

## КОМПЛЕКС ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ФОРМЫ ГИБКОЙ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ФОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.Ю. Поройков

poroykovay@gmail.com

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Разработан и построен комплекс для определения погрешности измерения методом корреляции фоновых изображений. Приведены функциональные схемы комплекса, подробно рассмотрены его составляющие, описаны их технические характеристики, а также электронного устройства управления комплекса. Приведен алгоритм работы комплекса и пример результатов его измерений. Комплекс позволяет определять погрешность (не более 0,075 мм) измерения деформаций амплитудой 20 мм на поверхности площадью  $380 \times 380 \text{ мм}^2$  с дискретностью 0,5 мм по горизонтали и вертикали и 0,001 мм по высоте

### Ключевые слова

Метод корреляции фоновых изображений, погрешность метода, программно-аппаратный комплекс

Поступила в редакцию 26.01.2017  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60026 мол\_а\_дк*

**Введение.** Проблема измерений деформаций встречается во многих отраслях науки и техники. Особенно часто в автомобильной промышленности, строительстве и авиации. В последнем случае, из-за ряда особенностей отрасли, изменение деформации носит жизненно важный характер.

Измерять деформации можно разными методами; условно они делятся на две группы: методы, использующие тензоэлектрические, пьезоэлектрические и механические датчики, и оптико-телевизионные методы.

В авиастроении в настоящее время появилась задача проведения исследований в натурном эксперименте [1, 2]. Для таких измерений большинство методов как первой, так и второй групп мало пригодно из-за следующих недостатков: локальность измерений, влияние факторов внешней среды на результаты измерений и необходимость использования сложных оптических систем.

Можно отметить работы отечественных авторов по разработке и применению видеограмметрических методов диагностики деформаций [3, 4]. Однако в данных работах измерения проводятся либо в другом масштабе, либо используется подход, основанный на отдельном измерении положения каждого маркера (отметки) на изображении. Для оценки погрешности применяется либо компьютерное моделирование, либо оценка инструментальной погрешности.

Метод корреляции фоновых изображений (МКФИ) — современный оптико-телевизионный метод измерения деформаций, основанный на цифровой обработке изображений (в англоязычной литературе Image Pattern Correlation Technique — IPCT) [5]. Его главные особенности — простота экспериментальной установки (требуется две цифровые камеры и компьютер), бесконтактность и использование современных алгоритмов обработки изображений. Поэтому этот метод наилучшим образом подходит для натуральных экспериментов.

Для определения смещений объекта на исследуемые участки его поверхности наносится специальное изображение — фоновый экран. С помощью цифровой камеры выполняют снимки фонового экрана до и после изменения состояния исследуемого объекта. Такие изображения называют экспериментальными картинками МКФИ. Дальнейшая кросскорреляционная обработка полученных изображений позволяет построить векторное поле смещений участков фонового экрана. Используя это поле, можно получить информацию о смещениях объекта.

Алгоритм метода включает следующие этапы.

- Нанесение фонового экрана (специального рисунка, зачастую состоящего из большого количества случайно расположенных черных точек на белом фоне) на исследуемую поверхность.
- Регистрация изображения фонового экрана в исходном состоянии исследуемой поверхности (опорное изображение).
- Регистрация изображения фонового экрана при деформации поверхности (измерительное изображение).
- Кросскорреляционная обработка полученных изображений, которая состоит из следующих действий: разбиение опорного и измерительного изображений на соответствующие прямоугольные участки, так называемые окна опроса; расчет для полученных участков корреляционной функции и поиск координат ее максимума с субпиксельной точностью [6].

Таким образом рассчитывается векторное поле смещений точек фонового экрана при деформации исследуемой поверхности.

Для восстановления 3D профиля поверхности используется стереопара видеокамер. Для каждой камеры алгоритм выполняется отдельно, а рассчитанные двумерные векторные поля с помощью процедуры калибровки сводятся в одно трехмерное векторное поле [7], которое и соответствует смещениям точек исследуемой поверхности в пространстве.

Хотя сам метод прост в реализации, анализ погрешности его измерений затруднен ввиду применения кросскорреляционной функции. Поэтому оценить погрешность с помощью прямых расчетов сложно. В основном для ее оценки применяют или оптогеометрические построения [8–10], или цифровое моделирование изображений с их последующей обработкой и сравнением полученных результатов с заложенными при моделировании параметрами [11, 12]. Однако указанные подходы не могут учесть все факторы, возникающие в натуральных экспериментах. Поэтому предлагается определять погрешность измерений прямым

сравнением результатов измерений МКФИ с результатами измерений, полученными другим методом. Этот подход позволит учесть все факторы, влияющие на погрешность, и оценить ее максимально точно.

**Методы решения.** Для автоматизации измерений было предложено создать программно-аппаратный комплекс автоматического определения погрешности МКФИ. Основная идея состоит в использовании поверхности, деформация которой происходит заданным образом (имитатора деформируемой поверхности), и высокоточного оптического датчика, с помощью которого можно измерить эту поверхность. Сравнивая результаты, полученные с помощью датчика и МКФИ, становится возможным определить абсолютную погрешность измерений метода в пределах погрешности датчика.

Для измерения всей поверхности одним датчиком предлагается использовать модули линейного перемещения с шаговыми двигателями. Перемещение оптического датчика над поверхностью в двух перпендикулярных направлениях позволит измерить расстояние до поверхности во всех ее точках с заданным шагом.

Рассматриваемый комплекс состоит из четырех составных частей: имитатора деформируемой поверхности, блока измерения расстояния до поверхности, электронного устройства управления и программного обеспечения для персонального компьютера. Функциональная схема комплекса приведена на рис. 1.

Имитатор деформируемой поверхности состоит из алюминиевого основания, на котором закреплены сервоприводы. Каждый сервопривод жестко соединен с участком гибкой пластины, расположенной над сервоприводами, площадью  $380 \times 380 \text{ мм}^2$ . Она выступает в роли деформируемой поверхности. Общее число сервоприводов — 16, они расположены равномерно по поверхности пластины. Изменение положения сервопривода приводит к пропорциональному смещению участка пластины над ним в вертикальном направлении. Амплитуда смещений для каждого сервопривода составляет 20 мм. Внешний вид имитатора деформируемой поверхности представлен на рис. 2.

Блок измерения расстояния до поверхности состоит из двух взаимно перпендикулярных модулей линейного перемещения PLLM-12. На них, в свою очередь, расположен оптический датчик расстояния LS5-40/50 фирмы НПП ПРИЗМА. Датчик на основе триангуляции отраженного от измеряемой поверхности лазерного луча измеряет расстояние до деформируемой поверхности с дискретностью 0,001 мм и с погрешностью не более  $\pm 0,075$  мм в диапазоне расстояний 50 мм и ближней границей до датчика 40 мм. Размер пятна лазерного луча датчика в середине диапазона измерений составляет 175 мкм и не превышает значения 300 мкм во всем диапазоне.

Электронное устройство управления является связующим звеном между имитатором деформируемой поверхности, блоком измерения расстояния до поверхности и персональным компьютером. Устройство позволяет задавать деформацию поверхности, изменяя положения сервоприводов, перемещать оптический датчик над поверхностью и измерять расстояние до нее в заданных точках.

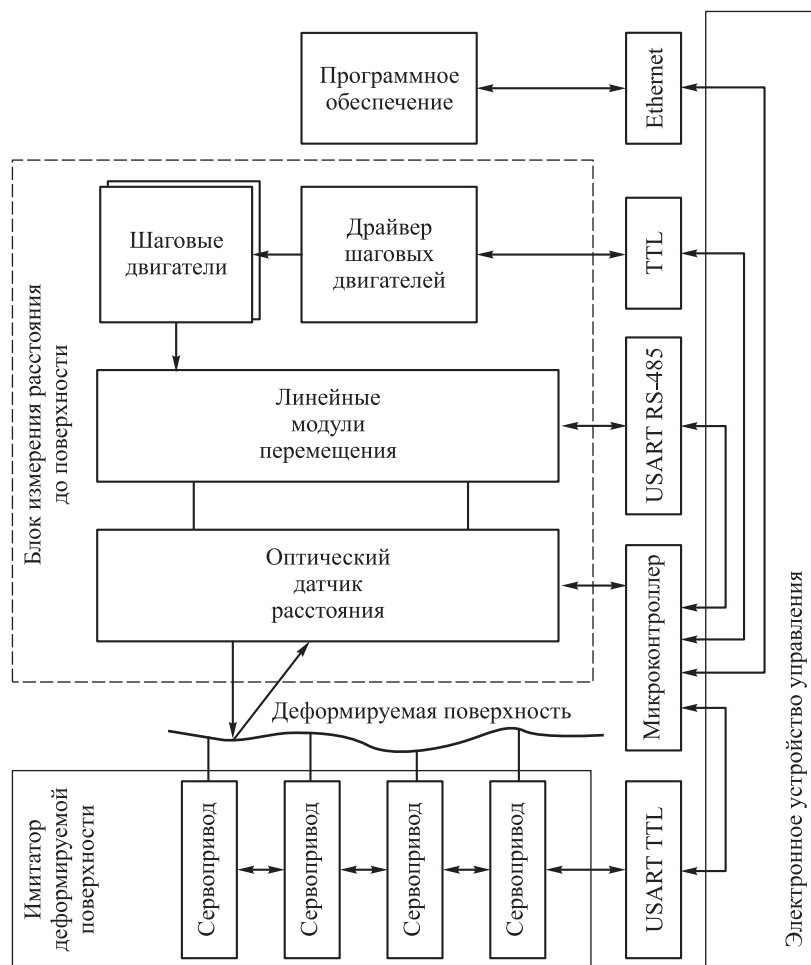


Рис. 1. Функциональная схема комплекса автоматического определения погрешности МКФИ

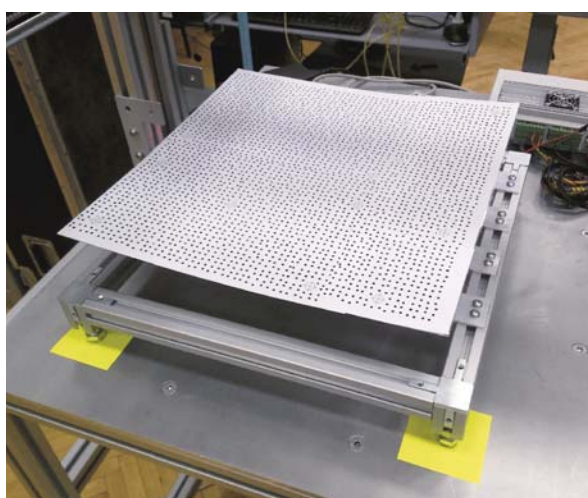


Рис. 2. Внешний вид имитатора деформируемой поверхности

Электронное устройство управления разрабатывалось с помощью современной электронной компонентной базы. Его основой служит микроконтроллер STM32F427 с максимальной тактовой частотой 180 МГц, 256 КБ встроенной RAM памяти и 2 МБ встроенной Flash памяти. Для связи с персональным компьютером используется интерфейс Ethernet на базе трансивера физического уровня Micrel KSZ8041TL. Для связи с оптическим датчиком используется интерфейс RS-485 на основе приемопередатчика TI SN65HVD1781. Управление контроллером шаговых двигателей проводится передачей ему импульсов прямоугольной формы число которых соответствует величине передвижения модулей в шагах двигателей. Связь с сервоприводами осуществляется по интерфейсу UART. Для связи с контроллером шаговых двигателей и сервоприводами используются преобразователи уровней напряжения TI TXS0104 и TXS0108.

Функциональная схема электронного устройства управления комплекса автоматического определения погрешности МКФИ приведена на рис. 3.

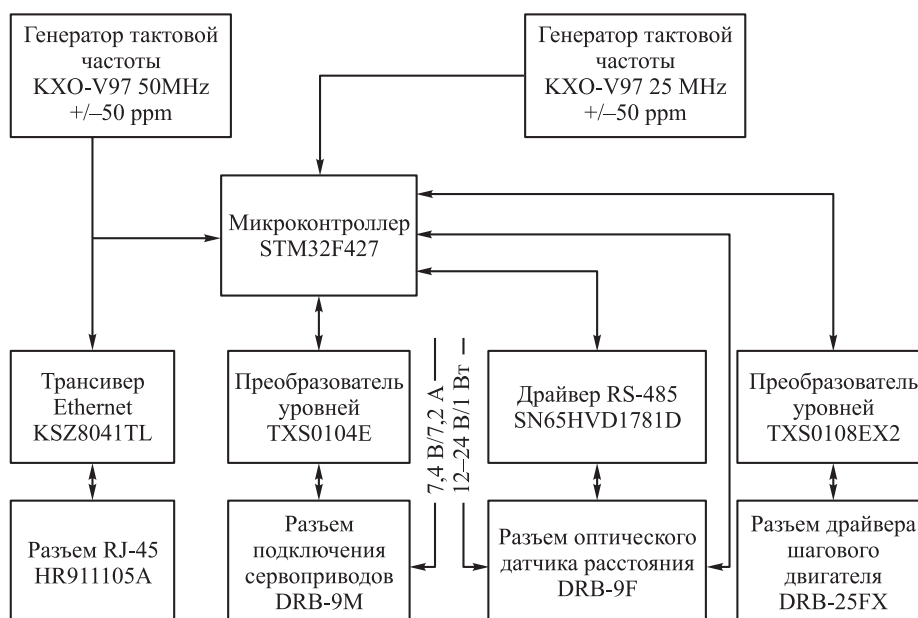


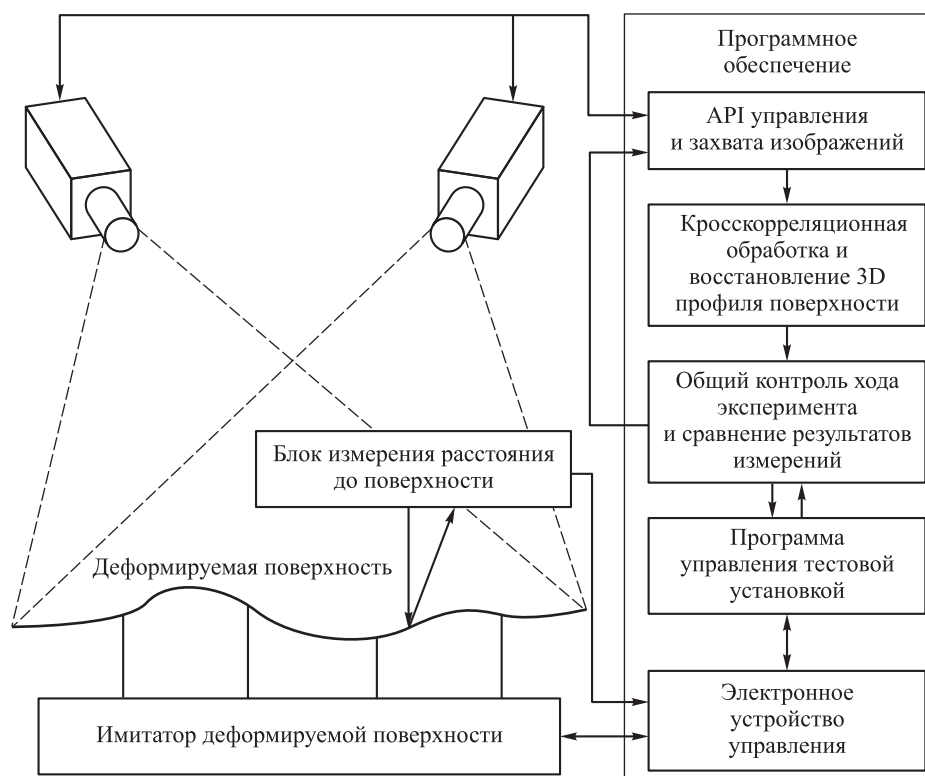
Рис. 3. Функциональная схема электронного устройства управления комплекса автоматического определения погрешности МКФИ

Программная часть предназначена для управления всей установкой в целом: задание положений сервоприводов (деформации объекта) и отображение результатов блока измерения расстояния до поверхности с помощью графического интерфейса.

Программная часть тестовой установки разрабатывалась на языке С для микроконтроллера STM32 на основе операционной системы реального времени FreeRTOS и на языке С# для персонального компьютера. Программа позволяет задавать положения каждого сервопривода отдельно и отображать измеренные датчиком расстояния значения расстояния до поверхности.

**Результаты.** Схема эксперимента для проведения измерений с помощью разработанного комплекса представлена на рис. 4. Рассмотрим алгоритм работы этого комплекса.

- Программное обеспечение случайным образом задает положение сервоприводов, формируя деформацию исследуемой поверхности на имитаторе.
- Изображения поверхности с двух цифровых видеокамер поступают на персональный компьютер, где они обрабатываются с помощью разработанного программного обеспечения, и восстанавливается профиль поверхности.
- Оптический датчик перемещается над поверхностью и измеряет расстояния до нее в нескольких заданных точках.
- Расстояния до поверхности в этих точках сравниваются с положением точек на восстановленном профиле поверхности. Таким образом, определяется искомая погрешность.



**Рис. 4.** Схема эксперимента для проведения измерений погрешности МКФИ

После записи экспериментальных данных цикл повторяется. Деформация поверхности случайным образом и многократное повторение измерений позволяют получить статистические данные о погрешности метода.

В эксперименте были использованы видеокамеры VLG-24M фирмы Baumer. Камера выполнена на основе КМОП матрицы Sony IMX249 размером 1/1,2" с разрешением 1920 × 1200 пикселей размером 5,86 × 5,86 мкм. Для захвата изоб-

ражений с цифровых камер был использован API, предоставляемый производителем камер — фирмой Baumer. Полученные изображения обрабатывались с помощью алгоритмов быстрого фурье-преобразования.

Перед проведением эксперимента выполняли процедуру калибровки камер. Она заключалась в нахождении наилучшей аффинной калибровочной матрицы, содержащей 11 параметров для одной камеры. Матрицу рассчитывали путем сопоставления не менее 12 точек с известными мировыми координатами с 12 точками на изображении, получаемом с камеры.

Для того чтобы камеры были откалиброваны в одной системе координат с линейными модулями перемещения, был использован оригинальный подход. В качестве точки с известными пространственными координатами было использовано световое пятно, получаемое от лазерного луча оптического датчика на исследуемой поверхности. Положение пятна в координатах  $X$ ,  $Y$  точно определялось положением модулей линейного перемещения, а положение по координате  $Z$  регулировалось изменением положения поверхности с помощью сервоприводов и измерялось с помощью самого оптического датчика. Перемещая датчик над поверхностью при ее различных положениях, получали изображения с камер, на которых координаты пятна на изображении сопоставлялись с координатами и результатом измерения датчика.

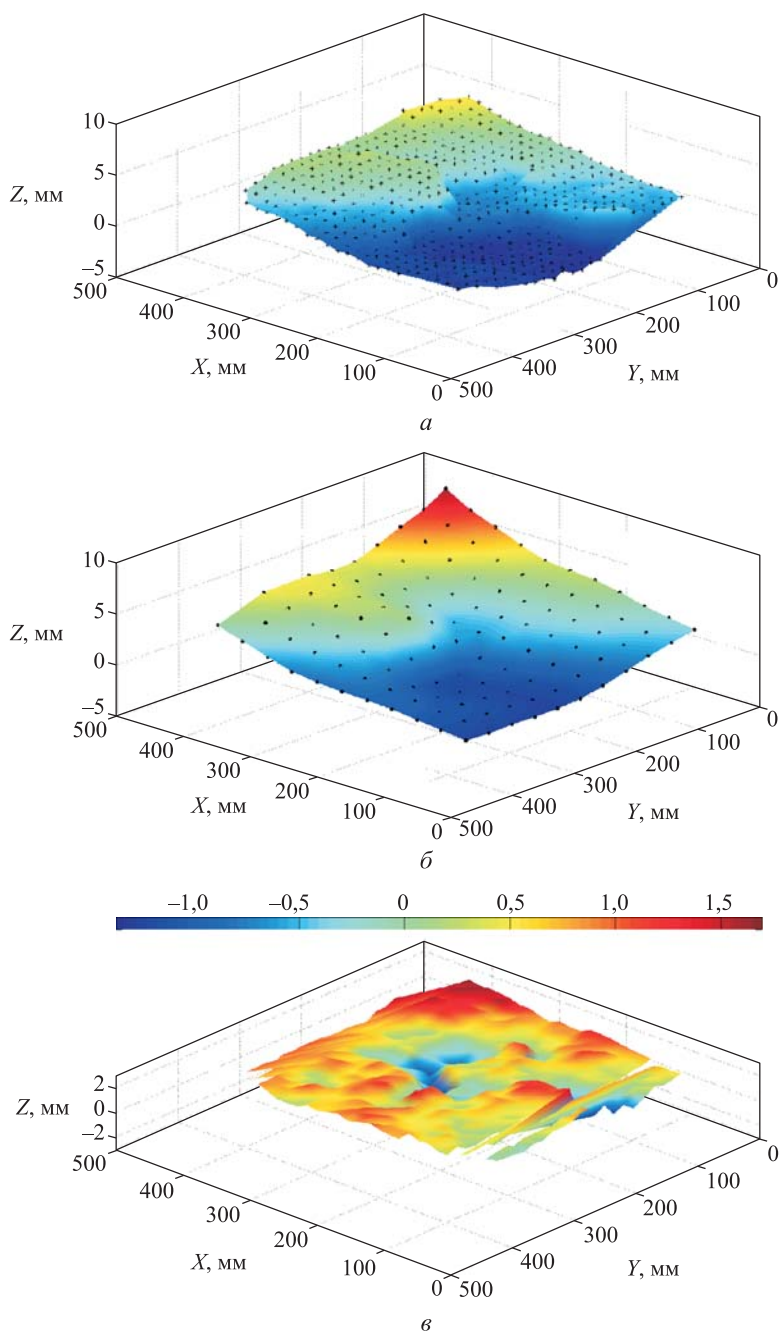
Внешний вид комплекса автоматического определения погрешности МКФИ приведен на рис. 5.



**Рис. 5.** Комплекс автоматического определения погрешности МКФИ:

$a$  — стереосистема видеокамер;  $b$  — имитатор деформируемой поверхности;  $z$  — линейные модули перемещения;  $z$  — оптический датчик расстояния;  $d$  — персональный компьютер

Расстояние от камер до центра поверхности в эксперименте составляло 1350 мм. Наклон камер к исследуемой поверхности  $20^\circ$ . Были использованы объективы Fujinon HF25HA-1B с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1:1,4.



**Рис. 6.** Результаты измерения деформируемой поверхности:  
*a* и *b* — профили деформированной поверхности, восстановленные с помощью МКФИ и разработанного комплекса; *v* — разность двух профилей



Пример результатов измерений с помощью рассматриваемого комплекса приведен на рис. 6. Профиль деформированной поверхности, восстановленный с помощью МКФИ (рис. 6, а), получен путем расчета 568 векторов смещения с окном опроса размером  $128 \times 128$  пикселей. Профиль деформированной поверхности, восстановленный с помощью разработанного комплекса, показан на рис. 6, б. Он получен путем измерения в 121 точке с шагом 38 мм.

Результатом, позволяющим судить о погрешности метода, является разность двух профилей, определенных МКФИ и блоком измерения расстояния (рис. 6, в). Максимальная разность составила 1,693 мм, среднее значение разности 0,617 мм и ее стандартное отклонение 0,358 мм.

**Выводы.** Итогом работы служит разработанный аппаратно-программный комплекс для определения погрешности МКФИ. Он позволяет определять погрешность измерения (не более 0,075 мм) деформаций амплитудой 20 мм на поверхности площадью  $380 \times 380$  мм<sup>2</sup> с дискретностью 0,5 мм по горизонтали и вертикали и 0,001 мм по высоте.

Впервые разработан комплекс, позволяющий проводить автоматическую оценку погрешности результатов оптических измерений профиля деформируемой поверхности, как методом корреляции фоновых изображений, так и другими методами. Использование данного комплекса позволит упростить разработку и апробирование, как новых методов диагностики деформаций, так и усовершенствовать существующие алгоритмы и методы. Одним из возможных применений комплекса может стать проведение прямых сравнений результатов восстановления профиля поверхности различными методами, что позволит оценивать различные фотограмметрические методы между собой с помощью единого критерия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Boden F., Stasicki B. Development of a rotating camera for in-flight measurements of aircraft propeller deformation by means of IPCT // New results in numerical and experimental fluid mechanics IX. Springer, 2014. P. 555–562.
2. Veerman H.P.J., Kannemans H., Jentink H.W. Highly accurate aircraft in-flight wing deformation measurements based on image correlation // Advanced in-flight measurement techniques. Springer, 2013. P. 15–32.
3. Кулеш В.П. Измерения деформации адаптивной носовой части крыла в аэродинамической трубе методом видеограмметрии // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 6. С. 100–109.
4. Любутин П.С., Панин С.В. Исследование точности и помехоустойчивости построения векторов перемещений при оценке деформаций оптико-телевизионным методом // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. № 2. С. 52–66.
5. Kirmse T. Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Airbags mittels Image Pattern Correlation Technique (IPCT) // Oldenburger 3D. Herbert Wichmann Verlag, 2009. P. 235–242.
6. Westerweel J. Digital particle image velocimetry: theory and application. Delft University Press, 1993. 235 p.

7. *Поройков А.Ю.* Восстановление 3D профиля деформированной металлической пластины методом корреляции фоновых изображений // *Измерительная техника*. 2014. № 4. С. 15–19.
8. *Lawson N.J., Wu J.* Three-dimensional particle image velocimetry: error analysis of stereoscopic techniques // *Measurement Science and Technology*. 1997. Vol. 8. No. 8. P. 894–900.  
DOI: 10.1088/0957-0233/8/8/010  
URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/8/8/010>
9. *Lawson N.J., Wu J.* Three-dimensional particle image velocimetry: experimental error analysis of a digital angular stereoscopic system // *Measurement Science and Technology*. 1997. Vol. 8. No. 12. P. 1455–1464. DOI: 10.1088/0957-0233/8/12/009  
URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/8/12/009>
10. *Voden F., Kirmse T., Поройков Ю.А. и др.* Исследования точности измерений динамических деформаций методом корреляции фоновых изображений // *Автоматрия*. 2014. Т. 50. № 5. С. 56–65.
11. *Scarano F., Riethmuller M.L.* Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset // *Experiments in Fluids*. 1999. Vol. 26. No. 6. P. 513–523.  
DOI: 10.1007/s003480050318  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s003480050318>
12. *Willert C.* The fully digital evaluation of photographic PIV recordings // *Applied Scientific Research*. 1996. Vol. 56. No. 2-3. P. 79–102. DOI: 10.1007/BF02249375  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02249375>

**Поройков Антон Юрьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры физики имени В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ» (Российская Федерация, Москва, 111250, Красноказарменная ул., д. 14).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Поройков А.Ю. Комплекс определения погрешности измерения формы гибкой деформируемой поверхности методом корреляции фоновых изображений // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2017. № 6. С. 28–39.  
DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-28-39

**A SYSTEM FOR DETERMINING THE ERROR IN MEASURING  
THE SHAPE OF A FLEXIBLE DEFORMABLE SURFACE BY MEANS  
OF THE IMAGE PATTERN CORRELATION TECHNIQUE**

**A. Yu. Poroykov**

[poroykovay@gmail.com](mailto:poroykovay@gmail.com)

**National Research University Moscow Power Engineering Institute,  
Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

We designed and constructed a system for determining measurement error using the Image Pattern Correlation Technique. The article presents functional flow block diagrams of the system, examines its components in detail and describes their specifications along with those of the electronic control unit of the system. We provide an opera-

**Keywords**

*Image Pattern Correlation Technique, procedural bias, hardware and software system*

tion algorithm of the system and example measurement results. The system makes it possible to determine measurement error for deformations of a 20 mm amplitude on a 380×380 mm<sup>2</sup> surface in 0.5 mm increments horizontally and vertically, in 0.001 mm increments in height, when the error does not exceed 0.075 mm

Received 26.01.2017

© BMSTU, 2017

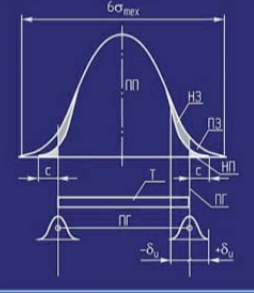
## REFERENCES

- [1] Boden F., Stasicki B. Development of a rotating camera for in-flight measurements of aircraft propeller deformation by means of IPCT. In: *New results in numerical and experimental fluid mechanics IX*. Springer, 2014. Pp. 555–562.
- [2] Veerman H.P.J., Kannemans H., Jentink H.W. Highly accurate aircraft in-flight wing deformation measurements based on image correlation. In: *Advanced in-flight measurement techniques*. Springer, 2013. Pp. 15–32.
- [3] Kulesh V.P. Measurements of adaptive wing leading edge deformation in a wind tunnel using videogrammetry method. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2014, vol. 45, no. 6, pp. 100–109 (in Russ.).
- [4] Lyubutin P.S., Panin S.V. Investigation of accuracy and error rate performance of the displacement vector construction in evaluation of strains using TV-optical technique. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2006, vol. 11, no. 2, pp. 52–66 (in Russ.).
- [5] Kirmse T. Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Airbags mittels Image Pattern Correlation Technique (IPCT). In: *Oldenburger 3D*. Herbert Wichmann Verlag, 2009. Pp. 235–242.
- [6] Westerweel J. *Digital particle image velocimetry: theory and application*. Delft University Press, 1993. 235 p.
- [7] Poroykov A.Yu. Reconstruction of 3D profile of a deformed metallic plate using image pattern correlation technique. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2014, no. 4, pp. 15–19 (in Russ.).
- [8] Lawson N.J., Wu J. Three-dimensional particle image velocimetry: error analysis of stereoscopic techniques. *Measurement Science and Technology*, 1997, vol. 8, no. 8, pp. 894–900. DOI: 10.1088/0957-0233/8/8/010  
Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/8/8/010>
- [9] Lawson N.J., Wu J. Three-dimensional particle image velocimetry: experimental error analysis of a digital angular stereoscopic system. *Measurement Science and Technology*, 1997, vol. 8, no. 12, pp. 1455–1464. DOI: 10.1088/0957-0233/8/12/009  
Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/8/12/009>
- [10] Boden F., Kirmse T., Poroykov A.Yu., et al. Accuracy of measurement of dynamic surface deformations by the image pattern correlation technique. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 474–481. DOI: 10.3103/S8756699014050057  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S8756699014050057>
- [11] Scarano F., Riethmuller M.L. Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset. *Experiments in Fluids*, 1999, vol. 26, no. 6, pp. 513–523. DOI: 10.1007/s003480050318  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s003480050318>
- [12] Willert C. The fully digital evaluation of photographic PIV recordings. *Applied Scientific Research*, 1996, vol. 56, no. 2–3, pp. 79–102. DOI: 10.1007/BF02249375  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02249375>

**Poroykov A.Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, V.A. Fabrikant Department of Physics, National Research University Moscow Power Engineering Institute (Krasnokazarmennaya ul. 14, Moscow, 111250 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Poroykov A.Yu. A System for Determining the Error in Measuring the Shape of a Flexible Deformable Surface by Means of the Image Pattern Correlation Technique. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 6, pp. 28–39. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-28-39

<p>Ю.А. Кокорев, Ф.В. Звягин <b>Способы расчета точностных характеристик деталей и узлов приборов</b></p>  <p>ИЗДАТЕЛЬСТВО</p>	<p>В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие авторов <b>Ю.А. Кокорева, Ф.В. Звягина</b> <b>«Способы расчета точностных характеристик деталей и узлов приборов»</b></p> <p>Изложены вопросы обоснования выбора точностных характеристики, рассмотрены возможные методы расчета на точность сложных и взаимосвязанных деталей и узлов. Приведены справочные материалы, необходимые для расчета на точность деталей и узлов приборных устройств с учетом их назначения, условий эксплуатации, требований к разработке, а также примеры расчетов приборных устройств различного назначения и рационального оформления конструкторской документации. Материалы подготовлены с учетом новых ГОСТов.</p> <p><b>По вопросам приобретения обращайтесь:</b> 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 (499) 263-60-45 press@bmstu.ru www.baumanpress.ru</p>
--	---