

На правах рукописи



Прохоров Павел Дмитриевич

**РАЗРАБОТКА ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ ВЕРТОЛЕТА**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника)

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2017 г.

Работа выполнена на кафедре «Информационно-управляющие комплексы» ФГБОУ ВО Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: Ким Николай Владимирович, кандидат технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный консультант: Аникин Виктор Андреевич, доктор технических наук, главный конструктор АО «Камов»

Официальные оппоненты: Андреев Виктор Павлович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор ФГБОУ ВО Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»

Михайлов Борис Борисович, кандидат технических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета)»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет гражданской авиации

Защита состоится 21 декабря 2017 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке https://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=83555.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Отзывы просим отправлять в 2-х экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, доцент



Старков
Александр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Безопасность полета вертолета может быть повышена за счет реализации процесса измерения в реальном времени траекторий движения лопастей. В этом случае можно будет реализовать безопасное управление в соответствии с положением лопастей.

В частности, вертолеты с соосной схемой имеют преимущества перед вертолетами с одновинтовой схемой, однако на некоторых режимах полета есть вероятность сближения лопастей вплоть до их столкновения с последующим их разрушением.

Возможное опасное сближение лопастей может произойти из-за следующих причин:

- 1) в условиях сильного ветра или из-за воздействия индуктивного потока – раскрутка и остановка несущего винта;
- 2) при крутом снижении – попадание вертолета в режим вихревого кольца;
- 3) выполнение энергичного, но в то же время недостаточно координированного маневра с определенными характеристиками;
- 4) существенное превышение максимально допустимой скорости полета при выполнении пикирования с определенными характеристиками.

Эти факторы существенно влияют на условия применения таких вертолетов и ограничивают их функциональные возможности, в том числе и максимальную скорость полета. Организация безопасного управления вертолетом в указанных особых ситуациях возможна при условии знания положения лопастей в реальном масштабе времени.

Тема диссертации – исследование и разработка методов, обеспечивающих получение измерений положения лопастей и траектории их движения на различных режимах работы винта вертолета.

Цель работы – повышение безопасности функционирования вертолетов за счет использования системы измерений положения лопастей винта вертолета и траектории их движения на различных режимах работы несущего винта. В результате исследований должны быть разработаны:

- 1) состав и структура системы измерения (программно-аппаратный комплекс) положения лопастей винта вертолета;
- 2) алгоритмы определения положения лопастей и траекторий их движения;
- 3) необходимые требования к точностным характеристикам системы измерений.

Объект исследования – система измерений положения лопасти несущего винта вертолета.

Предмет исследования – программно-аппаратное обеспечение системы измерений положения лопастей несущего винта вертолета.

Методы исследования. Исследования выполнены с использованием аппарата математического моделирования, методов цифровой обработки изображений, используемых в системах технического зрения, методов теории информации и статистических методов распознавания.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Показано, что измерение положения и траектории движения лопасти несущего винта вертолета могут быть реализованы с помощью двухканальной системы измерений, включающей подсистемы тензометрических и оптических измерений;
2. Предложена методика комплексирования оптических и тензометрических измерений, включающая в себе математическую модель пересчета тензометрических измерений в отклонения торца лопасти в системе координат видеокамеры (связанную с вертолетной системой координат);
3. Разработан комплекс алгоритмов для измерений положения лопастей, траектории движения лопастей и их идентификации, основанный на комплексировании тензометрических и оптических измерений;
4. Разработан программно-аппаратный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы измерений;
5. Экспериментально показано, что комплексные измерения удовлетворяют поставленным требованиям.

Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается обработкой и анализом экспериментальных данных, полученных при применении предлагаемой двухканальной системы на электровинтовом стенде АО «Камов».

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная двухканальная система измерений позволяет проводить исследования поведения лопастей несущего винта вертолета в динамике на различных режимах работы несущего винта вертолета, что повысит безопасность функционирования вертолетов.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на 13-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2014», Москва, 2014 г.; на 9-й научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и 4-й молодежной школе-семинаре «Управление и обработка информации в технических системах», Таганрог, 2014 г.; на научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2014», Москва, 2014 г.; Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2015», Москва, 2015 г.; X Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Москва, 2015 г.; 14-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2015», Москва, 2015 г.; научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2016», Москва, 2016 г.; XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2016», Москва, 2016 г.; XLIII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2017», Москва, 2017 г.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов» МАИ.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 12 работ, в том числе 3 научно-технические статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 97 рисунков, 27 таблиц и 77 наименования литературных источников.

К защите предоставляются следующие основные положения работы:

- 1) программно-аппаратный комплекс двухканальной системы измерений, включающей оптический и тензометрический каналы;
- 2) методика комплексирования оптических и тензометрических измерений, позволяющая проводить измерения на всем круговом диапазоне положения лопасти в системе координат вертолета с заданной частотой;
- 3) комплекс алгоритмов для оптического канала измерений, включающий в себя обнаружение лопасти на видеокадре, определение координат торца лопасти в системе координат вертолета и последующую ее идентификацию с целью получения индивидуальных траекторий движения лопастей;
- 4) результаты экспериментальных исследований, подтверждающие работоспособность и физическую реализуемость предлагаемой двухканальной системы измерений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, приводится обзор литературы и дается общая характеристика работы.

В **первой главе** рассматриваются вопросы комплексного измерения положения торца лопасти несущего винта вертолета.

Главные проблемы, осложняющие применение различных бесконтактных методов измерений положения лопасти при работающем винте, – это высокая скорость протекания исследуемых процессов и требования к точности измерений.

Из исходных данных (длина лопасти, ограничение по частоте вращения несущего винта) была определена требуемая частота измерений (производительность измерений), требуемая точность, диапазон измерений и система координат.

Был произведен обзор различных способов измерения, в ходе которого рассматривались как контактные (тензометрические), так и бесконтактные (ультразвуковые, индуктивные, оптические, радиолокационные, емкостные) способы измерений.

На основе анализа рассмотренных методов измерений были выбраны оптический и тензометрический методы, которые совместно, при условии комплексирования измерений, удовлетворяют поставленным требованиям к задаче. Таким образом, была сформирована структура предлагаемой двухканальной системы.

На этапе обличкового проектирования системы измерений спектр перемещения лопасти неизвестен, поэтому его выбирают на основе экспертной оценки. Предварительный анализ исследуемых процессов показывает, что данный параметр можно принять равным 100 Гц при максимальной частоте вращения НВ $\Omega_{\max} = 600$

оборотов в минуту ($f_{\text{max}} = 10$ Гц). Исходя из теоремы Котельникова-Шеннона была выбрана частота измерений – 200 Гц, что позволяет по тензометрическому каналу проводить как минимум 20 измерений за полный оборот лопасти, а по оптическому – как минимум 1 измерение. С учетом этих данных определен аппаратный состав обоих каналов измерения.

Для исследований разработанной системы измерений использовался штатный электровинтовой стенд АО «Камов», включающий силовую часть (двигатели), систему управления частотой вращения несущего винта и шагом исследуемых лопастей. Посредством силовой установки несущий винт вертолета приводится во вращение (максимальная частота вращения – $\Omega_{\text{max}} = 600$ оборотов в минуту), во время которого торцы лопастей несущего винта изменяют свое положение по вертикали (ось Oy в связанной системе координат вертолета $Oxyz$). Далее в тексте под системой координат вертолета подразумевается связанная система координат вертолета.

Расположение оборудования разработанной двухканальной системы измерений на экспериментальной установке приводится на рисунке 1.

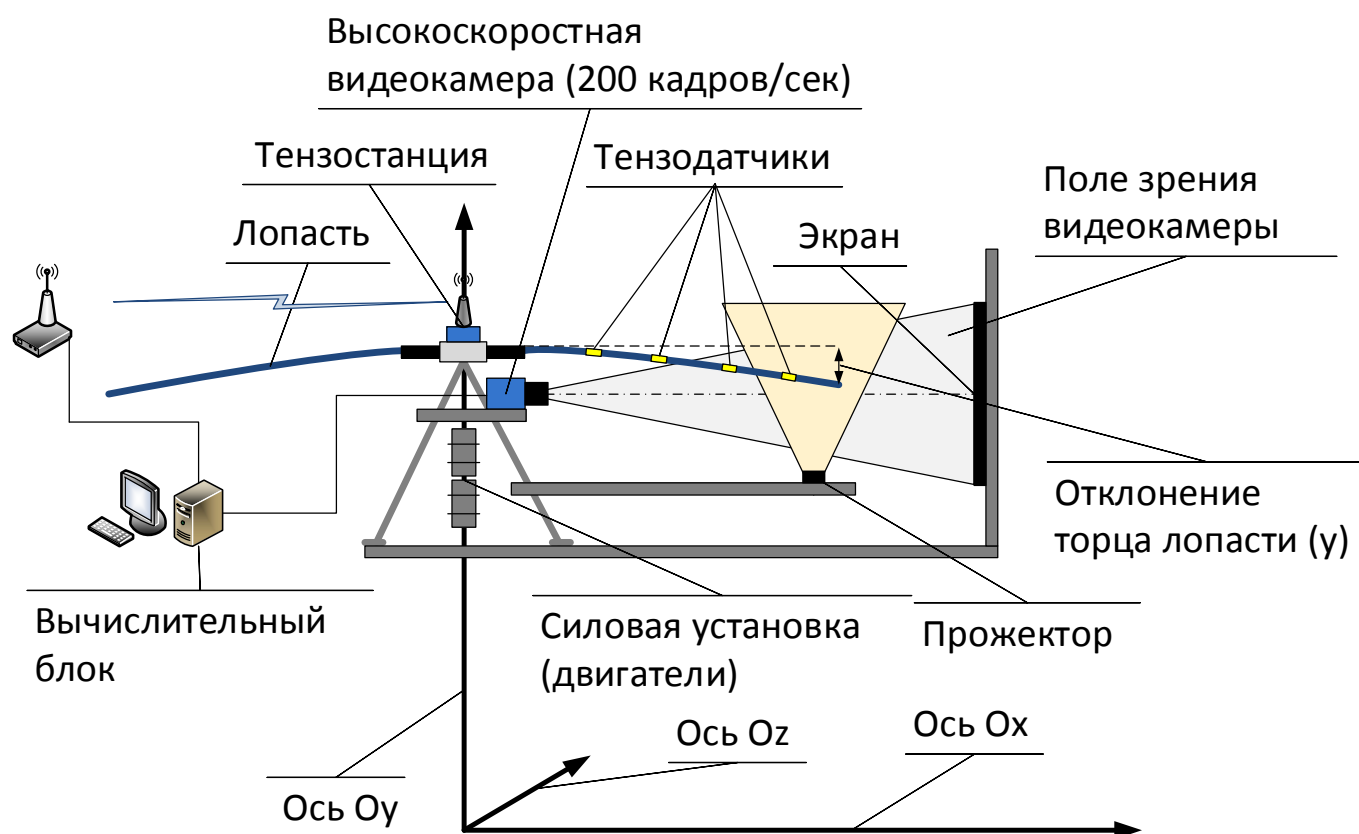


Рисунок 1. Расположение оборудования двухканальной системы измерений

Задача разрабатываемой двухканальной системы проводить измерение локального смещения торцов лопастей – y (см. Рисунок 1) в системе координат вертолета $Oxyz$ при условии вращения несущего винта на различных режимах работы несущего винта.

При этом тензометрический канал измеряет деформацию лопасти на всем требуемом диапазоне вращения лопасти ($0 - 360^\circ$) относительно оси Oy . Оптическая система проводит регулярную калибровку тензометрических данных, обеспечивая получение измерений лопасти в системе координат вертолета на всем круговом диапазоне положения лопасти.

Тензометрическая система основана на измерениях деформаций (изгиба) лопасти в процессе вращения. Для измерений общей продольной деформации лопасти тензометрические датчики располагаются равномерно вдоль оси лопасти. Результаты исследований, проводившихся с аналогичными типами лопастей, показывают, что на различных режимах функционирования подобные лопасти пропускают не выше первого тона колебаний. В этом случае для получения необходимой информации о характере и параметрах деформаций лопасти несущего винта достаточна установка на поверхность лопасти четырех тензометрических датчиков. Тензометрическая станция, располагаемая на втулке несущего винта, регистрирует показания с четырех тензометрических датчиков и по цифровому радиоканалу передает данные на вычислительный блок (компьютер).

Оптические измерения основаны на обработке изображений (видеокадров), получаемых с одной высокоскоростной видеокамеры (частота: 200 кадров/сек., разрешение 640×480) с целью измерения положения торца лопасти в моменты нахождения ее в поле зрения видеокамеры в системе координат видеокамеры. Видеокадры передаются по кабелю категории 5e (Cat. 5e) от высокоскоростной видеокамеры к вычислительному блоку, в котором производится их обработка. Экран и прожектор для подсветки торца лопасти, используются для улучшений условий наблюдения (повышение контрастности лопасть-фон и уменьшение дисперсии яркости фона на видеокадре) при исследованиях, проводимых на экспериментальной установке.

Преимущество тензометрического канала измерений заключается в том, что обеспечиваются измерения на всем требуемом диапазоне вращения лопасти ($0 - 360^\circ$). Использование только тензометрического канала измерений затрудняется необходимостью перевода показаний тензометрических датчиков, получаемых в их собственных системах координат, в измерения линейного отклонения торца лопасти в системе координат вертолета.

В отличие от тензометрических, оптические измерения позволяют получать отклонения торца лопасти в искомой системе координат вертолета (так как система координат видеокамеры неподвижна, и известно ее положение относительно системы координат вертолета). К недостаткам этого метода следует отнести то, что измерения производятся в небольшом угловом диапазоне (в поле зрения видеокамеры).

Для перевода тензометрических измерений в систему координат вертолета с помощью оптических измерений предлагается ввести математическую модель пересчета. Данная модель обеспечивает пересчет данных тензометрических измерений в линейные перемещения торца лопасти в системе координат видеокамеры, далее переводимых в систему координат вертолета. Вычисления коэффициентов модели пересчета производятся на основе сопоставления оптических и тензометрических измерений.

В связи с этим предлагается методика комплексирования тензометрических и оптических измерений, включающая в себя процедуры получения тензометрических и оптических измерений, выбор набора тензометрических измерений, соответствующих оптическим измерениям по времени, расчет коэффициентов модели пересчета тензометрических измерений в систему координат видеокамеры.

На рисунке 2 приведена схема пересчета тензометрических измерений.

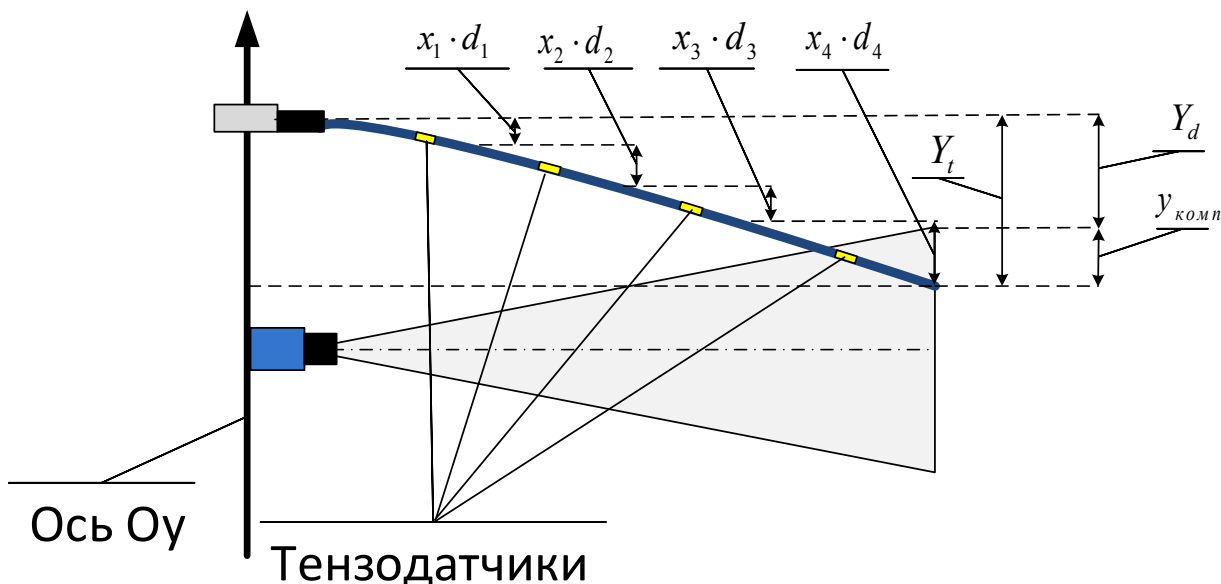


Рисунок 2. Схема пересчета тензометрических измерений в линейное отклонение торца лопасти

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

$$y_{комп} = x_0 + \sum_{j=1}^m x_j \cdot d_j,$$

где $y_{комп}$ – отклонение торца лопасти в вертикальной плоскости в миллиметрах, $x_0 = -Y_d$ – коэффициент начального смещения, d_j – показания j -ого тензодатчика, x_j – коэффициент j -го тензодатчика, m – количество тензодатчиков ($m = 4$).

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

Вычисление коэффициентов $x_0, x_j, j = 1, 2, \dots, m$ данной модели получается путем решения задачи безусловной оптимизации

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{(y_{омн\ i} - y_{комп\ i})^2}{1 + \sum_{j=1}^m x_j^2} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(y_{омн\ i} - x_0 - \sum_{j=1}^m x_j \cdot d_{ij})^2}{1 + \sum_{j=1}^m x_j^2} \right) \rightarrow \min,$$

где $y_{омн\ i}$ – i -е измерение оптической системы, d_{ij} – i -е измерение j -го тензометрического датчика, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, n$ – количество измерений, m – количество тензометрических датчиков.

В рамках проводимых исследований необходимо:

- 1) определить структуру и программно-аппаратный состав двухканальной системы измерений;
- 2) разработать методику экспериментальных исследований комплексной системы измерений;
- 3) разработать комплекс алгоритмов для оценки положения и траектории движения лопастей и их идентификации, основанный на комплексировании тензометрических и оптических измерений;
- 4) разработать программное обеспечение тензометрической и оптической систем измерений.

Вторая глава посвящена вопросам разработки тензометрического канала измерения. Рассматривается задача оценки положения лопасти вертолета в различных точках траектории движения с помощью измерения деформации лопасти. Деформации лопасти измеряются с помощью размещенных на ее поверхности четырех тензометрических датчиков, которые размещаются вдоль лопасти равномерно с шагом между ними 400 мм. Информация от датчиков принимается тензометрической станцией и передается на вычислительный блок по цифровому радиоканалу для последующей обработки.

Есть множество стационарных тензометрических станций, с помощью которых проводится измерение деформаций различных конструкций как на стационарных, так и на подвижных объектах с достаточно высокой точностью и в реальном времени. Но такие устройства потребляют значительное количество электроэнергии, имеют относительно большие габариты, что не позволяет разместить их на втулке несущего винта. Также при использовании подобного оборудования возникают проблемы, связанные с необходимостью обеспечения питания этих устройств и передачей результатов измерения на вычислительный блок, в котором производится расчет значения положения лопасти.

Передача информации при помощи скользящих контактов не удовлетворяет поставленным требованиям из-за недостаточно высокой надежности и невозможности достижения помехозащищенности работы аппаратуры.

Один из способов решения этой проблемы – разработка малогабаритных аналогов тензометрических станций, способных работать при воздействии механических нагрузок.

С целью повышения помехозащищенности передачу информации с тензометрической станции на вычислительный блок предлагается организовать дистанционно по цифровому радиоканалу. За счет реализации данного подхода была достигнута требуемая помехозащищенность измерений.

В работе проведен обзор различных типов тензорезисторов и способов их включения, выбрана мостовая схема подключения фольговых тензорезисторов. Приведена структурная схема данного канала измерения. Также была оценена требуемая пропускная способность цифрового радиоканала, которая составила $q_{\text{треб}} \geq 17,18 \text{ кбит/сек}$.

В работе рассматривается лопасть с упругим (бесшарнирным) соединением со втулкой несущего винта. Подобное соединение можно рассматривать как жесткое

консольное крепление балки. С учетом этого допущения была предложена математическая модель пересчета измерений тензометрических датчиков.

Проведены экспериментальные исследования тензометрического канала измерений, подтверждающие его работоспособность.

В **третьей главе** рассматривается оптический канал измерений. Разработанная и реализованная система видеоизмерений состоит из цифровой высокоскоростной видеокамеры Prosilica GE-680 фирмы Allied Vision Technologies (с объективом Computar M0814MP), вычислительного блока. Рассмотрены варианты измерения положения торца лопастей вертолета с помощью двух и четырех высокоскоростных видеокамер для увеличения количества измерений (по сравнению с использованием одной видеокамеры) за полный оборот лопасти вертолета и расширения суммарного углового диапазона измерений.

Основными задачами, решаемыми оптическим каналом измерения, являются:

- прием видеокadra с высокоскоростной видеокамеры;
- обнаружение лопасти на видеокadre;
- измерение положения торца лопасти в системе координат вертолета;
- идентификация лопастей.

Для решения этих задач предлагается комплекс алгоритмов обработки и анализа видеоинформации, основанный на методах, используемых в системах технического зрения.

Базовая задача проводимых исследований – обнаружение лопасти на видеокadre, получаемом с высокоскоростной видеокамеры.

Первая задача, которую необходимо решить при формировании алгоритма обнаружения, – выбор признака, характеризующего объект интереса (лопасть). Выявление признака на изображении позволяет принять решение о принадлежности распознаваемого объекта к лопасти или фону.

Традиционно в качестве рабочих признаков объектов выбираются, например, распределение яркости, цвет, форма, текстура поверхности и пр.

В рассматриваемом случае наиболее эффективно с точки зрения скорости обработки и с учетом монохромности изображения использование признака распределения яркости. При этом предлагается, что распределения яркости объекта (лопасти) и фона различаются, что позволяет выделить изображение объекта с требуемой надежностью.

По результатам экспериментов гистограммы распределения яркостей объекта и фона пересекаются, что не позволяет реализовать безошибочное разделение объекта и фона (рисунок 3).

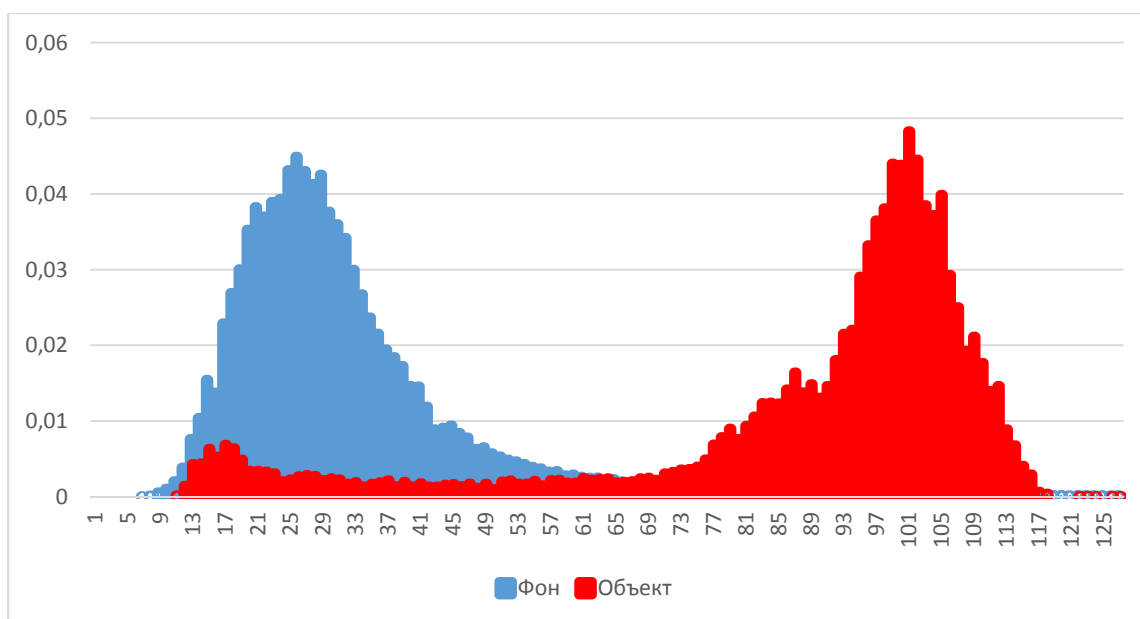


Рисунок 3. Нормированные гистограммы яркостей фона и объекта

Для увеличения точности сегментации лопасти-фон в подобных случаях наиболее эффективно использование статистических методов обнаружения.

Для оценки возможности выделения лопасти по выбранному признаку были рассмотрены статистические критерии: минимального риска Байеса, идеального наблюдателя Зигерта-Котельникова и Фишера. Проведенные исследования показали, что для повышения надежности обнаружения в соответствии с предъявляемыми требованиями необходимо дополнительное расширение признакового пространства. В качестве дополнительного признака предложено использовать площадь связанных областей, полученную после бинаризации изображения.

Для повышения качества оценки положения торца лопасти были определены меры по улучшению условий наблюдения, в частности, с целью уменьшения влияния неоднородной текстуры фона.

Основная цель улучшения условий наблюдения – уменьшение дисперсии значений признака фона и увеличение расстояния между значениями признаков объекта и фона.

На эффективность процедуры выделения границ изображений лопасти и фона воздействуют два фактора:

- 1) низкая контрастность между лопастью и фоном;
- 2) текстура фона, затрудняющая выделение границы между лопастью и фоном.

Таким образом, для повышения точности и надежности оценки необходимо компенсировать влияние этих факторов, т.е. повысить контрастность между лопастью и фоном и сформировать однородную по яркости текстуру фона.

Один из вариантов увеличения контрастности изображения – использование дополнительной подсветки.

На основе проведенных экспериментов установлено, что целесообразно использовать для подсветки лопасти светодиодный прожектор мощностью 30 Ватт (3000 Лм).

Реализация подсветки позволила получить следующий результат – контраст

$$K = (B_l - B_\phi) / B_l ,$$

где B_l – яркость лопасти, B_ϕ – яркость фона,

между лопастью и фоном на изображении без использования подсветки – 0,4, с использованием подсветки – 0,8.

Таким образом, использование подсветки повысило контраст в 2 раза.

Для уменьшения дисперсии значений признака фона предложено использовать экран, расположенный в поле зрения видеокамеры и покрытый черной (контрастной по отношению к лопасти) краской.

В результате улучшения условий наблюдения нормированные гистограммы распределений яркости объекта и фона практически не пересекаются (рисунок 4), что делает возможным практически безошибочное обнаружение объекта.

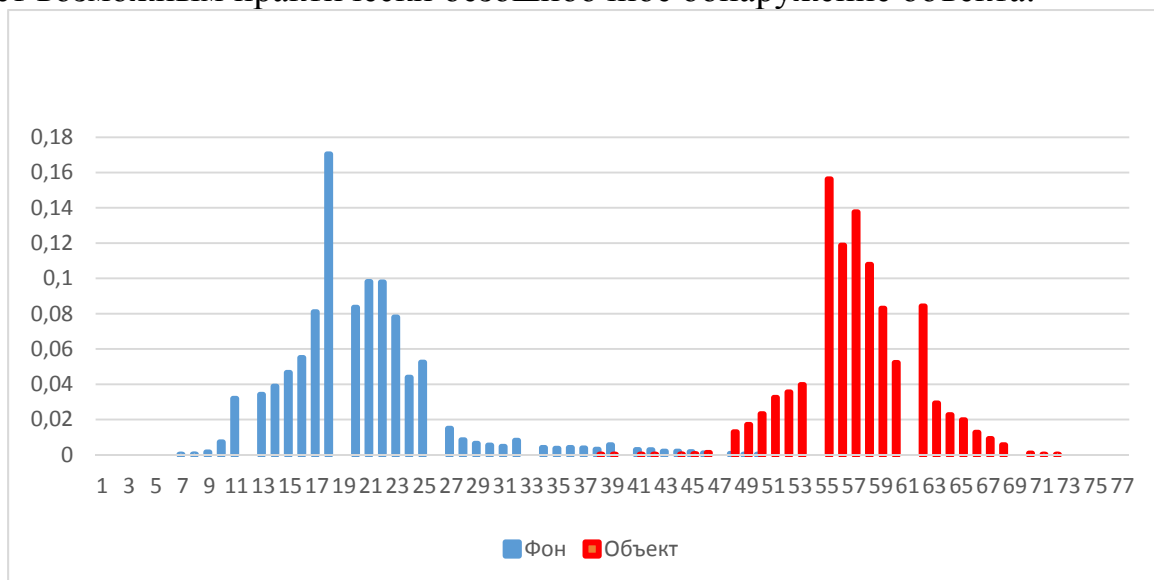


Рисунок 4. Нормированные гистограммы яркостей фона и объекта

Структура комплекса алгоритмов, реализуемых при обработке каждого видеокadra (без идентификации), приведена на рисунке 5.

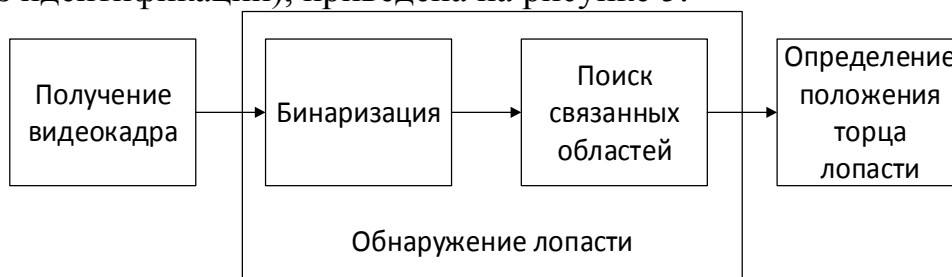


Рисунок 5. Структура комплексов алгоритмов

После проведенной работы по улучшению условий наблюдения становится возможным сегментировать изображение. Для этого используется пороговая бинаризация

$$B_{\text{бин}} = \begin{cases} 0, & B_{\text{исх}} \geq B_{\text{пор}} \\ 1, & B_{\text{исх}} < B_{\text{пор}} \end{cases},$$

где $B_{\text{бин}}$ – яркость бинаризованного изображения, $B_{\text{исх}}$ – яркость исходного изображения.

Порог $B_{\text{пор}}$ выбирается как среднее между математическими ожиданиями яркостями фона $M_{\text{ф}}$ и лопасти $M_{\text{л}}$ перед каждым экспериментом.

В итоге получаем бинарное изображение лопасти (белая область) и фона (черная область). Для того, чтобы отделить область, характеризующую положение лопасти, от ложных белых областей, которые могут быть получены из-за шумов, используется алгоритм для поиска связанных областей – метод «лесного пожара».

В результате работы алгоритма получается множество связанных областей, одна из которых характеризует положение лопасти. Так как наиболее крупным контрастным объектом на фоне является лопасть, то для ее выделения производится поиск наибольшей по площади связанной области (с ограничением на минимально возможную площадь). После ее нахождения определяется координата в пикселях нижней границы относительно начала кадра в системе координат видеокамеры $Ox_{\text{cam}}Y_{\text{cam}}$ (рисунок 6).

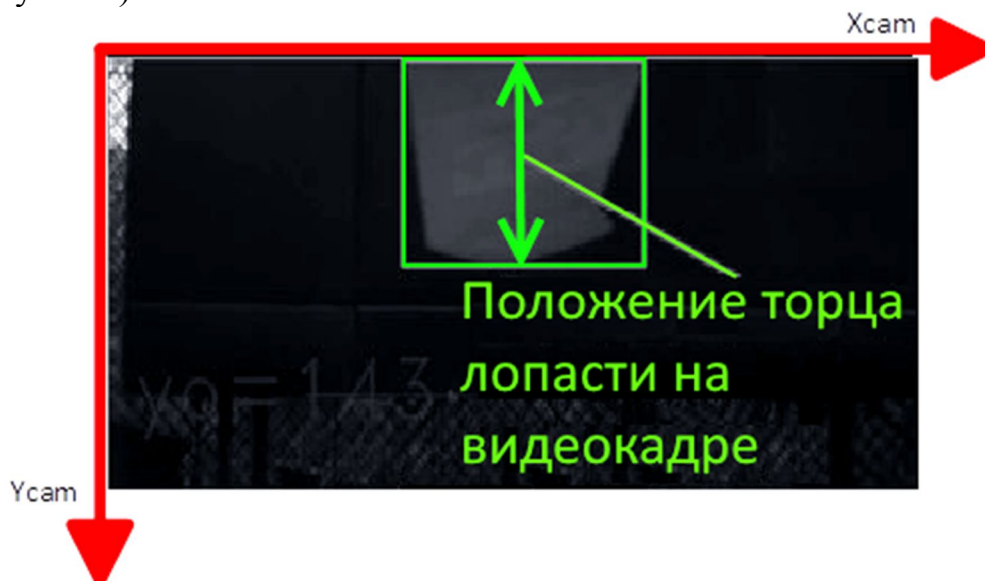


Рисунок 6. Результат работы алгоритма обнаружения и измерения положения торца лопасти в системе координат камеры

Для измерения перемещения торца лопасти в системе координат вертолета относительно положения лопасти, в покое предварительно проводится процедура калибровки видеокамеры. Она необходима для определения коэффициентов дисторсии и коэффициента перевода отклонений торца лопасти из пикселей (на видеокадре) в миллиметры (в системе координат видеокамеры или вертолета).

Далее производится перевод из системы координат видеокамеры в систему координат вертолета.

Последним этапом данного алгоритма является идентификация лопастей. На исследуемых винтах расположены две лопасти. При этом только одна из лопастей

оснащена тензометрическими датчиками. Визуально лопасти не имеют различий (по цвету и текстуре), однако их индивидуальные траектории движения могут различаться. Следовательно, для повышения точности исследований требуется отделить измерения одной лопасти от другой. Однако без дополнительных манипуляций с текстурой лопасти практически сложно идентифицировать разные лопасти.

Для решения задачи идентификации предлагается наносить на поверхность одной из двух имеющихся лопастей контрастный маркер квадратной формы, который обнаруживается с помощью алгоритма, схожего с алгоритмом с поиском лопасти. На рисунке 7 представлены примеры обнаружения и идентификации двух разных лопастей.

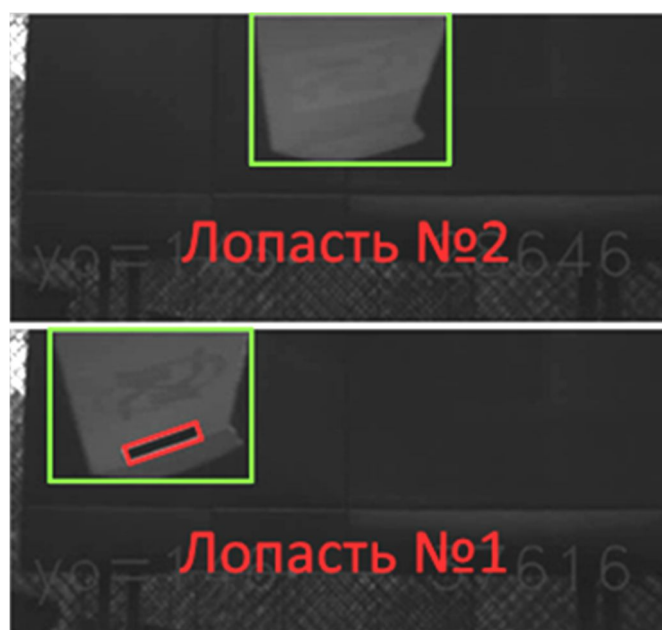


Рисунок 7. Примеры обнаружения и идентификации лопастей

В **четвертой** главе рассматривается разработанный двухканальный программно-аппаратный комплекс, предназначенный для измерения положения лопасти.

На рисунке 8 представлена схема аппаратной части программно-аппаратного комплекса (ПАК).

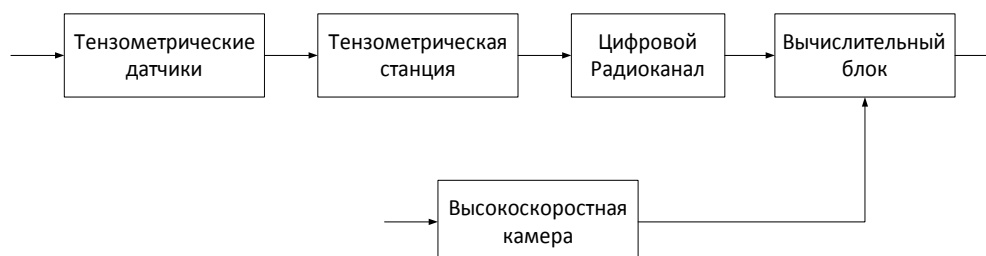


Рисунок 8. Схема аппаратной части ПАК

В соответствии со схемой в тензометрическом канале сигналы от тензометрических датчиков, расположенных на поверхности исследуемой лопасти и измеряющих ее деформацию, поступают на тензометрическую станцию. Основная

задача тензометрической станции – формирование сообщений с результатами измерений с определенной частотой и их передача по цифровому радиоканалу. С помощью цифрового радиоканала информация передается в вычислительный блок.

Вторым каналом является канал оптических измерений. В этом канале высокоскоростная видеокамера принимает видеоинформацию о состоянии области интереса, содержащей изображение лопасти, и передает полученные изображения (видеокадры) в вычислительный блок.

Вычислительный блок, расположенный в наземном пункте управления, выполняет следующие функции:

- прием и последующая обработка тензометрических измерений;
- прием видеокadra и его обработка с целью получения оптических измерений положения торца лопасти относительно видеокамеры;
- обработка результатов измерений после эксперимента.

В тензометрическом канале на исследуемой лопасти размещены фольговые тензорезисторы типа КФ5П1-20-200 с базой 20 мм, которые были включены по полной мостовой схеме. Тензометрическая станция состоит из платы микроконтроллера (ATMEGA-328), передающего модуля (XBee) и источника питания.

Аппаратная структура оптического канала измерения состоит из высокоскоростной видеокамеры фирмы Allied Vision Tech – Prosilica GE680 (частота съемки 200 кадров в секунду, разрешение - 640×480 пикселей) с объективом Computar M0814MP (фокусное расстояние 8 мм., угол поля зрения по горизонтали 56°).

В качестве вычислительного блока используется персональный компьютер со следующими характеристиками:

- центральный процесс Intel Core I7 2600 3.4 ГГц;
- ПЗУ на основе высокопроизводительного RAID-массива, состоящего из твердотельных жестких дисков SSD Intel 520.

Программная часть ПАК обеспечивает реализацию описанных алгоритмов.

С помощью разработанных программ решаются следующие задачи:

- 1) получение сигналов тензометрической станцией с тензометрических датчиков и их оцифровка;
- 2) формирование сообщения тензометрической станцией с результатами измерений для последующей передачи его по цифровому радиоканалу вычислительному блоку;
- 3) получение тензометрических измерений вычислительным блоком и сохранение результата измерений (по 20 измерений на каждый оборот винта) для различных режимов работы;
- 4) получение вычислительным блоком видеокadров от высокоскоростной видеокамеры;
- 5) обнаружение на видеокadрах изображения лопасти;
- 6) идентификация лопасти;
- 7) определение координат торца лопасти с последующим сохранением результатов измерения (не менее одного измерения на каждый оборот винта) для различных режимов работы;

8) комплексное измерение положения торца лопасти (в системе координат вертолета, по 20 измерений на каждый оборот винта) для различных режимов работы.

Программная составляющая ПАК разделяется на две части: ПО тензометрической станции и ПО вычислительного блока. В ПО тензометрической станции реализованы алгоритмы, описанные во второй главе. В ПО вычислительного блока реализован комплекс алгоритмов, описанный в третьей главе. В результате разработан программный комплекс, имеющий модульную структуру для согласованной реализации разработанных алгоритмов.

В **пятой главе** приведены результаты экспериментальных исследований. Приведены результаты исследований предложенной двухканальной системы, подтверждающие работоспособность предложенных алгоритмов.

Были решены следующие задачи:

- 1) оценка подобия траектории движения разных лопастей;
- 2) исследование результатов комплексных измерений.

Оценка подобия траектории движения разных лопастей. В процессе исследований было высказано предположение, что две однотипные лопасти, установленные на одном винте, имеют сходные траектории движения и, следовательно, должны иметь сходные измеренные траектории движения (по вертикали, в направлении параллельном оси винта) на любом из возможных режимов работы. Проверка этого предположения позволит подтвердить адекватность и надежность оценок положения лопасти, получаемых с помощью оптического канала измерений. Таким образом, цель данных экспериментов – оценка адекватности оптических измерений и оценка устойчивости результатов.

Суть экспериментальных исследований состоит в измерении и сопоставлении положений торцов 2-х лопастей в идентичных условиях работы винта. Было проведено два эксперимента (эксперимент №1 и №2), в каждом из которых проведены измерения траекторий движения торцов обеих лопастей. Эксперименты отличались длительностью и количеством участков с разным шагом лопастей.

На каждом, полученном экспериментально, графике были выбраны участки с постоянным режимом работы винта (шаг лопастей, частота оборотов) и рассчитаны математические ожидания (МО) и среднеквадратические отклонения (СКО).

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Характер траекторий движения лопастей №1 и №2 сходен во всем диапазоне изменения тяги винта, так как максимальные различия в МО не превышают в эксперименте №1 - 4,5 мм, а в эксперименте №2 - 2,6 мм
2. Отличия траекторий движения лопастей (при схожести характера траекторий) могут быть связаны с различиями балансировки лопастей.
3. Изменения СКО (во всем диапазоне тяги от 0 до 162 кг) не превышают 2 мм, что с точки зрения предъявляемых требований пренебрежимо мало.

Таким образом, устойчивость результатов, полученных в проведенных экспериментах, подтверждает надежность оптических измерений.

Исследование результатов комплексных измерений. Реализация комплексных (оптических и тензометрических) измерений должна обеспечивать выполнение поставленных требований в части частоты, точности, диапазона

измерений, а также системы координат. Выполнение данных требований является условием работоспособности.

Цель экспериментов – проверка работоспособности разработанной двухканальной системы измерений на основе сопоставления экспериментальных данных и предъявляемых требований. Для выполнения поставленной цели необходимо провести измерения положения торца лопасти на различных режимах работы винта.

Было проведено два эксперимента, в каждом из которых был участок раскрутки винта, участок с выходом на заданные обороты с нулевым шагом лопастей, несколько участков с разным шагом лопастей и участок остановки винта. Эксперименты различались длительностью и количеством участков с разным шагом лопастей.

Базовая задача комплексирования – расчет коэффициентов модели пересчета на основе оптических измерений. Полученные коэффициенты позволяют рассчитать отклонения торца лопасти (комплексные измерения) с помощью пересчета тензометрических измерений.

В процессе экспериментов с использованием разработанной методики комплексирования были получены значения величин коэффициентов модели пересчета и определены отклонения торца лопасти.

На рисунке 9 представлен график комплексных измерений для одного из проведенных экспериментов. На горизонтальной оси находится номер измерения (измерение проводится с шагом в 5 миллисекунд).

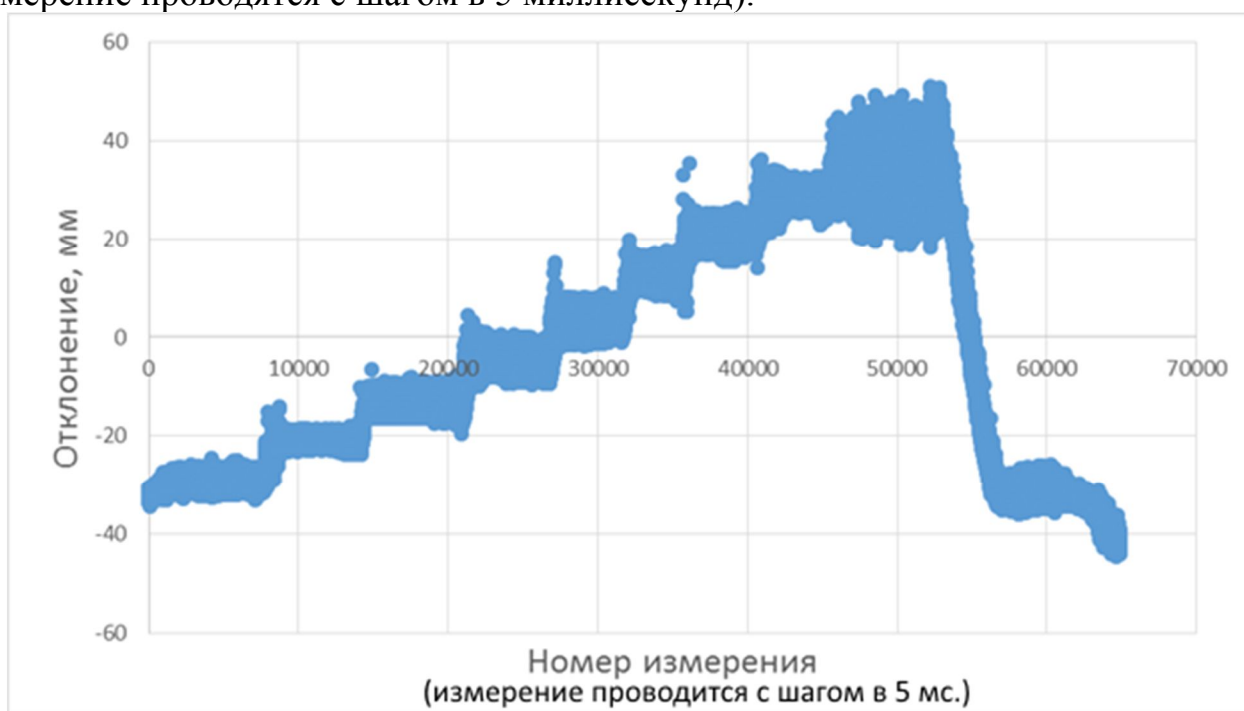


Рисунок 9. График комплексных измерений

Порядок эксперимента:

- 1) Разгон несущего винта вертолета до 350 об/мин. с нулевым шагом лопастей (диапазон измерений от 0 до 4000 измерений);

- 2) Дискретное изменение шага лопастей – 8 режимов (диапазон измерений от 4000 до 55000);
- 3) Останов несущего винта (диапазон измерений от 55000 до 65000).

На графике (рисунок 6) в диапазоне от 4000 до 45000 измерений были выбраны 8 участков с постоянными режимами работы винта (шаг лопастей, частота оборотов), рассчитаны математические ожидания (МО) и среднеквадратические отклонения (СКО). Полученные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1. МО и СКО положения лопасти

Номер участка	Диапазон измерений (шаг измерения 5 мс.)	Тяга, кг	МО, мм	СКО, мм
1	4000-5000	0	-28,93	1,42
2	11000-12000	27	-21,41	0,88
3	16000-18000	50	-13,09	0,88
4	23000-24000	72	-4,56	2,01
5	28000-29000	94	3,25	2,83
6	33000-34000	121	7,43	2,17
7	39000-40000	144	20,76	2,15
8	44000-45000	162	28,46	1,77

Корректность пересчета модели. В соответствии требованием по точности максимальная ошибка измерения положения торца лопасти должна удовлетворять следующему условию

$$|\Delta_{\max}| \leq 3 \cdot \sigma_{mp} = 30 \text{ мм.}$$

Будем считать, что выполнение данного требования соответствует подтверждению адекватности модели во всем рабочем диапазоне измерений. Параметр $|\Delta_{\max}|$ определяется следующим образом

$$|\Delta_{\max}| = \max(y_{\text{комп}} - y_{\text{опт}}),$$

где $y_{\text{комп}}$ – комплексные измерения, $y_{\text{опт}}$ – оптические.

Корректность математической модели, обеспечивающей получение результатов комплексных измерений, может быть подтверждена путем сравнения полученных значений положения лопасти с точными.

Принимая во внимание, что оптические измерения являются точными, необходимо оценить ошибки (относительно оптических измерений) комплексных измерений, полученных в результате использования коэффициентов перехода. Абсолютно точные комплексные измерения (идеальная модель) соответствуют диагональной прямой на рисунке 10 (на горизонтальной оси находятся значения комплексных измерений, на вертикальной оси – оптические измерения).

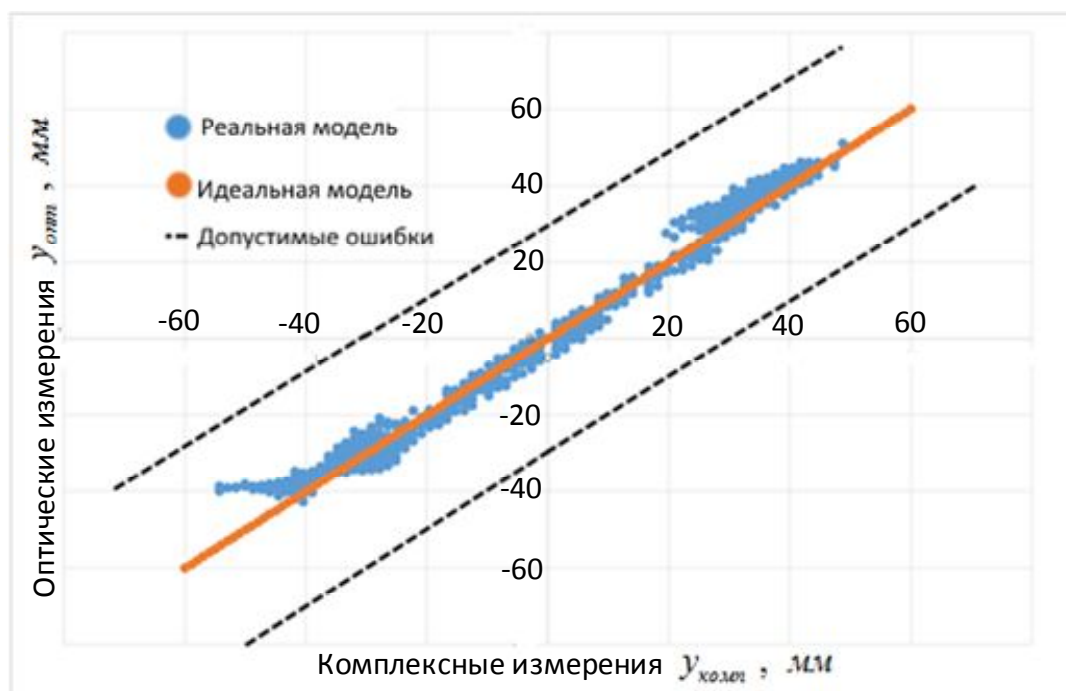


Рисунок 10. Адекватность предложенной модели

На графике видно, что реальные значения комплексных измерений качественно соответствуют оптическим измерениям. Количественные значения ошибок не превышают допустимых значений. Таким образом, предложенная и реализованная модель обеспечивает достаточно точные комплексные измерения положения торца лопасти и является корректной.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показано, что с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса двухканальной системы измерений (оптический и тензометрический каналы) обеспечиваются измерения положения торца лопасти:
 - с частотой измерений $f = 200 \text{ 1/c}$;
 - на всем круговом диапазоне ($0 - 360^\circ$) положения лопасти;
 - со среднеквадратической ошибкой $\sigma \leq 10 \text{ мм}$ измерения положения торца лопасти в системе координат вертолета в вертикальной плоскости, что удовлетворяет предъявляемым требованиям по частоте измерений, диапазону измерений, точности и системе координат;
2. Предложена методика комплексирования оптических и тензометрических измерений, включающая математическую модель пересчета тензометрических измерений в отклонения торца лопасти в системе координат видеокамеры (которая позволяет пересчитать измерения в систему координат вертолета);
3. Разработан программно-аппаратный комплекс двухканальной системы измерений, обеспечивающий измерения положения торца лопасти вертолета;
4. Разработан комплекс алгоритмов, позволяющий динамически измерять положения торца лопастей и включающий следующие частные алгоритмы:
 - пересчета значений тензометрических измерений в линейные перемещения торца лопасти;
 - обнаружения и идентификации лопасти на принимаемых видеокдрах;
 - измерения положения торца лопасти в вертикальной плоскости в динамическом режиме;
 - комплексирования тензометрических и оптических измерений;
5. Повышение точности определения положения торца лопасти по вертикали достигнуто использованием методов улучшения условий наблюдения, включающих выравнивание текстуры фона и повышение контрастности объектов «лопасть-фон»;
6. Для повышения количества измерений в оптическом канале за полный оборот лопасти были рассмотрены варианты с использованием двух и четырех видеокамер.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:

1. Аникин, В.А. Оценка положения лопасти вертолета двухканальной системой измерений [Текст] // Научный Вестник МГТУ ГА / Аникин В.А., Ким Н.В., Прохоров П.Д. – М., 2016. – Т. 19. – № 06. – С. 77-85.
2. Ким, Н.В. Обработка и анализ изображений высокодинамичных объектов в масштабе реального времени [Текст] // Вестник Московского авиационного института / Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, П.Д. Прохоров. – М: МАИ, 2015. – Т 22. – С. 38-46.
3. Прохоров, П.Д. Организация оптических измерений положения лопастей вертолета в динамике [Текст] // Труды МАИ. – М., 2016. – Вып. № 86.

Прочие публикации, включая тезисы докладов российских и международных конференций:

4. Аникин, В.А. Некоторые вопросы создания скоростного БЛА вертолетного типа [Текст] // Материалы девятой научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и четвертой молодежной школы семинара «Управление и обработка информации в технических системах» / Аникин В.А., Ким Н.В., Прохоров П.Д. – Таганрог, 2014. – С. 219-226.
5. Аникин, В.А. Оценка положения лопастей вертолета в реальном времени [Текст] // 13-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2014» / Аникин В.А., Ким Н.В., Прохоров П.Д. – М., 2014. – С. 526-527.
6. Аникин, В.А. Разработка двухканальной системы измерений положения лопасти вертолета [Текст] // Научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления – 2014» / Аникин В.А., Ким Н.В., Прохоров П.Д. – М., 2014. С. 45-47.
7. Ким, Н.В. Двухканальная система измерений положения лопастей вертолета [Текст] // Сборник докладов X-й Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» / Ким Н.В., Прохоров П.Д. – М., 2015. С. 16-20.
8. Прохоров, П.Д. Двухканальная система измерений положения лопастей вертолета [Текст] // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2015» / Прохоров П.Д. – М., 2015. – С. 41.
9. Прохоров, П.Д. Двухканальная система измерений положения лопасти вертолета [Текст] // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов / Прохоров П.Д. – М., 2017. – С. 992.

10. Прохоров, П.Д. Измерения положения лопасти вертолета с помощью высокоскоростной видеокамеры [Текст] // Научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления – 2016» / Прохоров П.Д. – М., 2016. С. 9.
11. Прохоров, П.Д. Оптическая система измерения положения лопастей вертолѐта [Текст] // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодѐжная научная конференция: Сборник тезисов докладов / Прохоров П.Д. – М., 2016. – Т. 2. – С. 22-23.
12. Прохоров, П.Д. Распознавание высокодинамических объектов на примере лопасти вертолета [Текст] // 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2015» / Прохоров П.Д. – М., 2015. – С. 323-325.