета модуля спектра вариаций реконструированной фазы сигнала, график которого приведен на рис. 10. При этом используется идеализированная модель деформации, в которой размещенные на деформируемой поверхности рассеиватели испытывают вибросмещения только в одной плоскости, нормальной к оптической оси приемной оптики. Проведенные на модели предварительные исследования показали, что погрешность оценки относительной деформации при отношении среднего значения сигнала к СКО дробового шума в полосе сигнала равном 10 и времени измерения, не превышающем 10 периодов виброколебаний, в

диапазоне относительных деформаций от $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ составляет около 1%. Для снижения погрешности необходимо увеличивать время измерений и мощность лазера.

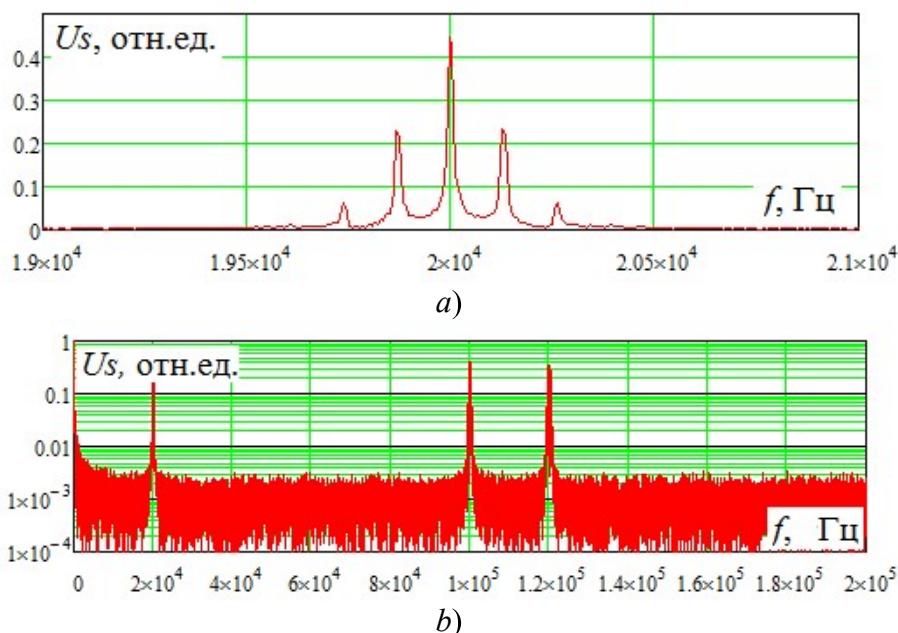


Рис.8. Спектральная диаграмма сигнала с выхода фотоприемника схемы лазерного дифференциального измерителя деформаций: *a* -участок спектра в области гармоника 20 кГц; *b* – полный спектр сигнала)

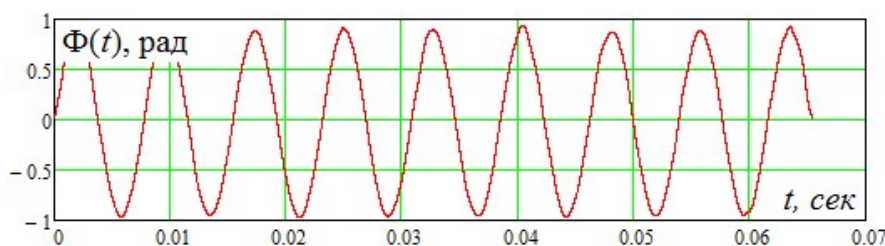


Рис. 9. Временная диаграмма реконструированной фазы сигнала с выхода фотоприемника схемы лазерного дифференциального измерителя деформаций

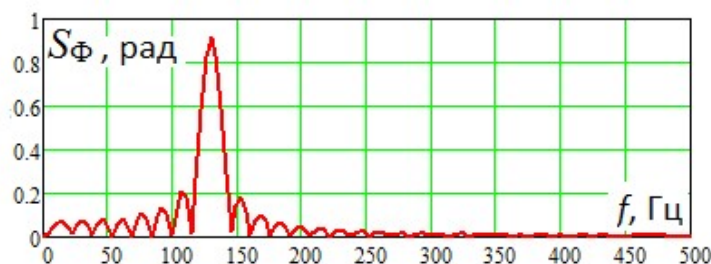


Рис. 10. Спектр фазы сигнала с выхода фотоприемника схемы лазерного дифференциального измерителя деформаций

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований теоретически и экспериментально показана возможность оценки параметров быстропеременных деформаций поверхности металлического образца при помощи нанесенных на поверхность оптических меток и модифицированной двухканальной схемы ЛИД. Разработана оптическая схема лазерного дифференциального измерителя деформаций и алгоритм обработки сигнала с выхода фотоприемника. Методом численного моделирования показано, что выходной сигнал фотоприемника содержит информацию о разности амплитуд вибросмещений меток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии/ С предисловием В.А.Фабриканта. – Москва, Наука, 1982, 304 с.
2. Гречихин В.А. Оценка относительной амплитуды вибросмещения в лазерном доплеровском виброметре // Автометрия. 2012, Т.48, № 3, С.33-38.
3. Grechikhin V. A. Zamolodchikov V. N., Smolskiy S. M. Application of wireless monitoring and communication systems in the power engineering // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2012.— № 3.— С. 3—10.
4. Smirnov V.I., Birukova O.V., Pechenuk V.A. // Measurements of turbulence by laser system with the hybrid fiber-optic sensor. In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Optical Methods of Flow Investigation. Ser. "Optical Methods of Flow Investigation" sponsors: SPIE Russia Chapter, Institute of Thermophysics, Siberian Branch, Russia, Moscow Power Engineering Institute Technical University, Russia, Moscow Committee for Science and Technology, Russia, Novosibirsk State Technical University, Russia. Moscow, 2006. С. 62620J.
5. Grechikhin V.A. Spectral estimates of the signal parameters of laser Doppler measuring systems // Measurement Techniques. 2010. Т. 53. № 9. С. 1021-1028.
6. Grechikhin V.A., Rinkevichius B.S. Hilbert transform for processing of laser Doppler vibrometer signals // Optics and Lasers in Engineering. 1998. Т. 30. № 2. С. 151-161.
7. Grechikhin V.A. Quasi-optimal processing of laser Doppler vibrometer signals // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2012. Т. 48. № 3. С. 244-249.
8. Гречихин В.А., Маслов В.П., Минеев Б.И. Анализ метода измерения быстропеременных деформаций твердых тел //Труды Двенадцатой Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», Москва, 25 — 28 июня 2013 г., [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон. дан. – М.: НИУ «МЭИ», 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад № 6-3, 6 с. – ISBN 978-5-91940-663-1 – № гос. регистрации 0321302584.
9. Маслов В.П., Минеев Б.И. Шатохин А.Г., Гречихин В.А. Новый лазерный интерференционный метод динамической калибровки тензорезисторов и его метрологические исследования //Мир измерений, 2014, № 10, С.11-15.

V.A. Grechikhin¹, V.P. Maslov², B.I. Mineev², B.S. Rinkevichius¹, A.V. Tolkachev¹

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

² "CIAM", 111116, Russia, Moscow, Aviamotornaya St., 2.
E-mail: mineev@ciam.ru

DIFFERENTIAL METHOD OF MEASUREMENT OF FAST-VARIABLE DEFORMATIONS OF SOLID BODIES BY LASER SET-UP OF THE MEASUREMENT OF DYNAMIC DEFORMATIONS

Results of a research of an optical laser method of the measurement of parameters of fast-variable deformations are given. The method is based on an estimation of vibroshifts of the two optical tags that fixed on the surface of a tuning fork at small distance between them. Justification of need of use of the differential measurement scheme of relative vibroshifts of optical tags is carried out. The optical scheme of the laser set-up of the measurement of dynamic deformations on the basis of the two-channel laser Doppler anemometer is offered.

OPTICAL METHOD OF MEASUREMENT OF FAST-VARIABLE DEFORMATIONS,
EXPERIMENTAL SET-UP, DIFFERENTIAL OPTICAL SCHEME, LASER SET-UP OF THE
MEASUREMENT OF DEFORMATION, ALGORITHM OF THE SIGNAL PROCESSING