

УДК 53.083.91

ОЦЕНКА ПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТИ ВЕРТОЛЕТА ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ИЗМЕРЕНИЙ

В.А. АНИКИН¹, Н.В. КИМ², П.Д. ПРОХОРОВ²

¹ОАО «Камов», г. Люберцы, Россия

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия

При активном маневрировании вертолета возникает потребность в знании траектории движения концов лопастей вертолета. В связи с этим ставится задача измерений положения концов лопастей вертолета.

Основная сложность измерений связана с тем, что лопасть является высокودинамично движущимся объектом.

В данной работе предлагается двухканальная система измерений положения лопастей вертолета. В состав данной системы измерения входят тензометрический и оптический каналы измерения. Оптическая система измерения основана на применении высокоскоростной камеры и вычислительного блока, производящего обработку полученных видеок кадров с изображением лопасти. Тензометрическая система измерения включает в себя тензометрические датчики (расположенные на поверхности лопасти) и тензостанцию, которая регистрирует измерения и передает для последующего анализа на вычислительный блок по радиоканалу. Был сформирован облик двухканальной системы и разработан аппаратно-алгоритмический состав оптического и тензометрического каналов.

Для оптического канала измерений были решены проблемы, связанные с недостаточной контрастностью изображений лопасти и фона, идентификации лопастей и оценкой их положения. Для тензометрического канала измерений была предложена модель пересчета измерений датчиков из их собственных систем координат в систему координат вертолета и разработана система передачи измерений по радиоканалу на вычислительный блок.

Проведены исследования работоспособности и физической реализуемости предложенной двухканальной системы на экспериментальной установке. Оптический канал производил измерения положения двух лопастей, тензометрический – только той, на которой установлены тензометрические датчики. Результаты экспериментов подтвердили физическую реализуемость предложенной двухканальной системы измерения.

Ключевые слова: лопасти вертолета, система измерения, высокоскоростная видеокамера, обработка изображений.

ВВЕДЕНИЕ

На некоторых режимах полета вертолета, как правило, связанных с активным маневрированием, существует потребность в знании траектории движения концов лопастей несущего винта. Кроме того, пространственное положение конуса, описываемого лопастями, в значительной степени определяет управляющие аэродинамические силы винта и динамику вертолета [1, 2]. В связи с этим ставится задача определения траекторий движения концов лопастей винта в реальном времени.

Как показал анализ различных методов измерения [3–6], для решения рассматриваемой задачи целесообразно использовать тензометрический и/или оптический методы измерений.

Тензометрическая система основана на измерениях деформаций (изгиба) лопасти в процессе вращения. Деформации измеряются тензометрическими датчиками, размещенными на поверхности лопасти. При этом измерение каждого тензометрического датчика проводится в его собственной системе координат, что затрудняет оценку положения лопасти. Преимущество тензометрического канала измерений заключается в том, что обеспечиваются измерения на всем диапазоне вращения лопасти. Однако для получения требуемых данных необходимо ввести модель пересчета показаний датчиков в оценку перемещения торца в вертикальной плоскости и выбрать алгоритм для определения коэффициентов модели.

Оптическая система основана на обработке изображений, получаемых с высокоскоростной камеры, с целью оценки положения торца лопасти. В отличие от тензометрических оптические измерения позволяют сразу получать отклонения торца лопасти в системе координат вертолета (так как система координат камеры неподвижна и известно ее положение относительно системы координат вертолета). К недостаткам данного метода следует отнести то, что измерения производятся в небольшом угловом диапазоне (в поле зрения видеокамеры).

Для измерения положения лопастей предлагается двухканальная система, состоящая из оптического и тензометрического каналов.

МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной задачей предлагаемого исследования является формирование облика двухканальной системы, включающего:

- структуру экспериментальной установки,
- состав аппаратных средств,
- алгоритмы обработки измерений и их программную реализацию.

Примем, что в данной работе к двухканальной системе измерения предъявляются следующие требования:

- измерения положения лопасти должны производиться при 600 оборотах в минуту несущего винта вертолета и менее,
- исследования производятся на двух лопастях вертолета (с жестким соединением с втулкой) на экспериментальной установке,
- на лопасти необходимо расположить не менее четырех тензометрических мостов (тензодатчиков),
- тензометрические измерения должны проводиться только на одной лопасти,
- горизонтальный угол поля зрения камеры не менее 60° ,
- оптические измерения проводятся на обеих лопастях.

Двухканальная система измерений

Оба канала измерений работают при частоте 200 Гц, что позволяет тензометрическому каналу проводить как минимум 20 измерений за полный оборот лопасти, а оптическому – как минимум 1 измерение при максимальной частоте вращения $\Omega_{\max} = 600$ оборотов в минуту ($f_{\max} = 10$ Гц).

Состав тензометрического канала измерения:

- тензометрические датчики, измеряющие относительную деформацию лопасти в месте их расположения;
- тензометрическая станция, основной задачей которой является регистрация показаний тензометрических датчиков с заданной частотой и формирование сообщений для последующей передачи по радиоканалу;
- вычислительный блок, производящий прием сообщений с измерениями от тензометрической станции и последующую обработку.

Состав оптического канала измерения:

- высокоскоростная камера;
- вычислительный блок (компьютер с ЦП Intel Core I7 2600 3,4 GHz), принимающий изображения с высокоскоростной камеры и производящий последующую их обработку;
- прожектор, для улучшения контраста лопасть – фон;
- экран, для обеспечения требуемой текстуры фона.

Расположение измерительного оборудования приводится на рис. 1.

Тензометрические измерения

Для случая вращающегося винта вертолета измерение деформаций его лопастей осуществляется при помощи снятия показаний с тензометрических мостов (тензодатчики), устанавливаемых на различном удалении от комля.

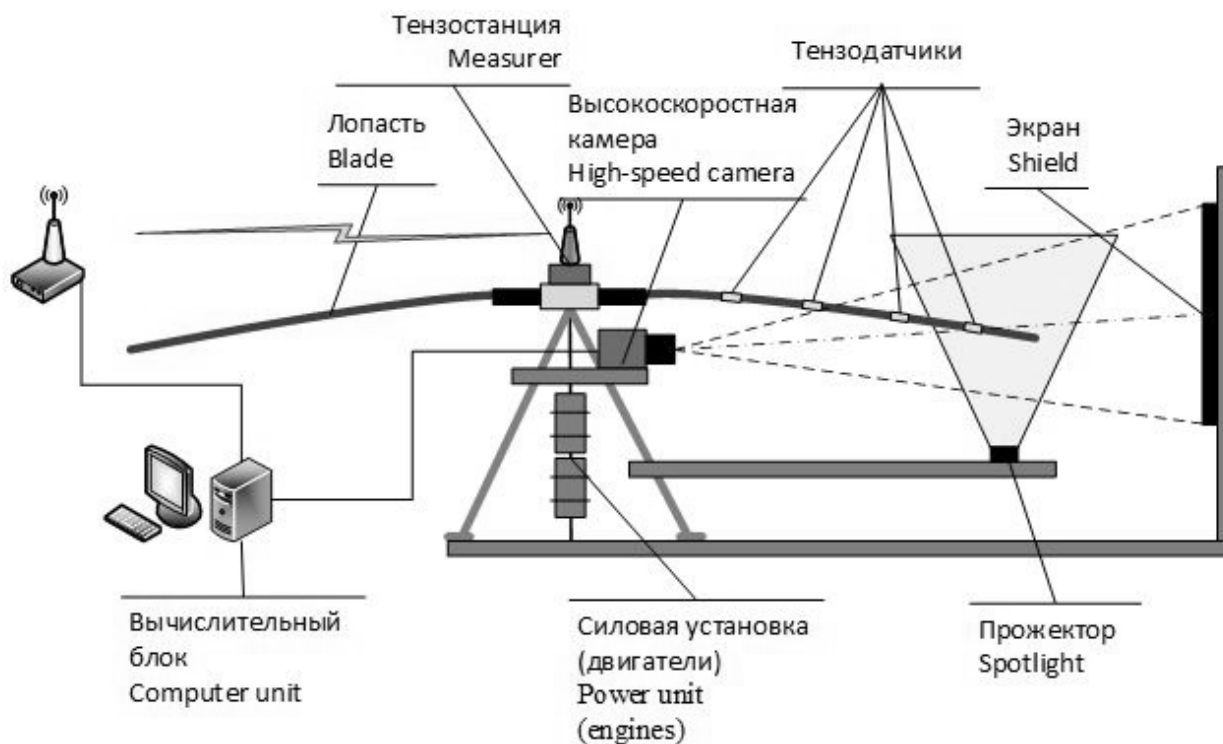


Рис. 1. Структура экспериментальной установки
Fig. 1. Research facility unit structure

На экспериментальной лопасти установлены тензорезисторы типа КФ5П1-20-200 с базой 20 мм. Терморезисторы включены по полной мостовой схеме [7], обеспечивающей увеличение чувствительности и высокую термостабильность.

Прототип тензометрической станции состоит из платы микроконтроллера (Arduino UNO), радиомодема (XBee) и платы с предварительными усилителями сигнала, в качестве которых используются высокостабильные инструментальные усилители.

С целью исключения влияния контактных помех на результаты измерений, была разработана система дистанционной передачи данных по радиоканалу.

Оптические измерения

Для измерений была выбрана высокоскоростная камера Allied Vision Tech Prosilica GE680 с частотой в 200 кадров в секунду, с разрешением 640×480 пикселей. К вычислительному блоку она подсоединяется с помощью сетевого кабеля UTP CAT 5e.

Структура комплексов алгоритмов, реализуемых при обработке каждого видеокadra: получение видеокadra → бинаризация → поиск связанных областей → определение положения лопасти → идентификация лопасти.

Выделение лопасти. После проведенной работы по улучшению условий наблюдения, становится возможным достаточно просто сегментировать (разбивать изображение на непохожие по некоторому признаку области, что необходимо для выделения лопасти) изображение. Для этого используется пороговая бинаризация [8] с порогом, соответствующим среднему между математическими ожиданиями яркостями фона и объекта.

Для того чтобы отделить область, характеризующую положение лопасти, от белых областей, которые могут быть получены из-за шумов, используется алгоритм связанных областей. Для поиска связанных областей используется метод «лесного пожара» [9].

Определение положения лопасти. Так как наиболее крупным контрастным объектом на фоне является лопасть, то для ее выделения производится поиск наибольшей по площади связанной области.

Если такая область присутствует и удовлетворяет условию по минимальной площади S лопасти (определяемое для исключения ошибок «ложная тревога»), то она считается лопастью.

После обнаружения лопасти и определения положения ее торца на видеокadre, благодаря проведенной калибровке, можно получить отклонение торца лопасти $Y_{\text{кам}}$ в системе координат камеры $Ox_{\text{кам}}U_{\text{кам}}$.

Идентификация лопастей. Так как индивидуальные траектории лопастей могут существенно различаться, предлагается наносить на одну из двух лопастей контрастный по отношению к поверхности лопасти маркер. Порог (минимальная площадь) $S_{\text{маркера}}$ подбирается таким образом, чтобы исключить возможность ложного обнаружения маркера.

На лопасти производится поиск маркера, если он отсутствует, то это лопасть № 2 (рис. 2), если присутствует – то лопасть № 1.

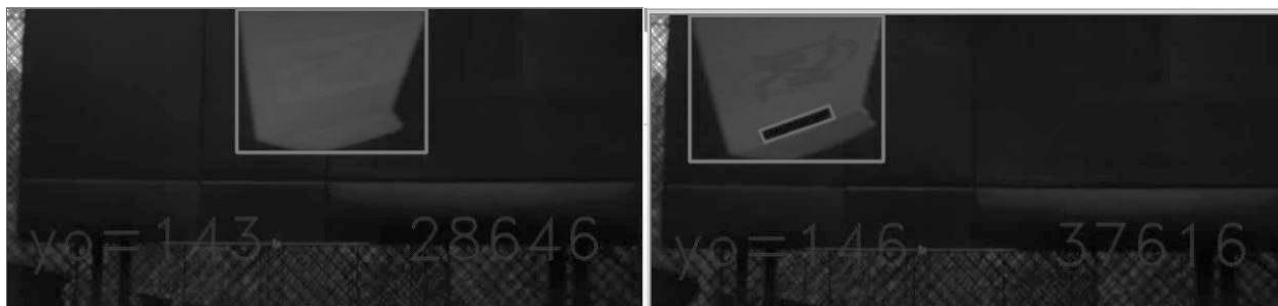


Рис. 2. Пример распознавания лопастей
Fig. 2. Example of blades' sensing

Модель пересчета для тензометрической системы измерений

Для расчета положения торца лопасти по оси Y (система координат вертолета) используется модель следующего вида:

$$y = k_0 + \sum_{j=1}^m k_j \cdot d_j, \quad (1)$$

где y – отклонение торца лопасти в вертикальной плоскости в метрах, k_0 – аддитивный коэффициент, d_j – показания j -го тензодатчика, k_j – коэффициент j -го тензодатчика, m – количество тензодатчиков.

Коэффициенты k_j являются весовыми коэффициентами, характеризующими вклад показаний каждого j -го тензодатчика в значение y .

Предлагается следующий алгоритм оценки коэффициентов k .

Представим измерения тензометрической системы в виде

$$D_i = \xi_i + \varepsilon_i, \quad (2)$$

где D_i – вектор, содержащий в себе показания m тензодатчиков, ξ_i – вектор точных значений, ε_i – вектор ошибок измерения.

Соответственно, измерения оптической системы:

$$y_i = \eta_i + \delta_i, \quad (3)$$

где η_i – точные значение, δ_i – ошибки измерения.

Имеется статистический ряд экспериментальных данных $\{D_i\}$ (тензометрические измерения) и соответствующий им ряд $\{y_i\}$ (оптические измерения), $i = 1, 2, \dots, n$, $n \geq 1$, где l – число оцениваемых параметров.

Необходимо найти оценку неизвестных параметров функции $\eta = f(\xi, k)$, когда точные значения ξ и η не наблюдаются.

Для конкретных видов функций $\eta = f(\xi, k)$ можно получить условия существования единственного решения.

Предполагается, что для линейных функций $y = k_0 + \sum_{j=1}^m k_j \cdot d_j$ существует единственное решение, при условии, что ошибки измерений δ_i , ε_i статистически независимы и подчиняются нормальному закону распределения.

Критерий оптимальности оценки для линейных функций имеет вид [10]

$$F = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(y_i - k_0 - \sum_{j=1}^m k_j \cdot d_{ij})^2}{1 + \sum_{j=1}^m k_j^2} \right) \rightarrow \min. \quad (4)$$

В результате каждого эксперимента получают оценки k_i коэффициентов модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью подтверждения работоспособности и физической реализуемости был проведен эксперимент с двухлопастным винтом. На одной из лопастей расположены 4 тензометрических датчика.

На рис. 3 приведены графики измерений тензометрических датчиков (нумерация датчиков начинается от коня лопасти).

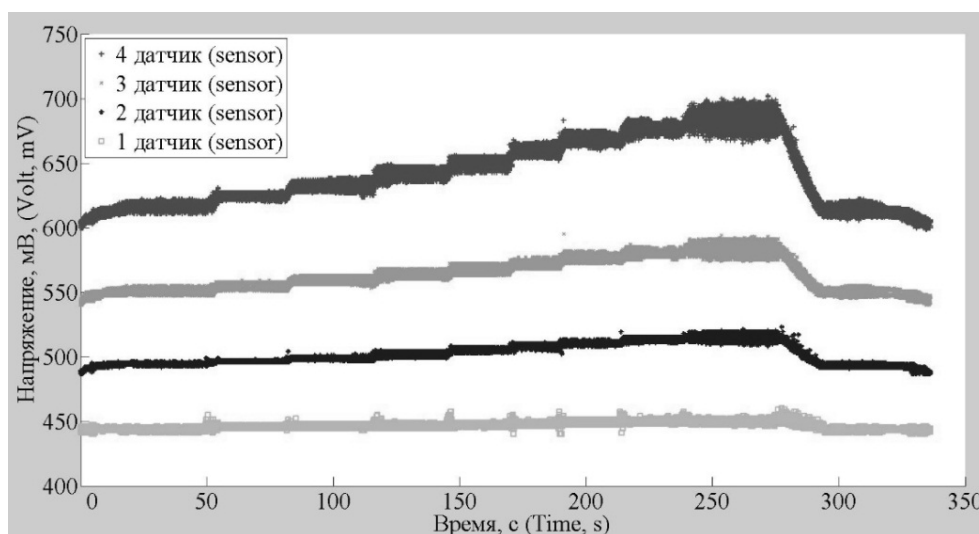


Рис. 3. Измерения тензометрической системы
Fig. 3. Strain-gauge system measurements

На рис. 4 показаны результаты измерений оптической системы. За уровень нулевого отклонения торца лопасти взято его положение в неподвижном состоянии.

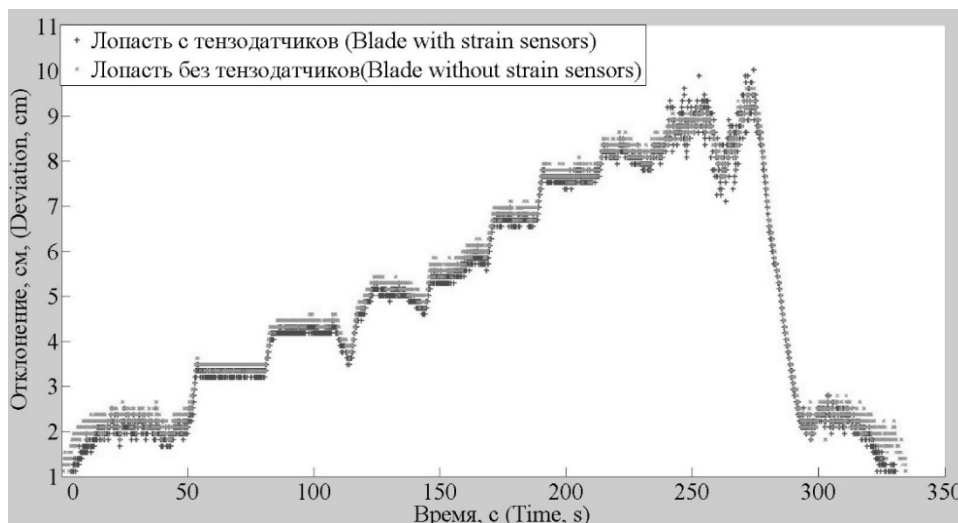


Рис. 4. Измерения оптической системы

Fig. 4. Optical system measurements

На рис. 5 приведены совмещенные графики отклонения торца лопасти (оптические измерения и тензометрические, которые были получены с помощью модели пересчета (1)). Также представлен график невязки между тензометрическими и оптическими измерениями.

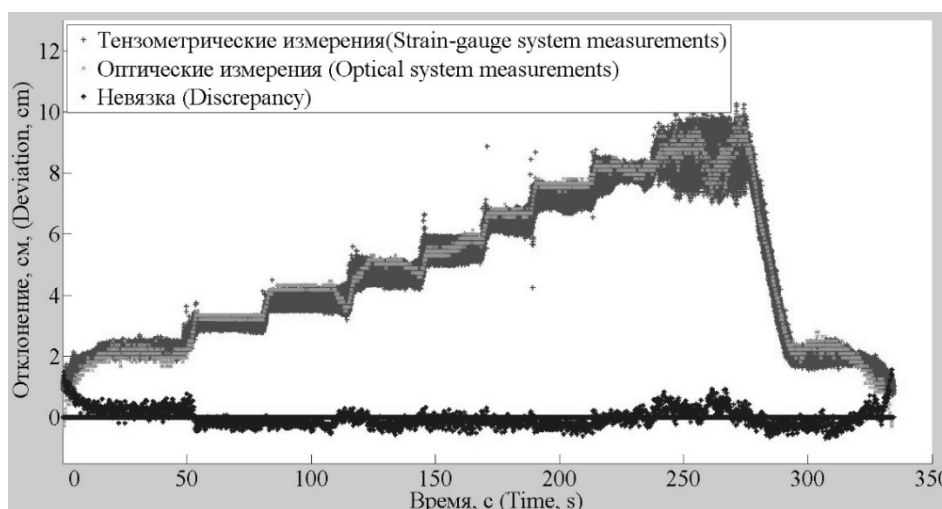


Рис. 5. Совмещенные измерения

Fig. 5. Combined measurements

Математическое ожидание невязки между тензометрическими и оптическими измерениями составляет $m_{нев} = -0,01544$ см, среднеквадратическое отклонение $\sigma_{нев} = 0,305631$ см.

Был сформирован облик двухканальной системы и полученные результаты подтверждают физическую реализуемость данных методов измерения.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана двухканальная система измерений положения торца лопастей, состоящая из тензометрического и оптических каналов, представлена ее структура и описаны используемые алгоритмы.

2. Предложен алгоритм комплексирования тензометрических и оптических измерений.
3. Проведенные исследования показали работоспособность и эффективность предложенных технических решений.
4. По результатам обработки экспериментальных данных математическое ожидание невязки между тензометрическими и оптическими измерениями составляет $m_{нев} = -0,01544$ см, среднеквадратическое отклонение $\sigma_{нев} = 0,305631$ см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Леонтьев В.А.** Метод решения уравнений движения упругих лопастей вертолетных винтов в общем случае движения // Ученые записки ЦАГИ. 2010. Т. XLI, № 5. С. 67–80.
2. **Аникин В.А., Ким Н.В., Прохоров П.Д.** Некоторые вопросы создания скоростного БЛА вертолетного типа // Материалы девятой научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и четвертой молодежной школы семинара «Управление и обработка информации в технических системах». Таганрог, 2014. С. 219–226.
3. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
4. **Якушенков Ю.Г.** Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для студентов вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 1999. 480 с.
5. Локационные лазерные системы видения / В.Е. Карасик, В.М. Орлов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 478 с.
6. **Белоцерковский Г.Б.** Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М.: Сов. радио, 1975. 336 с.
7. **Немец И.** Практическое применение тензорезисторов: пер. с чешского. М: Энергия, 1970. 180 с.
8. **Форсайт Дэвид А., Понс Жан.** Компьютерное зрение. Современный подход: пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 928 с.
9. **Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю. и др.** Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
10. **Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А.** Математические методы построения прогнозов. М., 1997. 112 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аникин Виктор Андреевич, д.т.н., главный конструктор ОАО «Камов», v.anikin@kamov.ru.

Ким Николай Владимирович, к.т.н., профессор МАИ, nkim2011@list.ru.

Прохоров Павел Дмитриевич, аспирант МАИ, prokhorov_pd@mail.ru.

ESTIMATION OF HELICOPTER BLADE POSITION BY MEANS OF TWO-CHANNEL MEASURING SYSTEM

Viktor A. Anikin¹, Nikolaj V. Kim², Pavel D. Prokhorov²

¹PLC "Kamov", Lyubertsy, Russia

²Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

ABSTRACT

Helicopter active maneuvering brings about the need to know the blades tips motion trajectory. For that matter is it set to measure blades tips position.

The main difficulty is that blade is a highly dynamic moving object.

This work suggests two-channel measuring system of helicopter blades position. This measuring system consists of strain-gauge and optical measuring channels. The optical measuring system is based on high-speed camera and computer unit, which processes received video frames with blade image. The strain-gauge measuring system consists of strain sensors (located on the blade face) and of strain-gauge station, which records measurements and transmits them to the computer unit via radio channel for further analysis. The two-channel system concept was designed and device-algorithmic part of optical and strain-gauge channels was developed.

Problems of the optical measuring channel, connected with low image contrast between blade and image background, blades identification and their position estimation were solved. For the strain-gauge measuring channel, a model of measurement translation from intrinsic frame of reference into helicopter frame of reference was suggested and measurement transmission system via radio channel to the computer unit was developed.

The operational integrity and physical realizability of suggested two-channel system on research facility unit were inquired. The optical channel made measurements of two blades location, the strain-gauge channel made measurements only of that blade which had been equipped with sensors. The results of the research validated physical realizability of suggested two-channel measuring system.

Key words: helicopter blades, measuring system, high-speed camera, image processing.

REFERENCES

1. Leont'ev V.A. *Metod resheniya uravnenii dvizheniya uprugikh lopastei vertoletnykh vintov v obshchem sluchae dvizheniya* [Solution method of flexible blade equation of motion in general motion case]. *Uchenye zapiski TsAGI* [TsAGI Scientists notes], 2010, V. XLI, no. 5, pp. 67–80. (in Russian)

2. Anikin V.A., Kim N.V., Prokhorov P.D. *Nekotorye voprosy sozdaniya skorostnogo BLA vertoletnogo tipa* [Some questions about helicopter type pilotless aircraft creation] *Materialy devyatoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya" i chetvertoi molodezhnoi shkoly seminara "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"* [Materials ninth scientific conference "Perspective and management tasks" and the fourth school youth seminar "Management and processing of information in technical systems"]. Taganrog. 2014. Pp. 219–226. (in Russian)

3. Radioelektronnye sistemy: Osnovy postroeniya i teoriya [Radioelectronic systems: Fundamentals and theory. Handbook]. Pod red. Ya.D. Shirmana [2d edition, revised and added. Ed. Ya.D. Shirmana]. Moscow. Radiotekhnika [Radio Engineering]. 2007. 512 p. (in Russian)

4. Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov: uchebnik dlya studentov vuzov* [Theory and calculation of optical-electronic devices: College textbook. The 4th edition, revised and added]. Moscow. Logos. 1999. 480 p. (in Russian)

5. Karasik V.E., Orlov V.M. *Lokatsionnye lazernye sistemy videniya* [Laser vision systems: Teaching guide]. Moscow. Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana [Bauman MGTU Publishing House]. 2013. 478 p. (in Russian)

6. Belotserkovskii G.B. *Osnovy radiolokatsii i radiolokatsionnye ustroistva* [Fundamentals of radar and radar installations]. Moscow. Sov. radio [Soviet radio]. 1975. 336 p. (In Russian)

7. Nemets I. *Prakticheskoe primenenie tenzorezistorov* [Resistive-strain sensors application]. Moscow. Energiya. 1970. 180 p. (in Russian)

8. Forsait David A., Pons Zhan. *Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyi podkhod* [Computer Vision. A Modern Approach]. Moscow. Izdatel'skii dom "Vil'yams" [Translation from English. Publishing House "Williams"]. 2004. 928 p. (in Russian)

9. Vizil'ter Yu.V., Zheltov S.Yu. i dr. *Obrabotka i analiz izobrazhenii v zadachakh mashinnoogo zreniya: kurs lektsii i prakticheskikh zanyatii* [Image procession and analysis in computer vision challenges: Course of lectures and practice]. Moscow. Fizmatkniga [Physical and Mathematical publ]. 2010. 672 p. (in Russian)

10. Greshilov A.A., Stakun V.A., Stakun A.A. *Matematicheskie metody postroeniya prognozov* [Mathematical methods of estimation]. Moscow. 1997. 112 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTOR(S)

Anikin Viktor Andreevich, Doctor of Science, Chief designer of PLC "Kamov",
v.anikin@kamov.ru.

Kim Nikolaj Vladimirovich, PhD, Professor of Moscow Aviation Institute, nkim2011@list.ru.

Prokhorov Pavel Dmitrievich, PhD student of Moscow Aviation Institute,
prokhorov_pd@mail.ru.