

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор

Ким Николай Владимирович

Научный консультант: доктор технических наук

Аникин Виктор Андреевич

Москва 2017 г.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА</b> .....	11
1.1. Эффективность управления положением лопастями несущего винта вертолета .....	11
1.2. Выбор каналов измерения .....	13
1.3. Структура системы измерений .....	16
1.4. Необходимость комплексирования измерений.....	21
1.5. Методика комплексирования тензометрических и оптических измерений	22
1.6. Процедура расчета коэффициентов модели .....	22
1.7. Постановка задачи.....	25
1.8. Выводы .....	27
<b>2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА НА ОСНОВЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ</b> .....	28
2.1. Тензометрические измерения деформации лопасти .....	28
2.2. Структура тензометрической системы измерения .....	31
2.3. Программно-алгоритмическое обеспечение .....	35
2.4. Исследование тензометрической системы измерений .....	36
2.5. Выводы .....	41
<b>3. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ</b> .....	43
3.1. Варианты реализации оптических измерений .....	43
3.2. Комплекс алгоритмов обработки и анализа видеоинформации .....	50
3.3. Обнаружение с улучшенными условиями наблюдения.....	66
3.4. Измерение положения торца лопасти .....	71
3.5. Идентификация лопастей .....	79
3.6. Выводы .....	82
<b>4. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ</b> .....	84

4.1 Описание программно-аппаратного комплекса двухканальной системы измерений положения лопасти .....	84
4.1.1 Аппаратная часть программно-аппаратного комплекса .....	84
4.1.2. Тензометрический канал .....	85
4.1.3. Оптический канал.....	91
4.2. Программная часть программно-аппаратного комплекса .....	93
4.2.1. Программное обеспечение тензометрической станции.....	94
4.2.2. Программное обеспечение вычислительного блока .....	95
4.3. Выводы .....	102
<b>5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ .....</b>	<b>103</b>
5.1. Оценка точности оптической системы на основе обработки изображений .....	103
5.2. Оценка подобия траекторий движения лопастей .....	105
5.3. Комплексные измерения .....	112
5.4. Выводы .....	124
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>125</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>126</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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 [1].

Возможное опасное сближение лопастей может произойти из-за следующих причин [2, 3]:

- 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.

Тема диссертации – исследование и разработка подходов, обеспечивающих измерения положения лопастей на различных режимах работы винта вертолета.

Существует ряд работ по определению положения лопастей вертолета. Наиболее часто для этой цели используются оптические или лазерные системы измерения [4].

Так, для контроля положения лопастей фирмой Scientific Atlanta была разработана оптическая измерительная система RADS AT [5, 6], недостатком

которой является проведение измерений отклонения торцов лопастей в одной точке.

В работе [7] предложена видеограмметрическая система, реализующая лазерно-оптический метод исследования траекторий движения и изгибно-крутильных деформаций лопастей несущих винтов. Особенность данной работы, заключается в том, что измерительная система находится не на самом объекте исследования, а отдельно в зоне прямой видимости. Подобный подход рассмотрен в [8].

В работе [9] предполагается использование установленной на фюзеляже вертолета оптической системы. В [10, 11] представлено развитие данной работы.

Известны зарубежные аналоги измерительных систем, основанных на использовании оптических методов измерения. Одним из них является патент Maxwell R.H. «Optical tracker system for determining the position of a rotating body» [12]. Кроме того, опубликованы патенты на систему определения соконусности несущего винта и межлопастного расстояния с помощью двух оптических преобразователей авторов Simpkins W., Wilson J., Dorris D. «Systems and Methods of Tracking Rotor Blade» [13], а также патент Christopher I.M. для измерения положения лопастей [14].

В работе [15] Завальнюка О.Т. и Майорова М.А. «Автоматическая телевизионная система измерения степени отклонения вращающихся лопастей вертолетов» для измерения положения торцов лопастей предлагается использовать видеокамеры на основе четырех линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью, которые установлены в определенных местах вертолета. Однако такой подход не позволяет получить отклонения торца лопастей на всем круговом диапазоне положения лопасти.

В патенте Якеменко Г.В. и др. «Система измерения сближения лопастей соосного вертолета» [16] оптическим датчиком принимается лазерное излучение от встроенных в законцовки лопастей источников. В [17] описан зарубежный аналог данной работы.

В рассмотренных работах измерительная система находится на фюзеляже вертолета или дистанционно удалена от вертолета. Первый вариант обеспечивает получение измерений в ограниченном поле зрения измерительной системы секторе. А второй не позволяет потенциально использовать данную измерительную систему в процессе полета вертолета.

В работе Y. Liu, A. Lacher, G. Wang, A. Purekar, M. Yua «Wireless fiber optic sensor system for strain and pressure measurements on a rotor blade» реализован иной подход к измерению положения лопасти [18]. Здесь производятся измерения деформации и давления на лопасть, для чего используется оптоволоконная система с оптическими сенсорами, установленными на поверхность лопасти. Подобная система измерений, описана в работе H. Youwei, C. Weizhen, L. Yan, L. Wanxin «Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications» [19]. В этой работе для измерений параметров движения лопастей используются детекторы, установленные на втулке несущего винта и принимающие излучение от светодиодов, расположенных на лопастях. К недостаткам этих систем следует отнести относительно низкую надежность системы, а также сложности при получении измерений и при установке оборудования на лопасти.

**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, 2014 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.

### **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.

**В первой главе** определяются требования к рассматриваемой системе измерений. Рассматриваются основные методы измерения, применимые к решаемой задаче. На основе анализа методов измерения было произведено сравнение и выбран вариант двухканальной системы измерения состоящей из оптического и тензометрического каналов. Сформирована структура системы измерений и определен состав каждого из каналов. Описан состав экспериментальной установки и приведена функциональная схема двухканальной системы измерений. Предложена методика комплексирования оптических и тензометрических измерений. Вводится математическая модель пересчета тензометрических измерений и описана процедура расчета коэффициентов данной математической модели. В итоге сформулирована общая постановка задачи и определен список решаемых частных задач.

**Вторая глава** посвящена тензометрическому каналу измерения. Рассматривается задача измерения положения лопасти несущего винта вертолета (с креплением бесшарнирной втулкой) в различных точках траектории движения с помощью измерения деформации лопасти. Произведен анализ типов тензорезисторов и способов их включения с последующим выбором их конфигурации на лопасти. Описана структура тензометрического канала. Предложен способ передачи информации по цифровому радиоканалу от тензометрической станции на вычислительный блок минуя скользящие контакты с целью избавления от помех, искажающих результаты измерений. Предложена математическая модель пересчета тензометрических измерений. Приведено программно-алгоритмическое обеспечение системы тензоизмерений. В итоге проведенные эксперименты подтвердили работоспособность метода измерений.

**В третьей главе** рассматривается оптический канал измерения. Обоснован выбор высокоскоростной видеокамеры и частоты съемки при заданных требованиях.

Приведена аппаратная составляющая оптического канала, рассмотрены ее варианты с четырьмя видеокамерами и с двумя. Произведен подбор кодека для сжатия видеопоследовательности на вычислительном блоке с целью минимизации загрузки ПЗУ. Определены основные задачи комплекса алгоритмов обработки и анализа видеоинформации с целью получения измерений отклонения торца лопасти. Произведен поиск признака, характеризующий объект интереса (лопасть) на видеокадре. Поскольку предложенные признаки не удовлетворяют поставленным требованиям по точности сегментации лопасть-фон, предложены методы улучшения условий наблюдения: повышение контраста лопасть-фон и улучшение неоднородной по яркости текстуры фона. В результате повышена точность определения положения торца лопасти по вертикали. Предложен метод идентификации лопастей, который позволил проводить измерения каждой из них отдельно.

**Четвертая глава** посвящена описанию программно-аппаратного комплекса (ПАК) двухканальной системы измерений и экспериментам. Представлена схема ПАК, описан аппаратный состав тензометрического и оптического каналов. Описано программное обеспечение каждого из каналов.

**В пятой главе** произведена оценка точности оптического канала измерений, оценка подобия траектории движения лопастей. По методике комплексирования получены комплексные измерения. Полученные результаты экспериментальных исследований подтвердили физическую реализуемость измерений и их соответствие поставленным требованиям к комплексной системе измерений.

# 1. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА

## 1.1. Эффективность управления положением лопастями несущего винта вертолета

Основные проблемы, осложняющие применение различных бесконтактных методов измерений положения лопасти при работающем винте, – это высокая скорость протекания исследуемых процессов и требования к точности измерений. Для оценки начальных требований к характеристикам проектируемой системы определим требуемую частоту измерений (производительность измерений). Этот параметр может быть определен, исходя из следующих соображений. Пусть нас интересуют измерения положения лопасти (на различных режимах работы) на всем круговом диапазоне ее положения. При этом за полный оборот лопасти необходимо сделать  $n$  измерений.

В этом случае интервал времени между измерениями определяется как

$$T = L / (V \cdot n), \quad (1.1)$$

где  $L$  – длина окружности,

$V$  – скорость движения конца лопасти.

Требуемая частота измерений определяется по следующей формуле

$$f = 1/T. \quad (1.2)$$

Например, при длине лопасти 2000 мм, линейной скорости движения конца лопасти  $V \leq 125,6$  м/с (частота вращения винта – до 10 об/с),  $n = 20$ , в соответствии с (1.1), получим

$$T_{mp} \leq 2 \cdot \pi \cdot 2000 / (125600 \cdot 20) = 0,005 \text{ с или } 5 \text{ мс}, \quad (1.3)$$

$$f_{mp} \geq 200 \text{ 1/с.}$$

Следующий вариант оценки производительности измерений основан на учете параметров колебаний лопасти во времени. Если известен спектр перемещения лопасти, то частота измерений  $f$  определяется по теореме Котельникова-Шеннона [20], как

$$f = \frac{1}{2 \cdot F_{\max}}, \quad (1.4)$$

где  $F_{\max}$  – максимальная частота спектра,

и интервал времени между измерениями

$$T = 1/f. \quad (1.5)$$

На этапе обликowego проектирования системы измерений параметр  $F_{\max}$  неизвестен, поэтому его выбирают на основе экспертной оценки. Предварительный анализ исследуемых процессов показывает, что при указанных выше параметрах лопасти можно принять, что

$$F_{\max} \leq 100 \Gamma\omega, \quad (1.6)$$

откуда в соответствии с (1.4) можно определить рабочую частоту измерений:

$$f_{mp} \geq 200 \text{ 1/c и } T_{mp} \leq 0,005c = 5 \text{ мс.} \quad (1.7)$$

Следующая важная характеристика системы измерения – точность измерений. По предъявляемым требованиям к разрабатываемой системе ошибки измерений положения торца лопасти в вертикальной плоскости должны обеспечивать выполнение условия

$$\sigma(y_i) \leq 10 \text{ мм,} \quad (1.8)$$

где  $y$  – значение измеренного положения лопасти вертолета в вертикальной плоскости,

$i$  – индекс конкретного набора условий измерений, включающий: тип лопасти, режим работы,

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение положений лопасти в процессе функционирования в  $i$ -х условиях.

Таким образом, условия (1.3) или (1.7) определяют требование к производительности системы измерений  $f_{mp} \geq 200 \text{ 1/с}$ , а (1.8) – требование к точности измерений  $\sigma_{mp} \leq 10 \text{ мм}$ .

Следующее требование определяется необходимостью организовать реализацию измерений в диапазоне  $0 \div 360^\circ$  углов поворота винта.

Измерения положения лопасти (в вертикальной плоскости) должны быть реализованы в системе координат вертолета.

## 1.2. Выбор каналов измерения

В разделе рассматриваются особенности различных методов измерения расстояний до объектов. Измерения по способу получения измерительной информации классифицируются на контактные и бесконтактные [21].

**Контактные измерения. Тензометрические измерения.** Основа тензометрических измерений – тензометрические датчики, обеспечивающие измерения деформаций исследуемых объектов, которые могут быть пересчитаны в искомые перемещения [22]. Для достижения высокой точности измерений, уменьшения гистерезиса, температурной стабильности показаний тензорезисторы включают по полумостовой или мостовой схемам [23, 24].

Для преобразования и необходимого усиления получаемых от тензодатчиков сигналов используются так называемые тензостанции.

**Бесконтактные измерения.** Бесконтактные датчики линейного перемещения разделяются по принципу измерений на ультразвуковые, индуктивные, оптические, радиолокационные, емкостные и другие [25]. Далее рассматриваются некоторые методы бесконтактных измерений.

**Ультразвуковые датчики.** Ультразвуковые датчики могут использоваться для измерения расстояния до объектов и их перемещения [25]. Большинство

материалов, отражающих звук, могут использоваться в качестве объектов обнаружения. Для устойчивой работы рекомендуется чтобы поверхность измеряемого объекта была практически перпендикулярна направлению ультразвукового луча. К достоинствам таких датчиков относятся компактность, высокая точность измерений, простота эксплуатации, способность работать в разных условиях. К недостаткам относится сложность установки для измерений положения торца лопасти.

**Индуктивные датчики** линейных перемещений определяют расстояние до объектов, состоящих из металла [26]. Из их достоинств стоит отметить простоту и надежность, из недостатков – малую чувствительность и небольшой диапазон измерений [27], недостаточный для определения перемещения торца лопасти.

**Оптические датчики** позволяют определять положение объектов, в том числе и тех, что перемещаются с большой скоростью [28, 29, 30, 31].

К достоинствам относятся простота использования, дальность определения (может достигать сотен метров), высокая точность, материал измеряемого объекта может быть любым, высокое быстродействие, к недостаткам – высокая стоимость.

**Датчики на основе радиолокационных методов.** Определение дальности до объекта реализовывается с помощью радиодальномеров или радиопеленгаторов [32]. Дальность до объекта вычисляется с помощью времени запаздывания отраженного сигнала [33]. Достоинство такого подхода – высокая точность измерений, недостаток – сложность измерений.

**Емкостные датчики** линейных перемещений могут использоваться для определения перемещения объектов, которые могут быть состоять из различных материалов, как металлических, так и неметаллических [25, 34]. К достоинствам таких датчиков относятся малые габариты и вес, высокая чувствительность, простота и надежность, низкое потребление энергии. К недостаткам – высокие требования к экранированию объекта, работа на недостаточных расстояниях для измерения перемещения торца лопасти.

**Высокоскоростные видеокамеры.** К отдельной категории бесконтактных датчиков расстояния можно отнести видеокамеры [35, 36], в том числе и

высокоскоростные [37]. К примеру, для измерения положения лопасти необходимо обнаружить и определить положение лопасти на видеокадре, полученного с видеокамеры. Особенность этого метода измерений состоит в необходимости разработки и реализации алгоритмов обработки изображений.

**Сравнение методов измерения.** В таблице 1.1 приведены основные преимущества и недостатки каждого рассмотренного ранее метода измерений.

Таблица 1.1. Преимущества и недостатки различных методов измерения.

Датчики	Преимущества	Недостатки
Тензометрические	Измерения на всем диапазоне вращения лопасти, высокая точность, простота установки и использования.	Непрямые измерения, температурная погрешность.
Индуктивные	Простота и надежность.	Срабатывание только на металл и абсолютная нечувствительность к другим материалам, малый диапазон измерений.
Ультразвуковые	Сложность установки датчиков для измерения положения торца лопасти.	Зависят от состояния окружающей среды, искажения из-за шумов.
Оптические	Высокая точность и быстродействие.	Зависят от погодных условий, времени суток.
Радиолокационные	Высокая точность измерений.	Сложность, высокая стоимость.
Емкостные	Малые габариты и вес, высокая чувствительность.	Малый диапазон измерений.
Высокоскоростные видеокамеры	Простота установки, высокая точность измерений	Зависят от погодных условий, времени суток, необходимость реализации алгоритмов обработки изображений

В таблице 1.2 показано соответствие различных типов датчиков требованиям к измерениям.

Таблица 1.2. Соответствие различных типов датчиков требованиям к измерениям

Датчики	Производительность	Точность	Требуемый диапазон	Система координат
Тензометрические	+	+	+	–
Индуктивные	+	+	–	+
Ультразвуковые	–	+	+	+
Оптические	+	+	–	+
Радиолокационные	+	+	–	–
Емкостные	+	+	–	+
Высокоскоростные видеокамеры	+	+	–	+

На основе анализа рассмотренных методов измерений были выбраны два из них, которые совместно при условии комплексирования измерений удовлетворяют поставленным требованиям к задаче – оптический и тензометрический методы измерений.

### 1.3. Структура системы измерений

Предлагаемая в работе *двухканальная система измерений* положения торца лопасти несущего винта вертолета включает в себя тензометрическую и оптическую системы измерений [38, 39]. Оба канала измерений работают при частоте измерений 200 Гц, что позволяет по тензометрическому каналу проводить как минимум 20 измерений за полный оборот лопасти, а по оптическому – как минимум 1 измерение при максимальной частоте вращения  $\Omega_{\max} = 600$  оборотов в минуту ( $f_{\max} = 10$  Гц).

#### **Состав тензометрического канала измерения:**

1. Тензометрические датчики, измеряющие относительную деформацию лопасти на участках их размещения.



2. Тензометрическая станция, основная задача которой – регистрация показаний тензометрических датчиков с заданной частотой и формирование сообщений для последующей передачи по цифровому радиоканалу.
3. Вычислительный блок, производящий прием сообщений с измерениями от тензометрической станции и последующую обработку.

**Состав оптического канала измерения:**

1. Высокоскоростная видеокамера.
2. Вычислительный блок (компьютер с ЦП Intel Core I7 2600 3.4 ГГц), принимающий изображения с высокоскоростной видеокамеры и производящий их обработку.
3. Прожектор для улучшения контраста сцены «лопасть–фон».
4. Экран для обеспечения требуемой текстуры фона.

Для исследований разработанной системы измерений использовался штатный электровинтовой стенд АО «Камов», описанный в работе [40] и 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 –  $\Omega_{\max} = 600$  оборотов в минуту), во время которого торцы лопастей несущего винта изменяют свое положение по вертикали (ось  $Oy$ , связанная система 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 1.1.

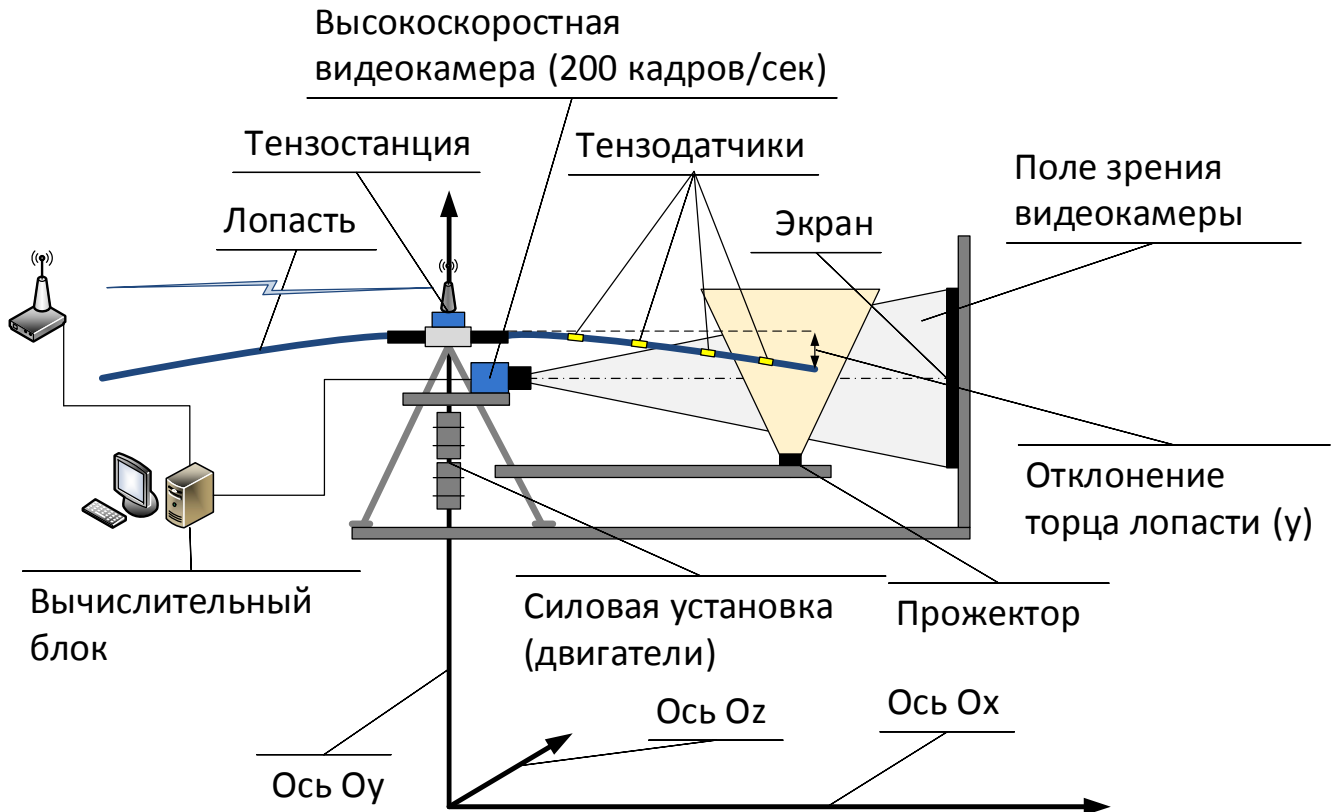


Рисунок 1.1. Экспериментальная установка

Задача разрабатываемой двухканальной системы проводить измерение локального смещения торцов лопастей –  $y$  (см. Рисунок 1.1) в системе координат вертолета  $Oxuz$  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.

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 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.

На рисунке 1.2 представлена функциональная схема двухканальной системы измерений.

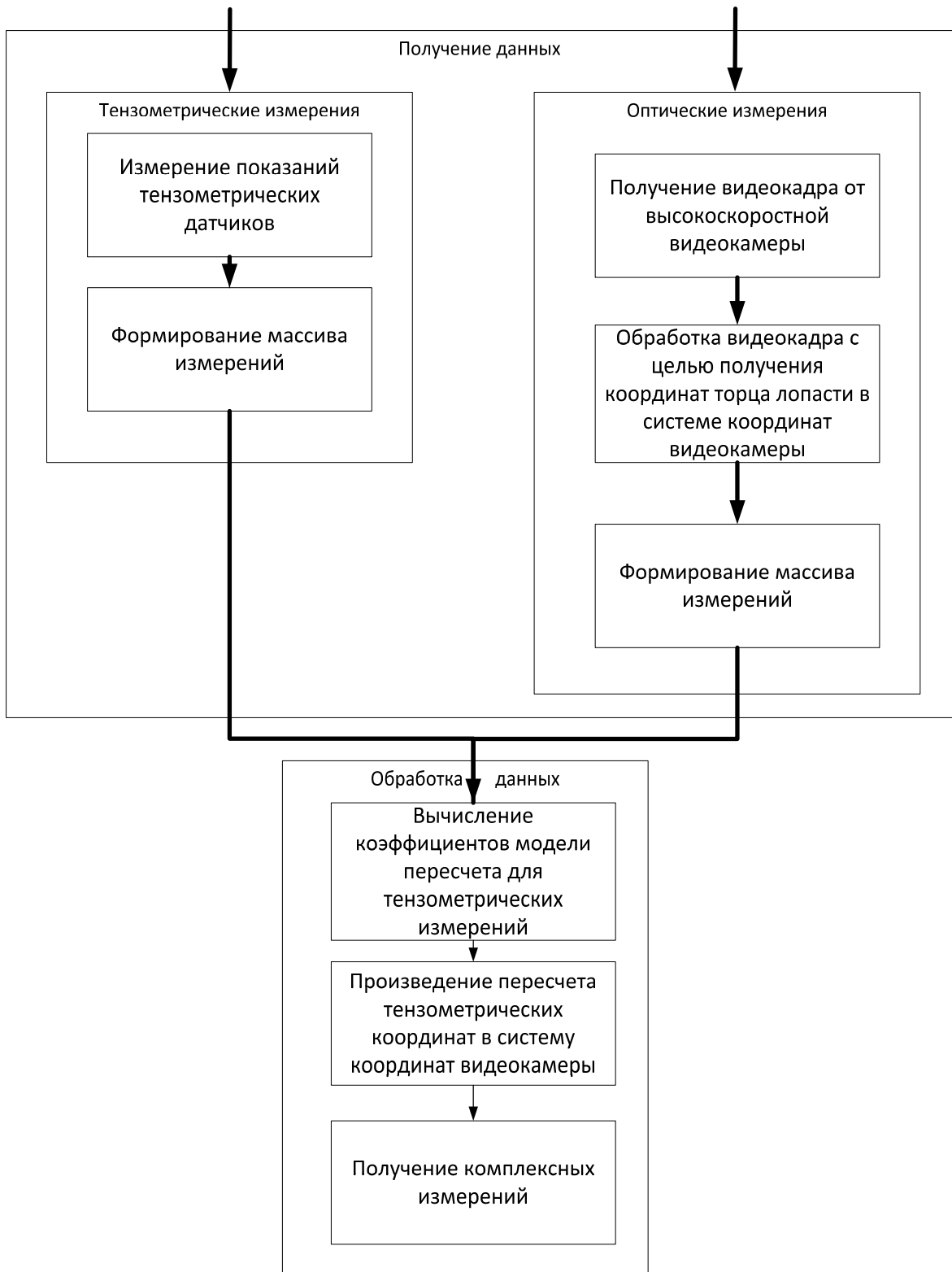


Рисунок 1.2. Функциональная схема двухканальной системы измерений

Преимущество тензометрического канала измерений заключается в том, что обеспечиваются измерения на всем требуемом диапазоне вращения лопасти ( $0 -$

360°). Использование только тензометрического канала измерений затрудняется необходимостью перевода показаний тензометрических датчиков в измерения линейного отклонения торца лопасти в системе координат вертолета, так как измерение каждого тензометрического датчика проводится в его собственной системе координат, что затрудняет получение положения 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).

#### **1.4. Необходимость комплексирования измерений**

Каждый тензометрический датчик, обеспечивая измерения в требуемом диапазоне (0–360°), производит измерения в собственной системе координат, связанной с ним. Однако в соответствии с требованиями необходимо обеспечить измерения в системе координат вертолета. В то же время оптические измерения могут быть переведены в систему координат вертолета, но не обеспечивают требования по диапазону измерений.

Для получения оценок положения лопасти во всем диапазоне измерений и в системе координат вертолета необходимо перевести значения тензометрических измерений в систему координат видеокамеры, которые могут быть пересчитаны в вертолетную систему координат.

## **1.5. Методика комплексирования тензометрических и оптических измерений**

Предлагается следующая методика.

1. Получение тензометрических измерений. Структура и процедура получения тензометрических измерений представлены в разделе 2.
2. Получение оптических измерений. Структура и процедура получения оптических измерений представлены в разделе 3.
3. Выбор набора тензометрических измерений, соответствующих оптическим измерениям. Процедура выбора включает:
  - а) синхронизацию процессов измерений в тензометрическом и оптическом канале;
  - б) определение моментов получения оптической информации (видеокадров), содержащей объекты интереса;
  - в) сбор результатов тензометрических измерений, полученных в соответствующие моменты времени;
  - г) формирование набора тензометрических измерений, соответствующих по времени имеющемуся набору оптических измерений.
4. Расчет коэффициентов модели пересчета тензометрических измерений в систему координат видеокамеры. Процедура расчета представлена ниже.
5. Получение комплексных измерений.

### **1.6. Процедура расчета коэффициентов модели**

Для пересчета измерений в тензометрической системе необходимо ввести модель пересчета этих измерений в систему координат видеокамеры. На рисунке 1.3 приведена схема пересчета тензометрических измерений.

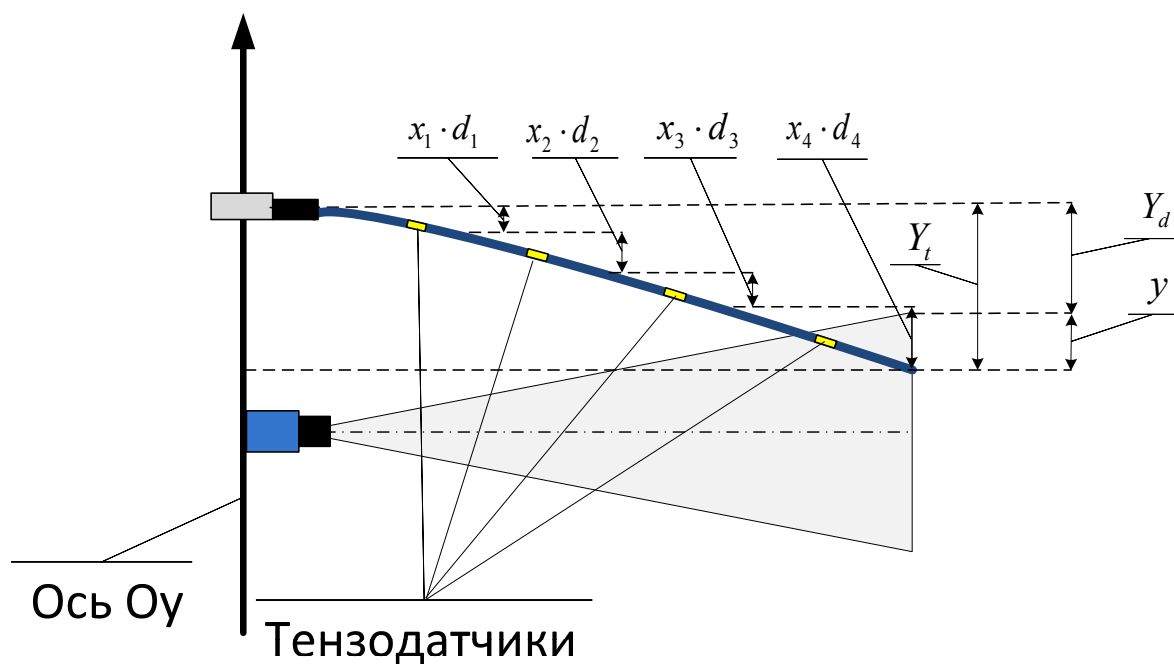


Рисунок 1.3. Схема пересчета тензометрических измерений в линейное отклонение торца лопасти

Для расчета положения торца лопасти по оси  $oY$  (система координат вертолета) предлагается линейная модель следующего вида [разд. 2.2] [38]

$$y = x_0 + \sum_{j=1}^m x_j \cdot d_j, \quad (1.9)$$

где  $y$  – 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  $x_j$  являются весовыми коэффициентами, характеризующими вклад показаний каждого  $j$ -го тензодатчика в значение  $y$ .

В общем случае можно представить измерения тензометрического датчика в виде

$$d = \lambda + \varepsilon, \quad (1.10)$$

где  $d$  – измерение тензодатчика,  $\lambda$  – точное значение деформации лопасти,  $\varepsilon$  – ошибка измерения. Соответственно, измерение оптической системы представимо, как

$$y = \eta + \zeta, \quad (1.11)$$

где  $y$  – измерение оптической системы,  $\eta$  – точное значение измеряемого параметра,  $\zeta$  – ошибка измерения.

После выполнения пункта 3 методики комплексирования получен набор экспериментальных данных  $\{d_i\}$  (тензометрические измерения) и соответствующий им набор  $\{y_i\}$  (оптические измерения),  $i = 1, 2, \dots, n, n \geq l$ , где  $l$  число оцениваемых параметров [41]. Здесь под соответствием понимается факт получения измерений в тензометрическом и оптическом каналах в достаточно короткий интервал времени ( $\Delta t \leq 0,03$  с). Вертикальное перемещение лопасти за этот интервал времени можно считать несущественно малым.

Для вычисления коэффициентов  $x_i$  предлагается использовать так называемый метод расширенных наименьших квадратов [42].

Математическая постановка задачи следующая. Представим измерения тензометрической системы в виде матрицы  $A$  размером  $(m+1) \times n$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ 1 & d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nm} \end{pmatrix}. \quad (1.12)$$

Учитывая (1.10), матрицу  $A$  можно представить в виде

$$A = A' + \delta A = \begin{pmatrix} 1 & \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1m} \\ 1 & \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1m} \\ 0 & \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n2} & \cdots & \varepsilon_{nm} \end{pmatrix}. \quad (1.13)$$

Измерения оптической системы - в виде матрицы  $B$  размером  $n \times 1$

$$B = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}. \quad (1.14)$$

С учетом (1.11), матрица  $B$  имеет вид



$$B = B' + \delta B = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \vdots \\ \zeta_n \end{pmatrix}. \quad (1.15)$$

Необходимо найти такой вектор  $x$  размера  $N \times 1$  что

$$(A' + \delta A)x + B' + \delta B = 0, \quad (1.16)$$

$$\|(\delta A \ \delta B)\|_F^2 = \|\delta A\|_F^2 + \|\delta B\|^2 \rightarrow \min.$$

Данная задача может быть решена с помощью сингулярного разложения [42].

Вводятся матрицы  $C' = (A' \ B')$ ,  $\delta C' = (\delta A' \ \delta B')$

Пусть  $C' = USV^T$  – сингулярное разложение матрицы  $C'$ . В этом случае решение задачи расширенных наименьших квадратов можно представить в следующем виде

$$\tilde{x} = -(A'^T A' - \sigma_{n+1}^2 I)^{-1} A'^T B', \quad (1.17)$$

где  $I$  – единичная матрица,  $\sigma_{n+1}$  – наименьшее сингулярное число матрицы  $C'$ .

Таким образом, решение данной задачи может быть получено как решение задачи безусловной минимизации [41]

$$\frac{\|A'x + B'\|^2}{1 + \|x\|^2} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{(y_i - x_0 - \sum_{j=1}^m x_j \cdot d_{ij})^2}{1 + \sum_{j=1}^m x_j^2} \right) \rightarrow \min. \quad (1.18)$$

## 1.7. Постановка задачи

Рассматривается задача измерений положения лопасти несущего винта вертолета в перпендикулярном плоскости вращения направлении в системе координат вертолета.

После анализа методов измерения было выбрано два метода измерений: оптический и тензометрический.

В таблице 1.3 приведена сравнительная характеристика тензометрической и оптической систем измерения в соответствии с требованиями.

Таблица 1.3. Сравнение тензометрического и оптического методов

Требования	Система измерений		
	оптическая	тензометрическая	двухканальная
Обеспечение необходимой точности измерений	+	+	+
Обеспечение измерений по всему круговому диапазону вращения лопасти	–	+	+
Измерения в системе координат вертолета	+	–	+
Прямые измерения	+	–	+

Из таблицы 1.3 следует, что отдельно каждая из рассмотренных систем измерений не удовлетворяет поставленным требованиям полностью. Однако если использовать их совместно, то все требования выполняются.

В разделе 1.4 представлена разработанная методика «Комплексирования тензометрических и оптических измерений», реализация которой может обеспечить выполнение поставленных задач.

Таким образом, в рамках проводимых исследований необходимо:

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

5. Разработать демонстрационный макет оптической и тензометрической систем.
6. Провести экспериментальные исследования, подтверждающие выполнение системой поставленных требований.

### 1.8. Выводы

1. Определены следующие требования к системе измерения:
  - a) частота измерений должна быть  $f_{mp} \geq 200 \text{ 1/с}$ ;
  - b) измерения должны проводиться на всем круговом диапазоне ( $0 \div 360^\circ$ ) положения лопасти вертолета;
  - c) ошибки измерений положения торца лопасти в вертикальной плоскости должны обеспечивать выполнение следующего условия  $\sigma(y_i) \leq 10 \text{ мм}$ ;
  - d) измерения должны проводиться в системе координат вертолета.
2. Проведен анализ методов измерения по функциональным критериям качества (надежность, точность, производительность) и выбраны два метода измерений – тензометрический и оптический (с помощью высокоскоростной видеокамеры), реализованные предлагаемой двухканальной системой измерений;
3. Предложена методика комплексирования оптических и тензометрических измерений, обеспечивающая выполнение предъявленных требований b и d.

## **2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА НА ОСНОВЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

### **2.1. Тензометрические измерения деформации лопасти**

В данном разделе рассматривается задача измерения положения лопасти несущего винта вертолета (с креплением бесшарнирной втулкой) в различных точках траектории движения с помощью измерения деформации лопасти. Деформации лопасти измеряются с помощью размещенных на ее поверхности четырех групп тензорезисторов (тензометрические датчики). Тензометрические датчики размещаются вдоль лопасти равномерно с шагом между ними 400 мм [43]. Информация от датчиков принимается тензометрической станцией и передается на компьютер (вычислительный блок).

Есть множество стационарных тензометрических станций, с помощью которых проводится измерение деформаций различных конструкций [44] 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. Таким образом, для проведения измерений размещение подобных стационарных тензометрических станций на втулке вращающегося несущего винта вертолета нецелесообразно [43]. Также при использовании подобного оборудования возникают проблемы, связанные с необходимостью обеспечения питания этих устройств и передачей результатов измерения на борт вертолета и далее на компьютер (вычислительный блок). В вычислительном блоке производится расчет положения текущего 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. Передачу информации с тензометрической станции на вычислительный блок предлагается организовать дистанционно, например, по цифровому радиоканалу [43].

Лопастей несущего винта вертолета при вращении испытывают обусловленные многими факторами знакопеременные нагрузки, непрерывно перемещающиеся по их длине, что приводит к появлению различных деформаций [45]. 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 достаточно достоверной информации о характере и параметрах деформаций лопасти винта достаточна установка и анализ информации не более чем с четырех измерительных мостов.

Сравнительный анализ рассмотренных датчиков показал преимущества тензорезисторов при решении поставленных задач. Основа тензометрических измерений – тензометрические датчики, от выбора которых зависит эффективность работы системы [43].

Принцип измерения деформации основан на изменении активного сопротивления при деформации тензорезистора. Конструктивно тензорезистор представляет собой чувствительный элемент с выводными проволочными концами или контактными площадками (для включения в электрическую цепь), закрепленный на гибкой подложке. Установка на исследуемый объект происходит путем приклеивания.

Преимущества использования тензорезисторов:

- дистанционные измерения;

- простой способ установки;
- малые размеры и масса;
- отсутствие искажений поля деформаций исследуемого объекта.

Тензорезисторы разделяются по типу чувствительного элемента и наиболее часто используются следующие [46]:

- проволочные;
- фольговые;
- полупроводниковые.

У проволочных тензорезисторов в качестве чувствительного элемента в большинстве случаев используется константановая проволока (медно-никелевый сплав с добавлением марганца и кобальта) диаметром 20...30 мкм [46]. Их важное достоинство – стабильность показаний при длительных измерениях. Характеризуются относительно малой площадью контакта чувствительного элемента с поверхностью исследуемой детали, что ограничивает их применение, особенно при необходимости измерений достаточно больших деформаций.

Фольговые тензорезисторы используют в качестве чувствительного элемента проводник из полосок фольги толщиной 4...12 мкм, нанесенный на полиуретановую или пропитанную термостойкими составами бумажную подложку [46]. Благодаря большей площади контакта фольгового тензорезистора с объектом измерения он более чувствительный, чем проволочный.

Полупроводниковые тензорезисторы представляют собой тонкую полосу или цилиндр из полупроводникового материала с проводимостью  $p$  или  $n$  [46]. Они в 50...60 раз более чувствительны, чем проволочные, имеют малые размеры, не требуют использования усилителей. Недостатки полупроводниковых тензорезисторов: значительный разброс параметров, температурная и временная нестабильность параметров, хрупкость, которая ограничивает их применение.

В качестве рабочих датчиков из-за высокой чувствительности и стабильности параметров были выбраны фольговые тензорезисторы.

## 2.2. Структура тензометрической системы измерения

Тензометрическая система измерений конструктивно состоит из тензометрических датчиков, тензометрической станции, приемно-передающего модуля и вычислительного блока (рисунок 2.1).

Основная задача тензометрической системы – получение информации об относительной деформации лопасти посредством тензометрических датчиков, расположенных равномерно на ней. Каждый тензометрический датчик измеряет относительную деформацию в связанной с ним системе координат.

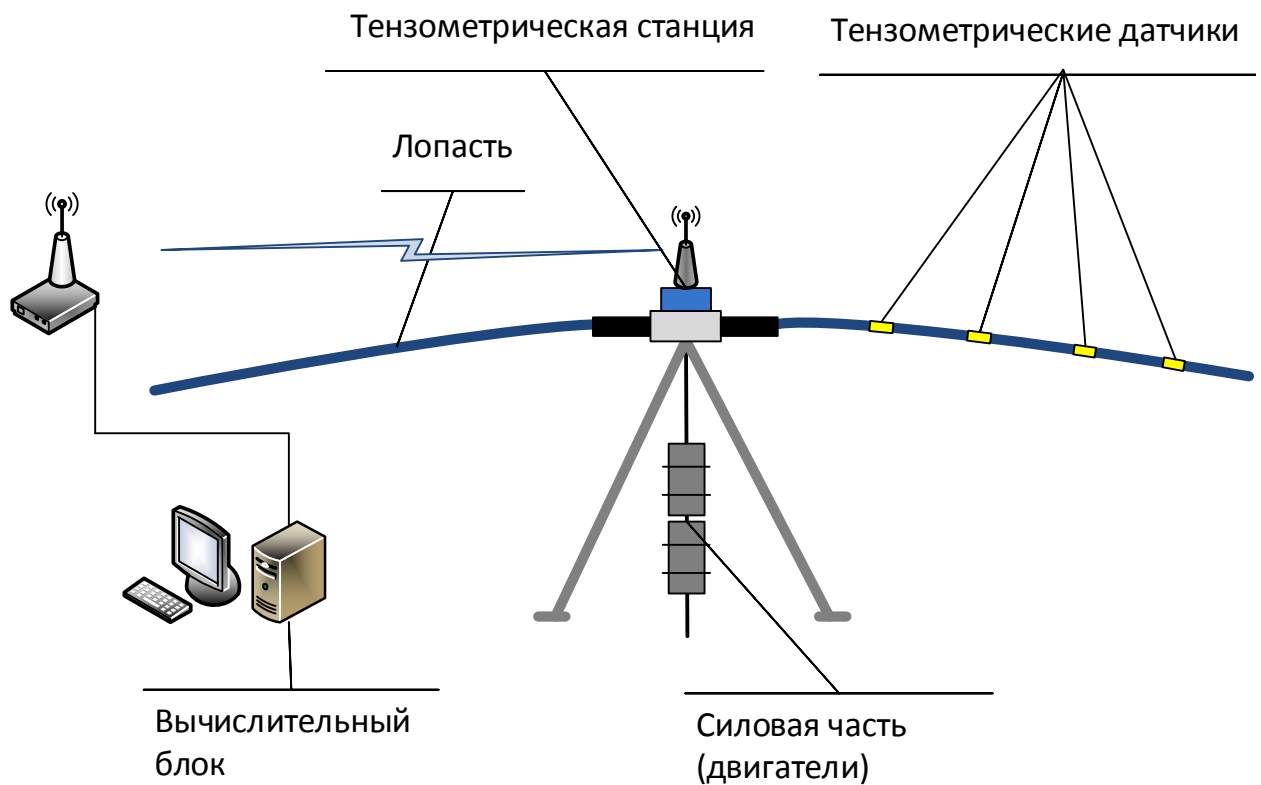


Рисунок 2.1. Схема тензометрического канала измерений

**Включение тензорезисторов.** Тензорезисторы включают по полумостовой или мостовой схемам (рисунок 2.2) для обеспечения высокой точности измерений, для уменьшения гистерезиса, температурной и временной стабильности показаний [46].

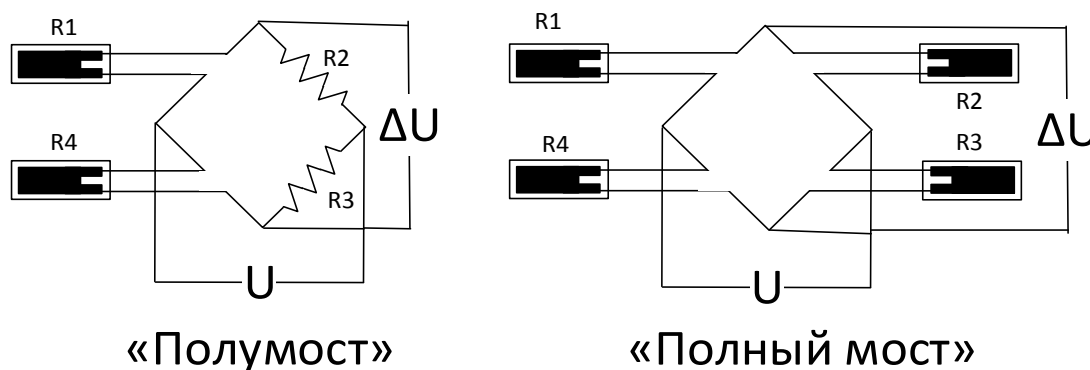


Рисунок 2.2. Модификации мостовой схемы

В случае значительного разброса сопротивления тензорезисторов или для обеспечения особо точных измерений применяют специальные тензорезисторы с дополнительными низкоомными компенсирующими сопротивлениями.

Тензорезисторы и сопротивления располагаются на одной подложке, что позволяет скомпенсировать разброс сопротивлений элементов измерительного моста и в результате получить высокую термостабильность датчика. На исследуемой лопасти располагаются четыре тензометрических датчика.

**Радиоканал.** Главный недостаток при передаче сигнала с датчиков, расположенных на подвижном вращающемся объекте на тензометрическую станцию при помощи скользящих контактов – существенное искажение аналогового сигнала (и, соответственно, результатов измерений) за счет возникновения значительных импульсных помех. Поэтому предлагается использовать способ передачи данных по цифровому радиоканалу от тензометрической станции к вычислительному блоку.

Выбор типа радиоканала происходит исходя из необходимости удовлетворения требований по пропускной способности и по дальности.

Требования по дальности (исходя из конструктивных особенностей электровинтового стенда АО «Камов») – не менее 20 метров.

Оценим требуемую пропускную способность радиоканала. Размер сообщения, содержащего в себе измерения четырех тензометрических датчиков, составляет  $V = 88$  бит (1 байт заголовок, 1 байт длина сообщения, по 2 байта на



каждое измерение, 1 байт контрольная сумма). Частота измерений и передачи сообщений по цифровому радиоканалу  $f = 200$  Гц. Требуемую пропускную способность можно оценить по следующей формуле

$$q_{\text{треб}} \geq Vf = 17,18 \text{ кбит / сек.} \quad (2.1)$$

**Математическая модель пересчета тензометрических измерений.** В работе рассматривается лопасть с упругим (бесшарнирным) соединением со втулкой несущего винта [47]. Подобное соединение можно рассматривать как жесткое консольное крепление балки. Примем, что при воздействии распределенной нагрузки изгиб лопасти происходит по окружности радиуса  $r$  (рисунок 2.3). Необходимо найти отклонение торца лопасти  $y$ .

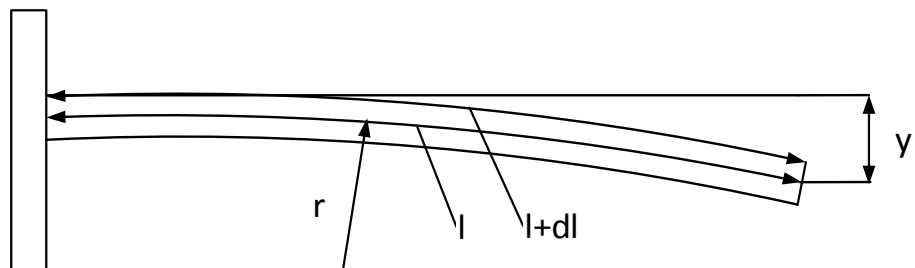


Рисунок 2.3. Отклонение торца лопасти

Отклонение торца лопасти  $x$  рассчитывается по следующей формуле

$$y = r(1 - \cos(l/r)). \quad (2.2)$$

где  $r$  – радиус изгиба лопасти,  $l$  – исходная длина исследуемого участка лопасти.

Длина деформированного участка лопасти вычисляется следующим образом

$$l + dl = (r + b) \cos(l/r), \quad (2.3)$$

где  $b$  – половина толщины лопасти.

Деформация лопасти рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = dl / l. \quad (2.4)$$

По результатам математического моделирования (при  $l/r < 0,1$ ) был получен график зависимости приращения длины к отклонению торца лопасти (рисунок 2.4).

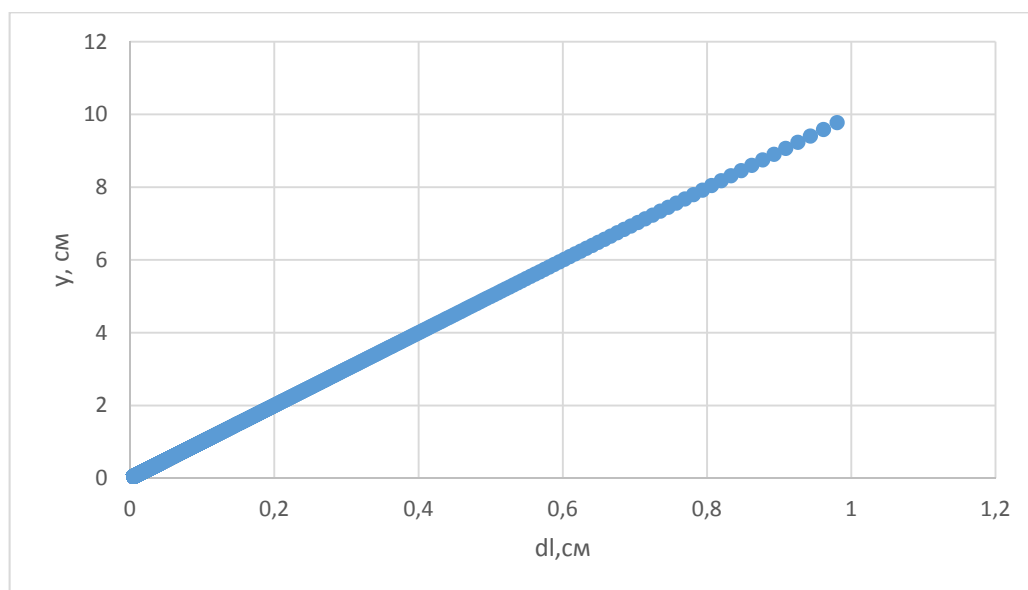


Рисунок 2.4. График отклонения торца лопасти в зависимости от  $dl$

Характер графика показывает, что при принятых соотношениях длины исследуемого участка лопасти к радиусам изгиба допустимо использование следующей зависимости

$$y = x\varepsilon, \quad (2.5)$$

где  $x$  – весовой коэффициент.

Следовательно, для всей лопасти и четырех ( $m=4$ ) тензометрических датчиков модель принимает вид

$$y = \sum_{i=1}^m x_{\varepsilon i} \varepsilon_i, \quad (2.6)$$

где  $x_{\varepsilon i}, i=1..m$  неизвестные весовые коэффициенты.

Примем, что выходной сигнал тензометрического датчика прямо пропорционален деформации лопасти

$$d = x_d \cdot \varepsilon. \quad (2.7)$$

Таким образом, учитывая (2.7), отклонение лопасти с  $m$  тензометрическими датчиками можно представить в виде

$$y = \sum_{i=1}^m x_i d_i, \quad (2.8)$$

$$x_i = x_{\varepsilon i} \cdot x_d$$

где неизвестные весовые коэффициенты  $x_i, i=1..m$  вычисляются по методике, приведенной в разделе 1.5.

### 2.3. Программно-алгоритмическое обеспечение системы тензоизмерений

На рисунке 2.5 приведена структурная схема данного канала измерений.

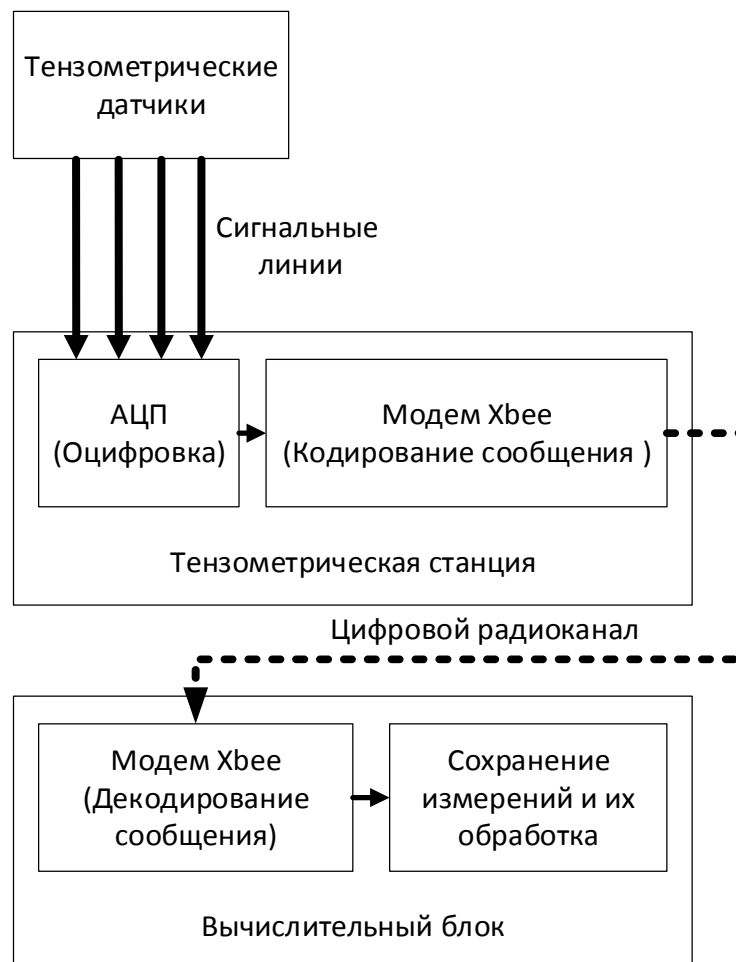


Рисунок 2.5. Структурная схема тензометрического канала измерений

Основной алгоритм для разработки в данном канале – это алгоритм кодирования сообщения для последующей его передачи по цифровому радиоканалу. Так как АЦП у тензометрической станции десятиразрядное [48], то измерения каждого тензодатчика помещаются в 2 байта. Предложена следующая структура сообщения (рисунок 2.6):



Рисунок 2.6. Структура сообщения

где

ST – признак начала пакета (1 байт – 0x7E),

LEN – число информационных байт в сообщении (1 байт),

DATA – информационные байты, содержащие в себе измерения (LEN байт),

CS – контрольная сумма (1 байт).

Для последующей передачи сообщения на программное обеспечение вычислительного блока разработано программное обеспечение для тензостанции, которое производит измерения с частотой 200 Гц и реализует вышеприведенный алгоритм кодирования. Для вычислительного блока разработано программное обеспечение, основные задачи которого – декодирование сообщений, получаемых с тензостанции, отображение на графике и последующая их запись в определенном формате на ПЗУ.

## 2.4. Исследование тензометрической системы измерений

На рисунке 2.7 приведен график показаний датчиков в момент переходного процесса от номинальных оборотов (с нулевым шагом) до почти полной остановки и провисанием лопасти вниз под собственным весом. На горизонтальной оси находится номер измерения (измерение проводится с шагом в 5 миллисекунд).

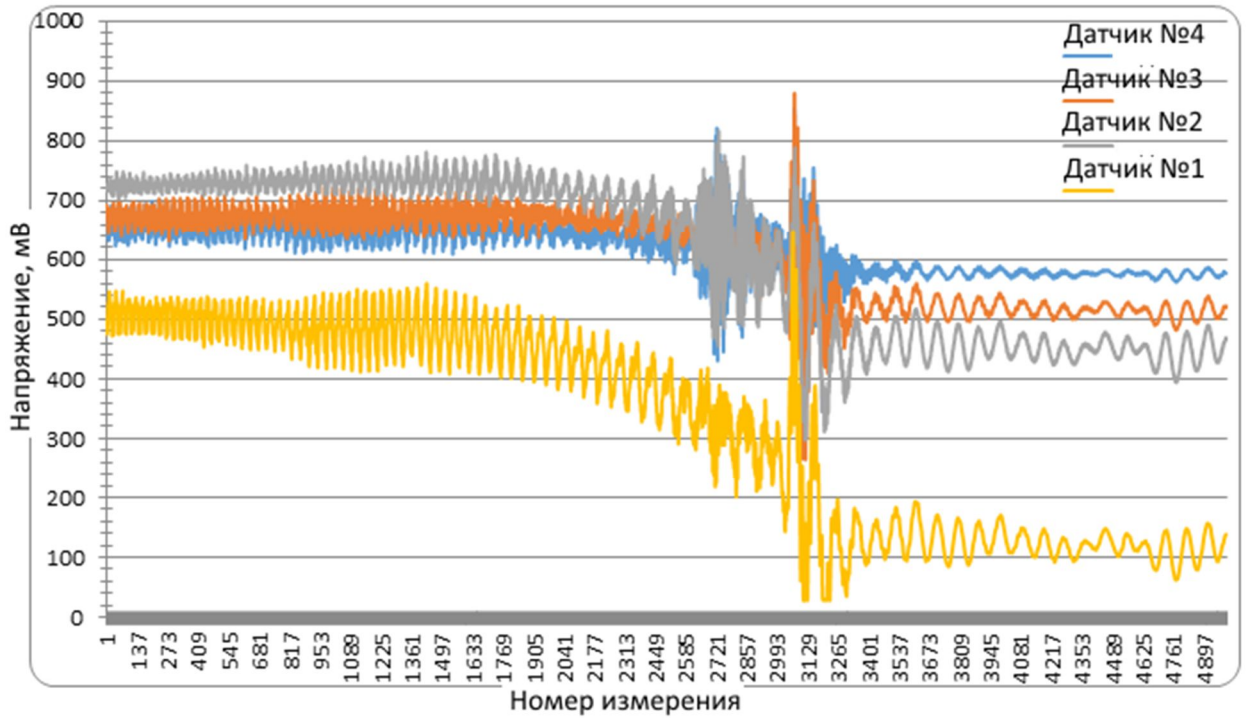


Рисунок 2.7. Тензоизмерения переходного процесса остановки винта

На рисунке 2.8 приведены результаты эксперимента с раскруткой винта, выходом на заданные обороты и последующей остановкой.

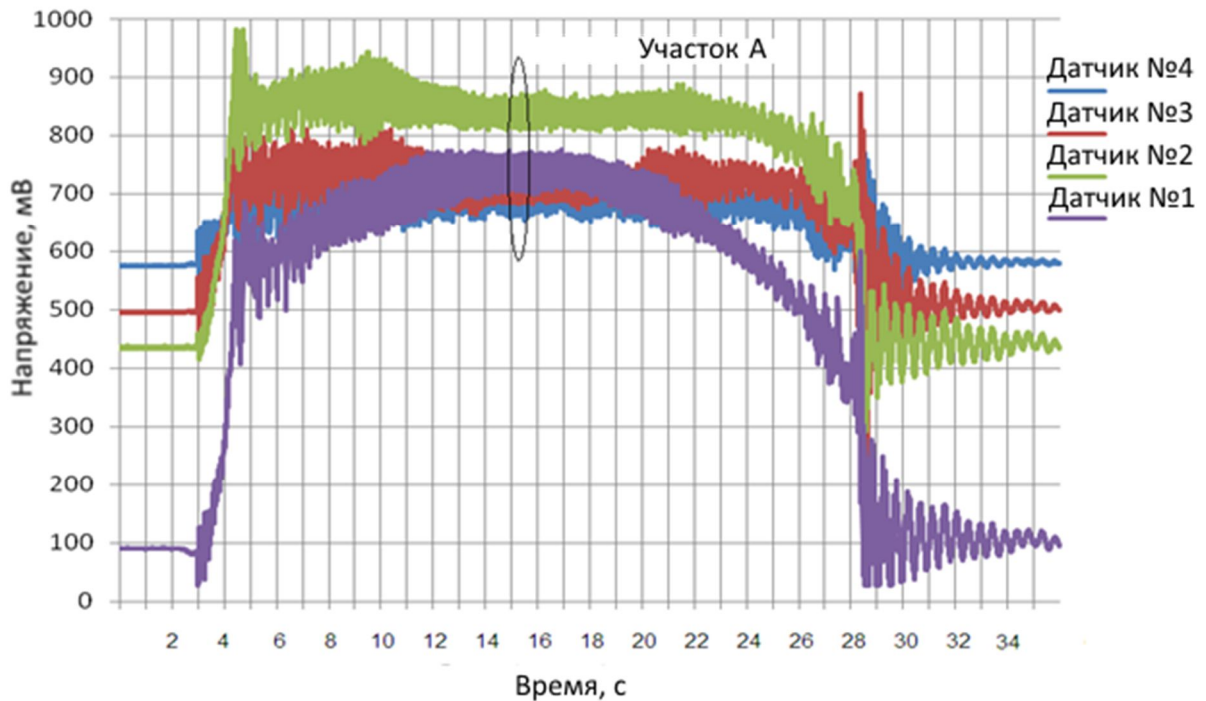


Рисунок 2.8. Тензоизмерения при раскрутке винта до 600 об/мин и остановки с нулевым шагом

В интервале с 0 по 3 секунду лопасть находится в неподвижном состоянии.

С 3 по 12 секунду происходит раскрутка винта и выход на заданные обороты.

В процессе раскрутки винта возникает резкий скачок деформаций, которые потом снижаются при выходе на установившийся режим.

С 12 по 18 секунду происходит вращение винта с заданными оборотами и постоянным шагом (установившийся режим).

С 18 секунды по 34 происходит остановка винта.

На рисунке 2.9 приведен участок А из графика на рисунке 2.8.

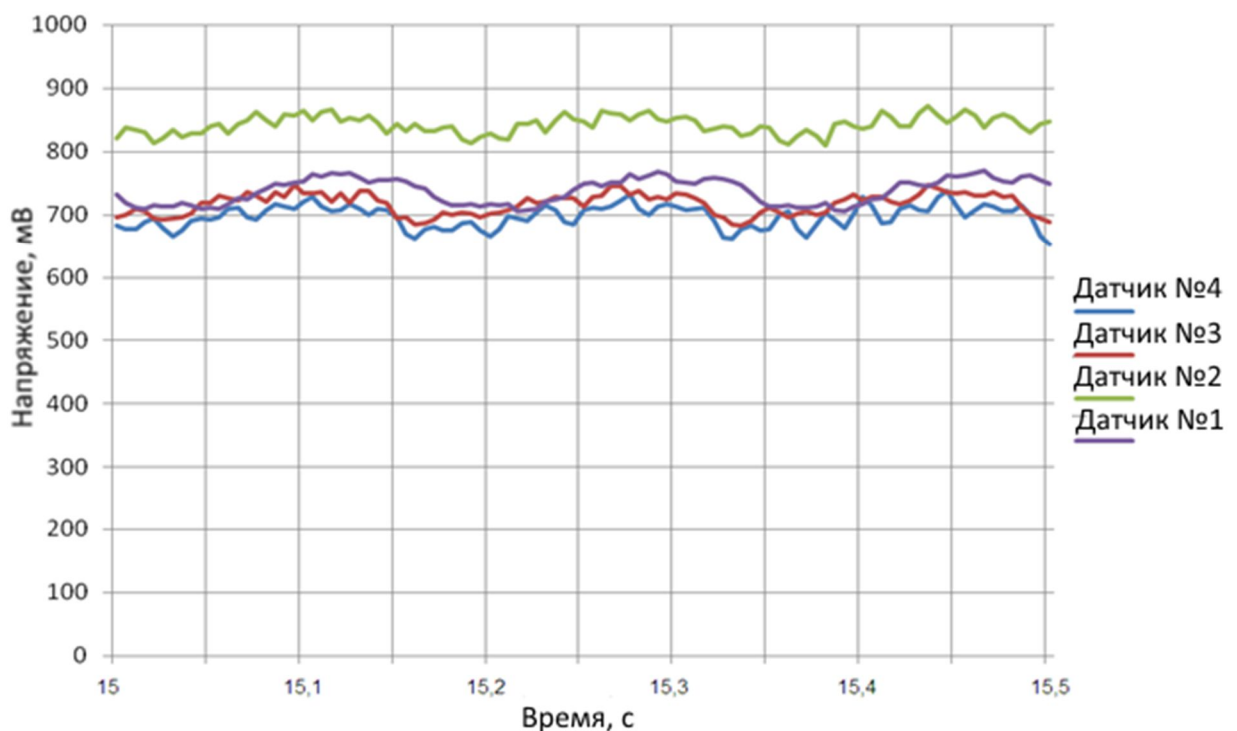


Рисунок 2.9. Тензоизмерения на участке А

На рассматриваемом участке А частота вращения винта 7 об/с. Четыре тензометрических датчика размещаются равномерно по длине исследуемой лопасти. Как видно из графиков (рисунок 2.9), амплитуды основных колебаний идентичны, что подтверждает сходство деформаций в районе каждого датчика. Идентичность деформаций на каждом датчике подтверждает принятую гипотезу о том, что форма деформированной лопасти близка к окружности. Отклонение по математическому ожиданию датчика № 3 не превышает 10% от общего рабочего диапазона и находится в пределах точности установки

коэффициентов усиления тензостанции. Запаздывание по фазе датчика № 4 объясняется последовательным характером опроса датчиков тензостанцией.

На рисунке 2.10 приведен эксперимент с изменением шага винта.

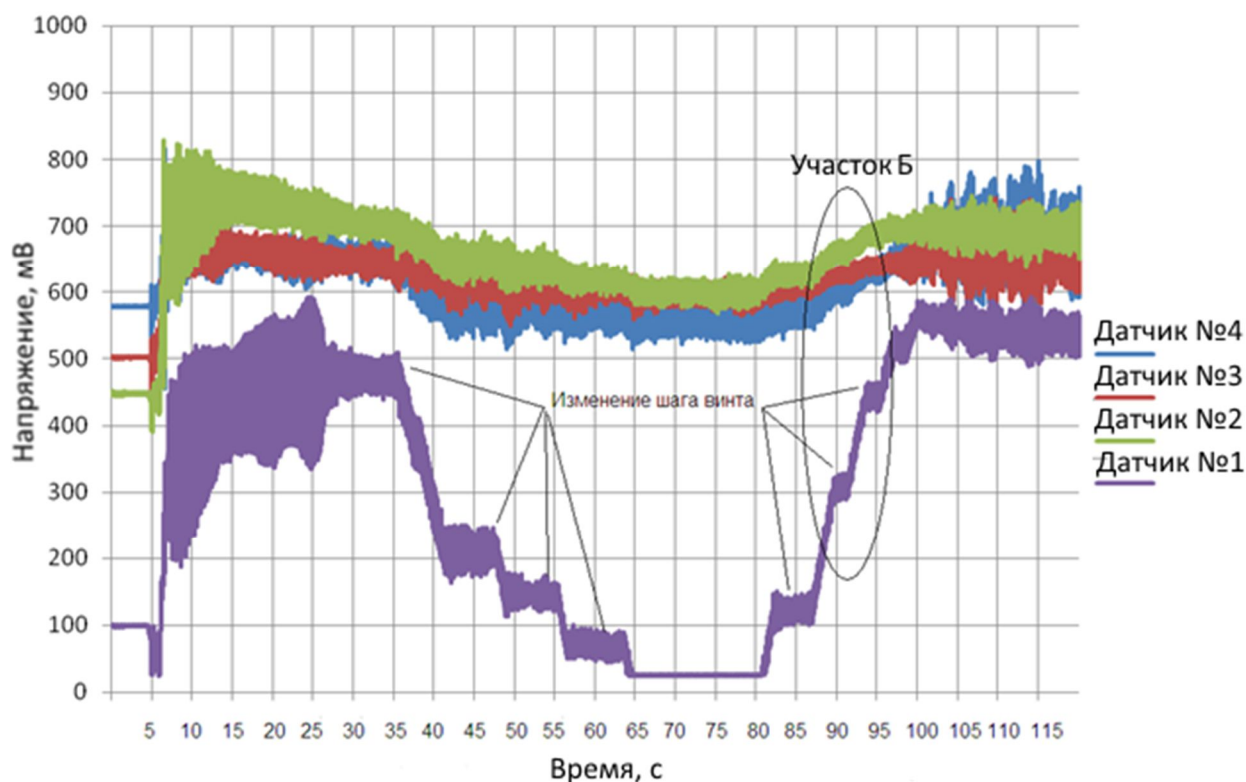


Рисунок 2.10. Тензоизмерения при раскрутке винта до 600 об/мин и с изменяющимся шагом

В интервале с 0 по 5 секунду винт находится в неподвижном состоянии.

С 5 по 25 секунду происходит раскрутка винта.

С 25 по 100 секунду происходит изменения шага винта.

На рисунке 2.11 представлен участок Б графика 2.10, на котором видно изменение шага винта.

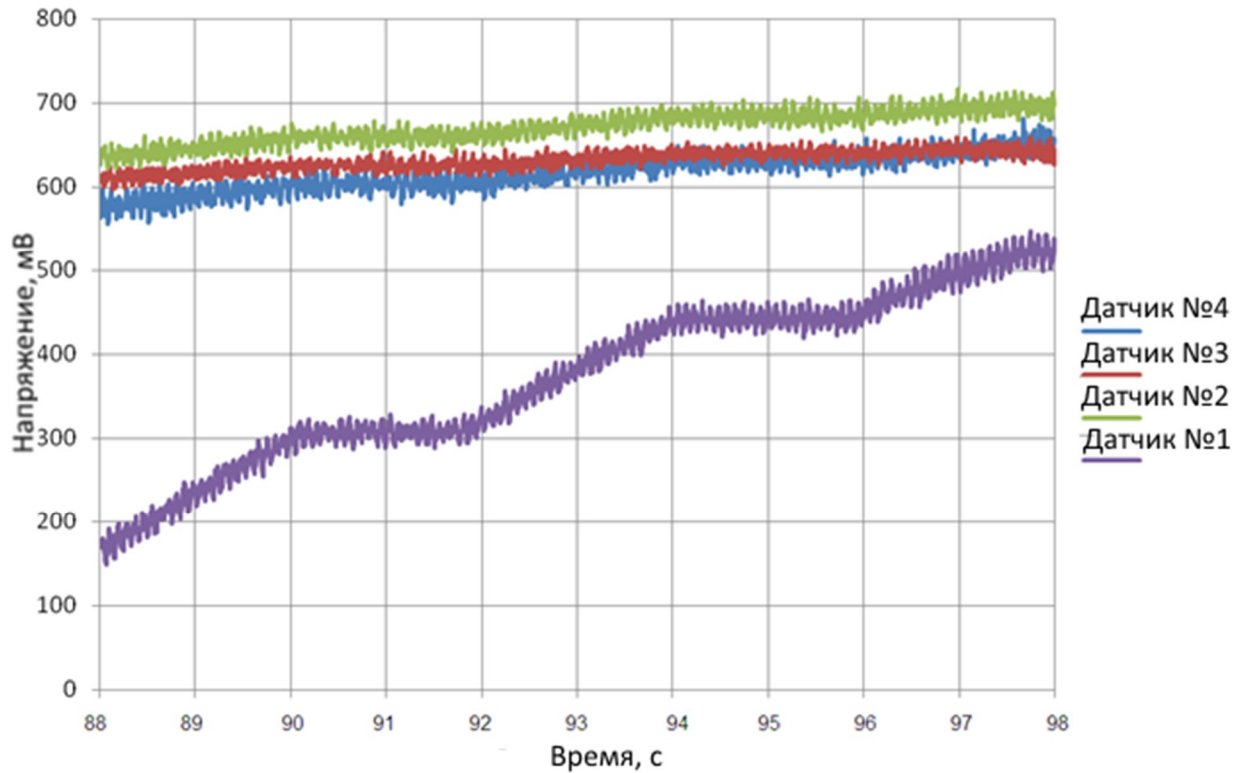


Рисунок 2.11. Тензоизмерения на участке Б (рис. 2.10)

На рисунке 2.12 представлены результаты эксперимента, подтверждающие повторяемость значений измерений.

Измерение проводилось на двух участках (участки 1 и 2) с одинаковым режимом работы несущего винта вертолета. На горизонтальной оси находится номер измерения (измерение проводится с шагом в 5 миллисекунд).



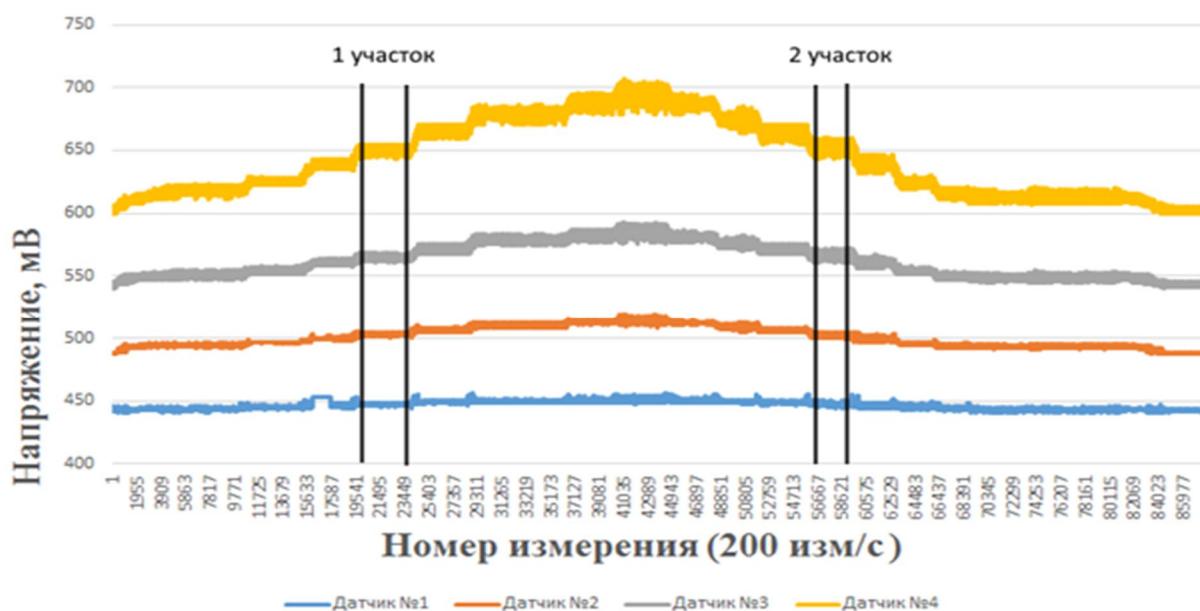


Рисунок 2.12. График измерений

В таблице 2.1 приведены расчеты МО и СКО измерений на этих участках.

Таблица 2.1. МО и СКО измерений на участках 1, 2

Номер участка	МО, мВ				СКО, мв			
	1 датчик	2 датчик	3 датчик	4 датчик	1 датчик	2 датчик	3 датчик	4 датчик
1	447	503	564	650	0.67	0.85	1.99	2.66
2	447	502	566	650	0.92	1.23	2.71	4.02

## 2.5. Выводы

1. Определена структура тензометрического канала измерений, обеспечивающая измерения положения торца лопасти несущего винта вертолета;
2. Реализован канал передачи данных по цифровому радиоканалу от тензометрической станции (располагающейся на втулке несущего винта) к вычислительному блоку с целью повышения помехозащищенности измерений по сравнению с используемыми ранее скользящими контактами;

3. Предложена математическая модель пересчета тензометрических измерений в отклонения торца лопасти во всем диапазоне измерений в систему координат видеокамеры, связанной с системой координат вертолета;
4. Разработан демонстрационный макет тензометрической системы измерений, включающий:
  - установленные на лопасти тензометрические датчики;
  - микроконтроллер с преобразователем аналог-код;
  - приемно-передающее устройство для передачи данных измерений по цифровому радиоканалу;
  - источник питания;
5. Проведены экспериментальные исследования тензометрического канала измерений, подтверждающие его работоспособность.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

#### 3.1. Варианты реализации оптических измерений

**Обоснование выбора высокоскоростной видеокамеры.** Одно из основных требований к оптической системе измерений заключается в обеспечении как минимум одного измерения положения лопасти несущего винта вертолета за полный оборот при максимальной частоте вращения  $\Omega_{\max} = 600$  оборотов в минуту ( $f_{\max} = 10$  Гц).

При горизонтальном угле наблюдения объектива видеокамеры в  $56^\circ$  ( $\alpha_{об} = 0.977$  рад.) следует, что лопасть за один оборот (при  $\Omega_{\max}$ ) находится в поле зрения видеокамеры время  $t_{лон}$ , равное

$$t_{лон} = \frac{\alpha_{об}}{f_{\max} 2\pi} = 0.0155 \text{ с.} \quad (3.1)$$

Для повышения надежности измерений введем коэффициент запаса и примем, что требуемая частота кадров съемки  $f_{кам}$  должна удовлетворять условию

$$f_{кам} \geq \frac{K_{зан}}{t_{кам}}, \quad (3.2)$$

где  $K_{зан}$  – коэффициент запаса.

Таким образом, при задании коэффициента запаса  $K_{зан} = 3$ , частота съемки должна быть не менее

$$f_{кам} \geq \frac{K_{зан}}{t_{кам}} = 192 \text{ 1/с.} \quad (3.3)$$

Такая частота обеспечивает, как минимум, получение одного кадра с изображением лопасти на каждом обороте несущего винта вертолета.

Условие (3.3) является ограничением на выбор видеокамеры.

**Аппаратная составляющая оптического канала обеспечения.**

Разработанная и реализованная подсистема видеоизмерений состоит из цифровой высокоскоростной видеокамеры (частота съемки до 200 1/с, что соответствует условию (3.3)) Prosilica GE-680 фирмы Allied Vision Technologies с объективом Computar M0814MP, блоком питания и сетевым кабелем UTP CAT 5e, вычислительного блока, устройств ввода-вывода информации.

Схема расположения оборудования приведена на рисунке 3.1.

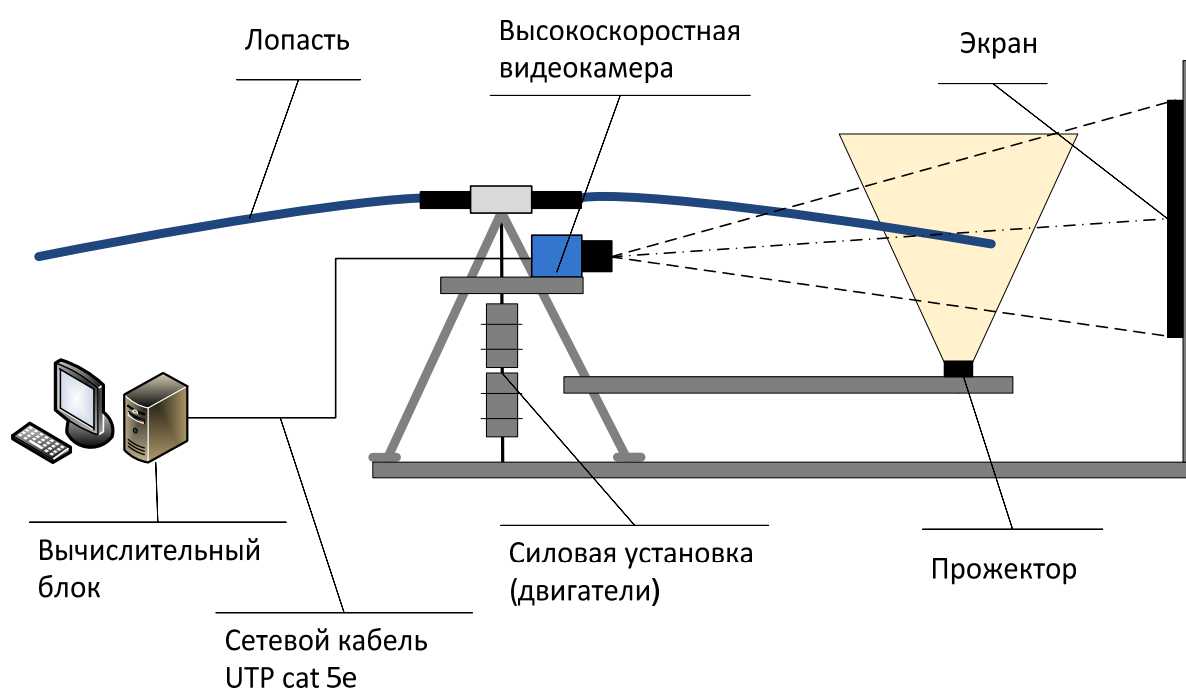


Рисунок 3.1. Схема оптического канала измерений

Размещение видеокамеры в горизонтальной плоскости показано на рисунке 3.2.

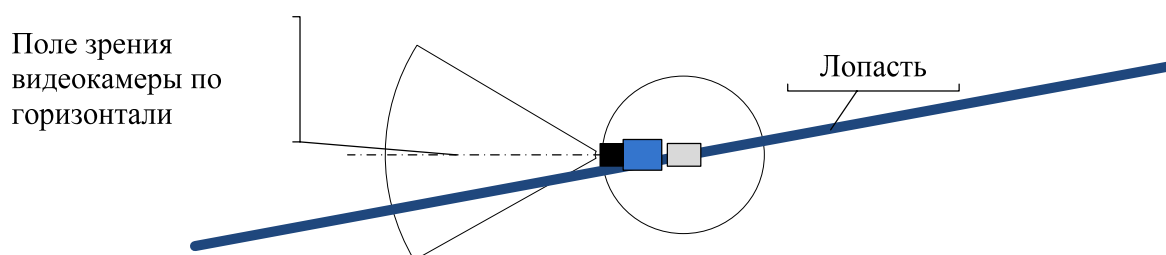


Рисунок 3.2. Схема размещения видеокамеры (вид сверху)

Оптические измерения положения лопасти в выделенном секторе наблюдений при таком расположении видеокамеры производятся 1 раз за один оборот винта. При этом измерения на всей траектории положения лопасти реализуются тензометрическим каналом (20 измерений на каждом обороте винта), а видеоканал обеспечивает корректировку измерений при переводе измеренных значений в систему координат вертолета. Для увеличения количества оптических измерений на каждом обороте винта можно увеличить либо частоту съемки, либо количество видеокамер. Первый вариант обеспечивает получение дополнительных изображений лопасти в том же ограниченном секторе наблюдений видеокамеры и с точки зрения повышения общей точности измерений недостаточно эффективен. Второй вариант представляется более перспективным, однако его реализация гораздо более экономически затратна.

**Аппаратная реализация оптической системы измерений с четырьмя видеокамерами.** При использовании четырех видеокамер угол обзора расширяется, позволяя проводить оптические измерения при той же частоте съемки каждой видеокамерой от 4 до 8 положений за один оборот винта (рисунок 3.3).

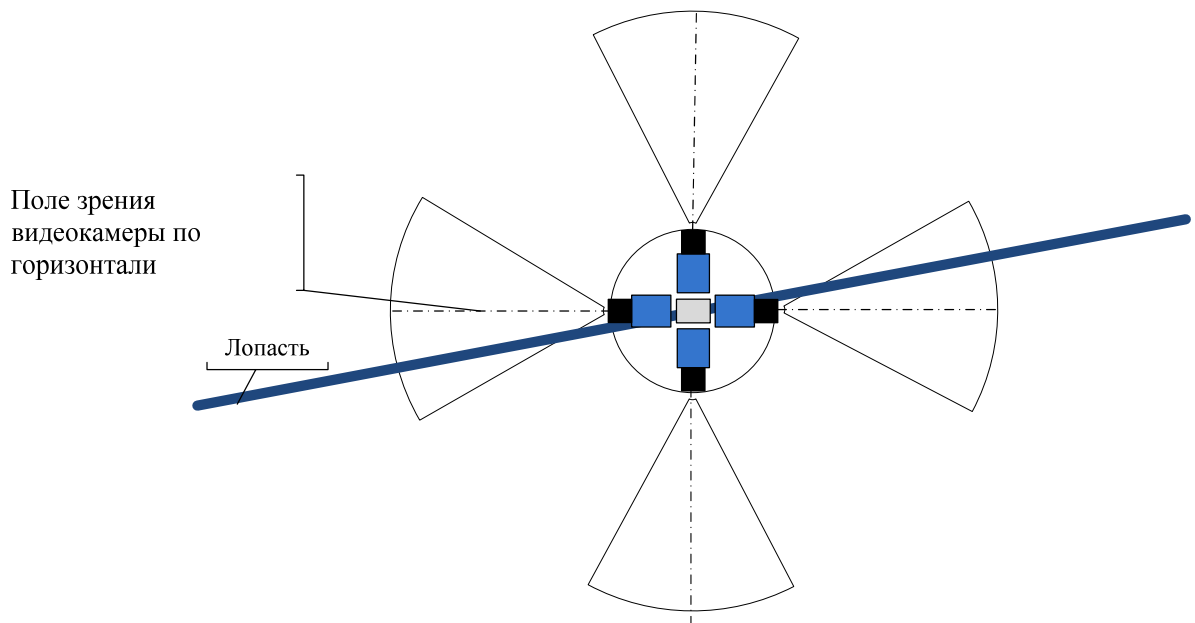


Рисунок 3.3. Схема размещения 4-х видеокамер (вид сверху)

Для подключения четырех видеокамер к вычислительному блоку необходимо использовать коммутатор. Общая схема подключения приведена на рисунке 3.4.

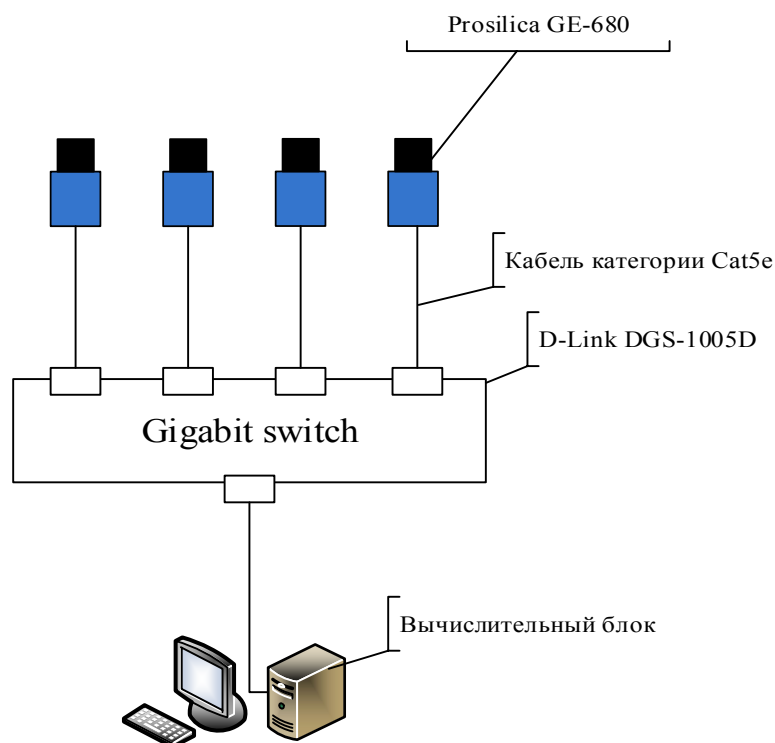


Рисунок 3.4. Схема подключения видеокамер к вычислительному блоку

Для оценки работоспособности предложенного варианта был выбран коммутатор D-Link DGS-1005D со следующими характеристиками:

- 1) 5 портов 10/100/1000Base-T для подключения кабелей UTP 5 категории;
- 2) поддержка Gigabit Ethernet;
- 3) поддержка сетевого кабеля UTP 5, 5e.

Проблема реализации программного обеспечения для четырех видеокамер состоит в том, что каждая видеокамера передает порядка 61 Мбайт/с информации при общей пропускной способности канала приблизительно в 100 Мбайт/с [49]. Таким образом, получать и записывать в ПЗУ одновременно видеокдры с четырех видеокамер без потерь информации физически невозможно. Для решения этой проблемы предлагается использовать информацию об угловом положении лопасти.

Данные об угловом положении лопасти должны передаваться тензометрической станцией и далее (в каждом кадре) по цифровому радиоканалу в программу выбора текущего кадра. Зная порядок расположения видеокамер и их поля зрения, можно принимать поток видеоизмерений только с той видеокамеры,

в поле зрения которой находится лопасть. Остальные видеокамеры в этот момент не передают измерения. Так как поля зрения видеокамер не пересекаются (при установке по схеме, приведенной на рисунке 3.3), они будут работать поочередно, тем самым полностью укладываясь в ограничение по пропускной способности.

При работе с несколькими видеокамерами возникает проблема их синхронизации момента старта работы. При программном запуске, команды на начало работы (съемки) поступают от вычислительного блока не в один момент времени, а (по результатам экспериментов) с разницей по времени порядка 500-1000 миллисекунд. Эта разница – случайная величина, которая зависит от множества факторов, учесть которые сложно. Предлагается синхронизацию реализовать за счет настройки триггеров видеокамеры на начало работы, срабатывающих по сигналу поступающего на видеокамеру.

Таким образом, ПО для четырехкамерной системы измерений базируется на представленном ранее и испытанном на экспериментальном стенде ПО. Для обеспечения работы четырехкамерной системы измерений целесообразно реализовать алгоритм переключения между видеокамерами с использованием углового положения лопасти.

**Использование двух видеокамер в оптическом канале измерения.** Были проведены работы по оценке использования двух высокоскоростных видеокамер, разработано соответствующее программное обеспечение.

Проблема синхронизации момента старта работы решается аналогично, как и для четырех видеокамер. Проблема получения видеок кадров с двух высокоскоростных видеокамер вычислительным блоком и записи их на ПЗУ решается путем уменьшения разрешения видеокамеры и выбором видеокодека, который уменьшает объем видеок кадра.

**Подбор кодека для сжатия видеопоследовательности.** Выбор кодека важен для обеспечения требуемого быстродействия комплекса съемки. От него зависит качество изображения, нагрузка на ПЗУ вычислительного блока.

Изначально был применен кодек, использующий сжатие без потерь *Huffyuv* (идентификатор *HFYU*). Но при одновременной записи с двух видеокамер выявились



следующие недостатки: большой размер видеозаписи и близкое к 100% использование ПЗУ. Для выбора более эффективного решения были проведены исследования с несколькими видеокодеками:

1. *Huffyuv* (идентификатор *HFYU*) – кодек, предназначенный для сжатия видео без потерь. Основан на алгоритме Хаффмана [50].
2. *FFDShow Video* (идентификатор *FFVH*) – кодек для сжатия без потерь, модификация *Huffyuv*.
3. *DivX* (идентификатор *DX50*) – кодек стандарта *MPEG-4* [51]. Помимо кадрового сжатия в этом кодеке используется межкадровое сжатие.
4. *Motion JPEG* (идентификатор *MJPG*) – покадровый метод видеосжатия, в котором каждый кадр видеопотока сжимается с помощью алгоритма *JPEG* [52]. При сжатии методом *MJPG* межкадровая разница не учитывается.

Для записи использовались 1000 кадров с шумовым наполнением (каждый пиксель заполнялся случайным значением от 0 до 255). Разрешение кадра аналогично разрешению видеокамеры (640×480 пикселей). Результаты сравнения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Сравнение видеокодеков

Идентификатор видеокодека	Скорость сжатия одного кадра, мс	Размер выходного файла (1000 кадров), Мб
<i>HFYU</i>	2	450
<i>FFVH</i>	2	393
<i>DX50</i>	5	88
<i>MJPG</i>	6	210

Как показывает анализ результатов, *FFVH* дает небольшое уменьшение размера выходного файла. Хороший результат дал кодек стандарта *MPEG-4 DX50*. Помимо сжатия самого кадра в нем используется межкадровое сжатие, что при статичном фоне на порядок уменьшает размер выходного файла.

В дальнейшем при работе двух и более видеокамер рекомендуется использовать кодек *DX50*, а при работе одной видеокамеры – кодек *FFVH*.

### 3.2. Комплекс алгоритмов обработки и анализа видеoinформации

Основные задачи комплекса алгоритмов – это:

- 1) обнаружение лопасти на видеокадре, получаемом с высокоскоростной видеокамеры;
- 2) вычисление положения торца лопасти в системе координат вертолета;
- 3) идентификация лопасти.

Базовая для исследования задача – обнаружение лопасти на видеокадре, получаемом с высокоскоростной видеокамеры.

Таким образом необходимо принять решение о принадлежности распознаваемого объекта к лопасти или фону [53, 54].

Первая задача, которую необходимо решить при формировании алгоритма обнаружения – выбор признака, характеризующего объект интереса (лопасть) [55]. Традиционно в качестве рабочих признаков выбираются, например, распределение яркости, цвет, форма, текстура поверхности и пр. [56]. В рассматриваемом случае наиболее эффективно (с точки зрения скорости обработки и с учетом монохромности изображения) использование признака распределения яркости [57]. При этом предполагается, что распределения яркости объекта (лопасти) и фона различаются, что позволяет выделить изображение объекта с требуемой надежностью. Но экспериментальные данные, полученные электровинтовом стенде АО «Камов», показывают, что в ряде случаев выделение краев объекта – нетривиальная задача. Так, в поле зрения видеокамеры попадают отдельные области с неоднородной текстурой фона, совпадающей по яркости с элементами краев лопасти (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5. Видеокадр с изображением лопасти

Для оценки возможности выделения лопасти по выбранному признаку были построены и проанализированы гистограммы объекта и фона. (рисунок 3.6).

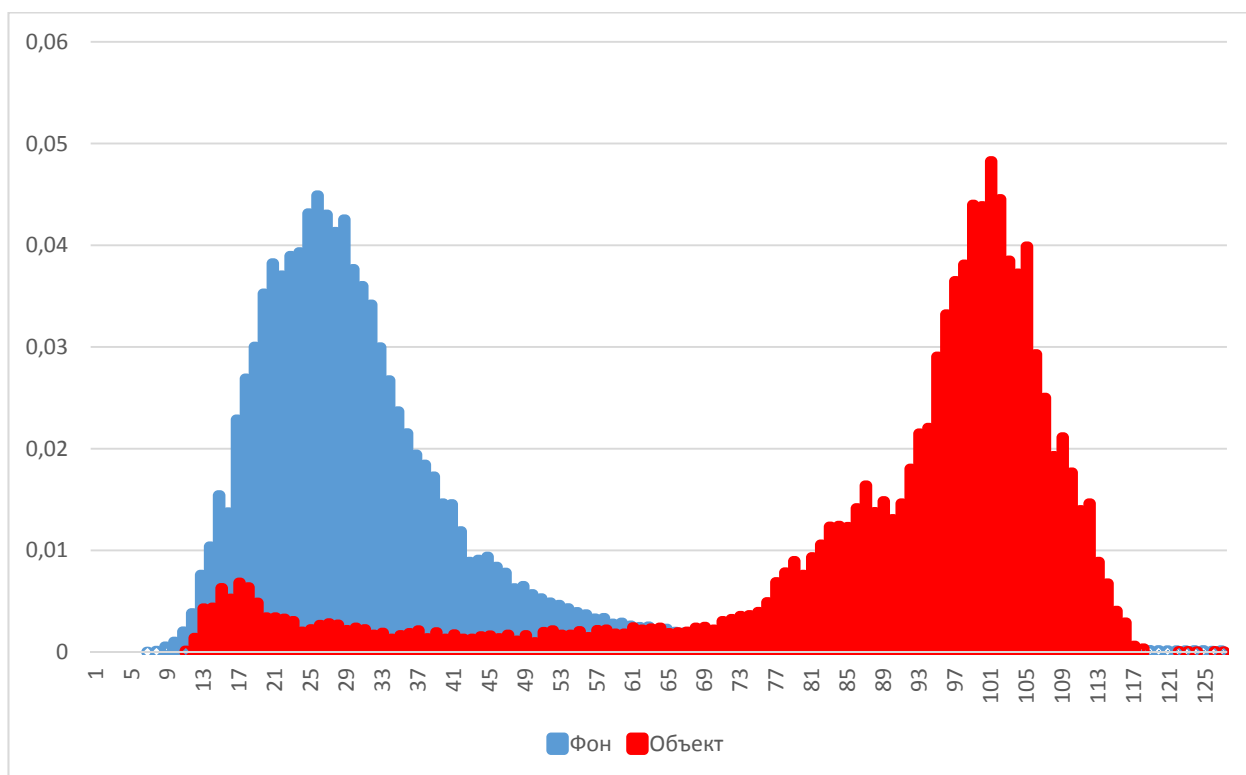


Рисунок 3.6. Нормированная гистограмма яркости объекта и фона

Из рисунка видно, что гистограммы объекта и фона пересекаются, что не позволяет реализовать безошибочное разделение объекта и фона. Наиболее эффективным в подобных случаях будет использование статистических методов обнаружения [53]. Рассмотрим несколько статистических критериев [57].

*Критерий минимального риска Байеса.*

Применение этого критерия дает минимальные потери от ошибок обнаружения. Однако требуется знание следующей априорной информации [57, 58]:

- распределения условных плотностей вероятностей  $P(Y|x_1)$  и  $P(Y|x_2)$ ;
- условных потерь  $R_{12}$  и  $R_{21}$  ( $R_{11} = R_{22} = 0$ );
- априорных вероятностей состояний  $P(x_1)$  и  $P(x_2)$ ,

где индекс 1 обозначает лопасть, индекс 2 – фон.

По полученному в точке с координатами  $(i, j)$  значению яркости  $Y=Y(i, j)$  вычисляются значения плотностей вероятности  $P(Y|x_2)$  и  $P(Y|x_1)$ . Далее находится коэффициент правдоподобия

$$\lambda = \frac{P(Y|x_2)}{P(Y|x_1)}, \quad (3.4)$$

который сравнивается с пороговой величиной

$$\lambda_0 = \frac{R_{21} \cdot P(x_1)}{R_{12} \cdot P(x_2)}. \quad (3.5)$$

При  $\lambda > \lambda_0$  пиксель с координатами  $(i, j)$  относится к изображению лопасти, в противном случае – к фону.

#### *Критерий идеального наблюдателя Зигерта-Котельникова*

В этом критерии потери принимаются равными [57, 58]

$$R_{12} = R_{21}.$$

Пороговое значение выглядит следующим образом:

$$\lambda_0 = \frac{P(x_1)}{P(x_2)}.$$

#### *Критерий максимального правдоподобия Фишера*

При условии, что априорные вероятности  $P(x_1)$  и  $P(x_2)$  неизвестны,  $R_{12} = R_{21}$ , можно применить критерий Фишера. Для этого принимаются следующие условия [57]

$$P(x_1) = P(x_2)$$

$$\lambda_0 = 1.$$

Для оценки эффективности применения различных критериев были проведены исследования с использованием вышеописанных критериев.

Начальные условия, приведены в таблице 3.2 (индекс «1» обозначает лопасть, индекс «2» – фон).

Таблица 3.2. Начальные условия

Используемый критерий	Номер эксперимента	Начальные условия
Критерий минимального риска Байеса	1	$P(x_1) = 0,3$ $P(x_2) = 0,7$ $R_{12} = 0,3$ $R_{21} = 0,7$
Критерий идеального наблюдателя Зигерта-Котельникова	2	$P(x_1) = 0,3$ $P(x_2) = 0,7$ $R_{12} = R_{21}$
Критерий Фишера	3	$P(x_1) = P(x_2)$ $R_{12} = R_{21}$

*Эксперимент № 1.*

Для изображения, представленного на рисунке 3.5, пороговое значение яркости (по критерию минимального риска Байеса) показано на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7. Пороговое значение яркости по критерию Байеса

На рисунке 3.8 представлен результат бинаризации изображения по полученному порогу. Предполагается, что белые пиксели относятся к лопасти, черные – к фону.

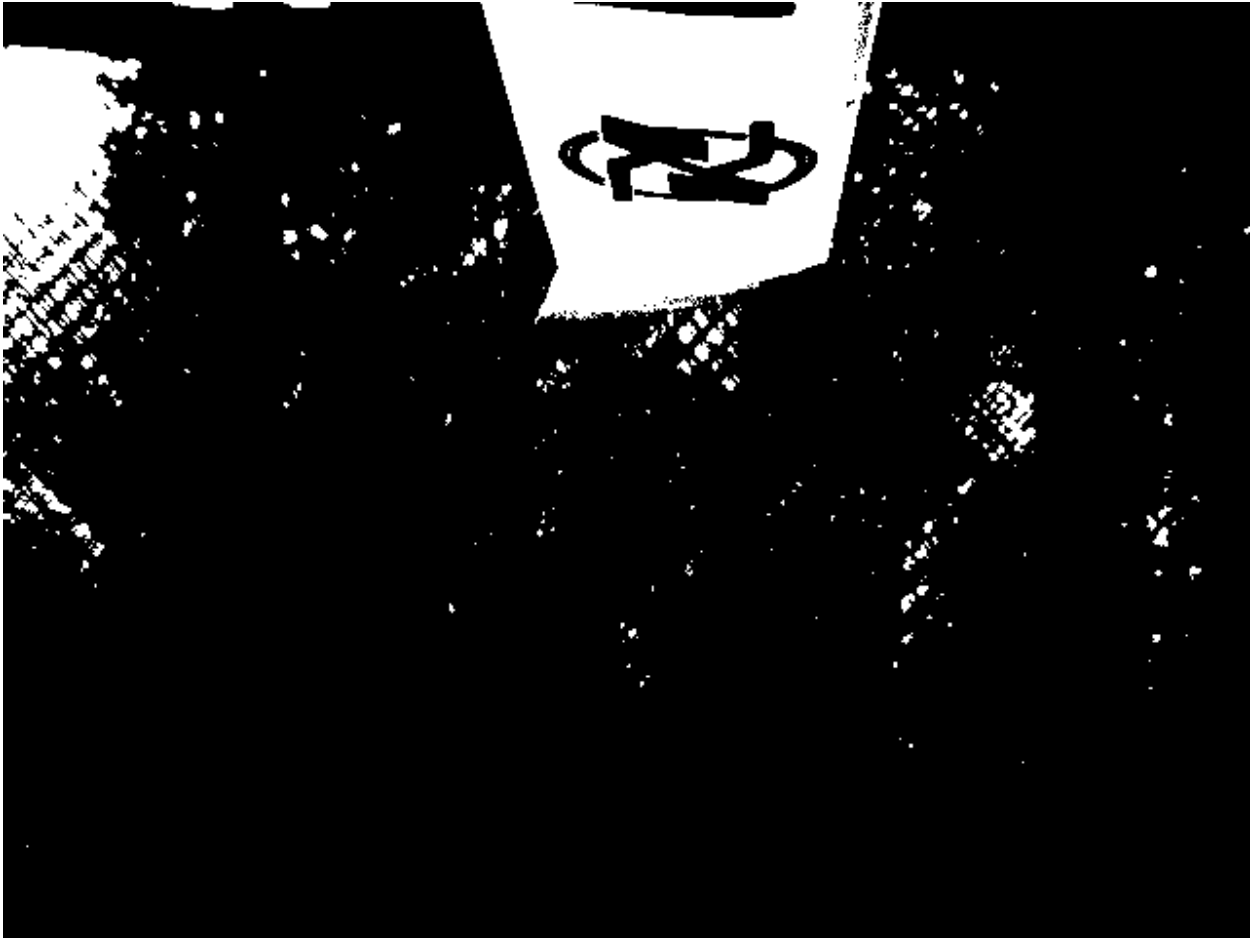


Рисунок 3.8. Бинаризация исходного изображения по критерию Байеса

Как видно из рисунка, часть выделенных белых фрагментов не принадлежит лопасти, что показывает наличие ошибок обнаружения.

На рисунке 3.9 показаны ошибки типа «пропуск цели» и «ложная тревога», выделенные фиолетовым и зеленым цветом, соответственно.

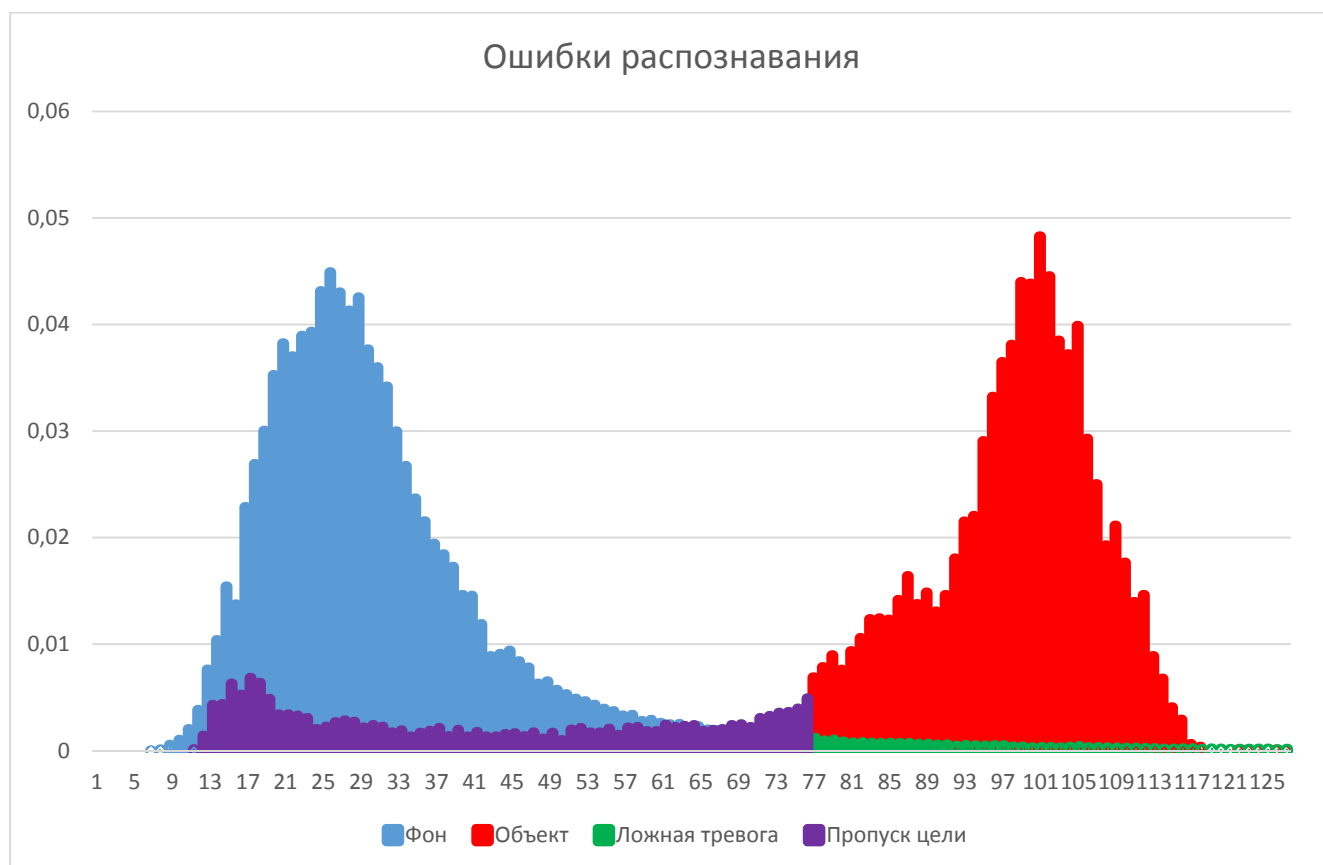


Рисунок 3.9. Ошибки обнаружения лопасти по критерию Байеса

В таблице 3.3 приведены численные значения вероятностей ошибок обнаружения.

Таблица 3.3. Численные значения вероятностей ошибок обнаружения по критерию Байеса

Вероятность ошибки типа «пропуск цели»	0,164
Вероятность ошибки типа «ложная тревога»	0,028
Вероятность правильного распознавания фона	0,971
Вероятность правильного распознавания объекта	0,835

### Эксперимент № 2

Согласно критерию идеального наблюдателя Зигерта-Котельникова, полученный порог для исходного изображения показан на рисунке 3.10.



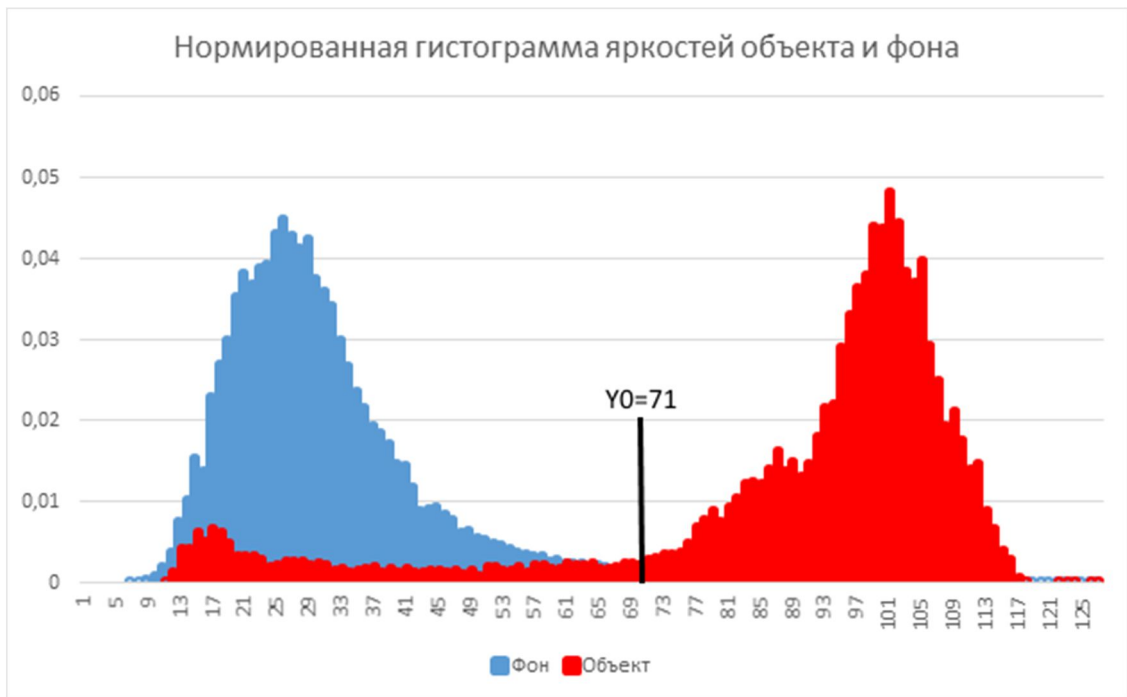


Рисунок 3.10. Пороговое значение яркости по критерию Зигерта–Котельникова

На рисунке 3.11 представлен результат бинаризации, где предполагается, что белые пиксели относятся к лопасти, а черные – к фону.

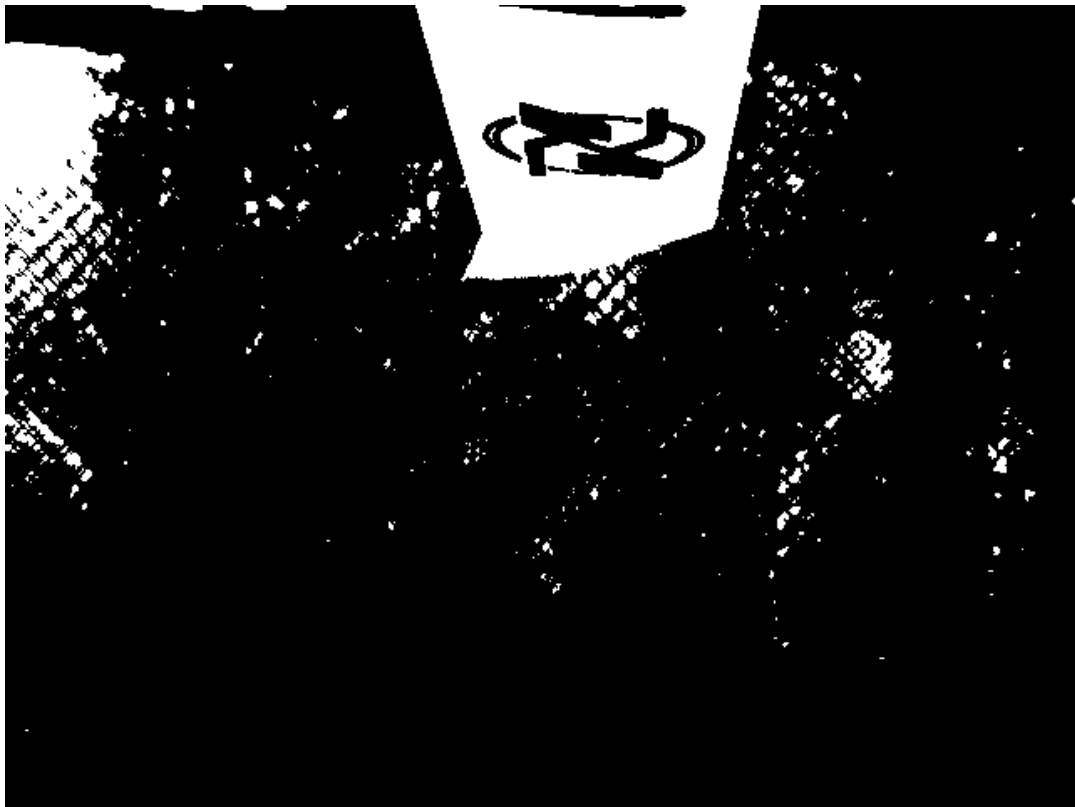


Рисунок 3.11. Бинаризация исходного изображения по критерию Зигерта–Котельникова

На рисунке 3.12 показаны ошибки «пропуск цели» и «ложная тревога».

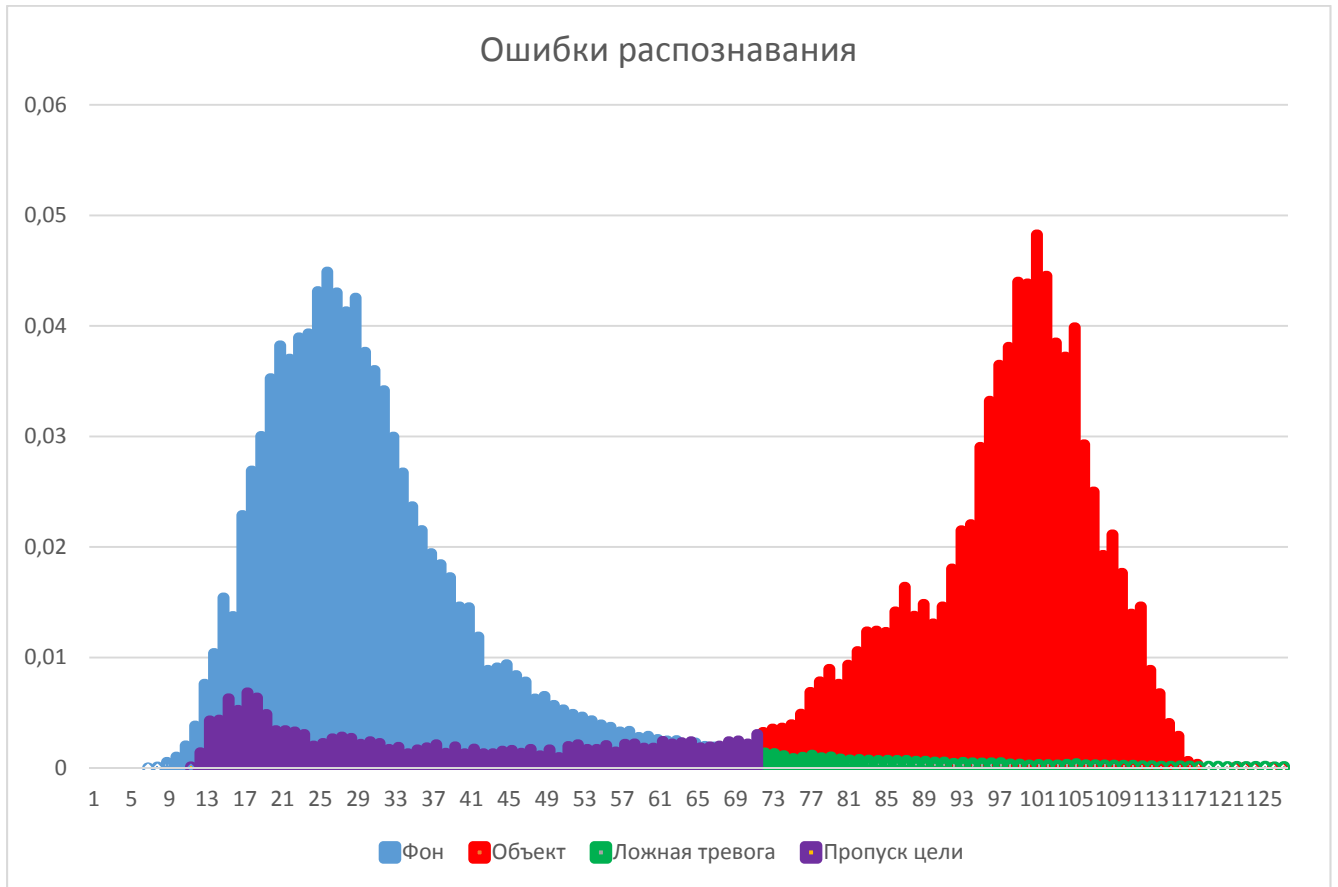


Рисунок 3.12. Ошибки обнаружения лопасти по критерию Зигерта–Котельникова

В таблице 3.4 приведены численные значения соответствующих вероятностей ошибок.

Таблица 3.4. Численные значения вероятностей ошибок по критерию идеального наблюдателя Зигерта–Котельникова

Вероятность ошибки типа «пропуск цели»	0,145
Вероятность ошибки типа «ложная тревога»	0,033
Вероятность правильного распознавания фона	0,966
Вероятность правильного распознавания объекта	0,854

### Эксперимент № 3

Согласно критерию Фишера был определен порог для исходного изображения (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13. Пороговое значение яркости по критерию Фишера

На рисунке 3.14 представлен результат бинаризации с помощью критерия Фишера, где белые пиксели относятся к лопасти, черные – к фону.

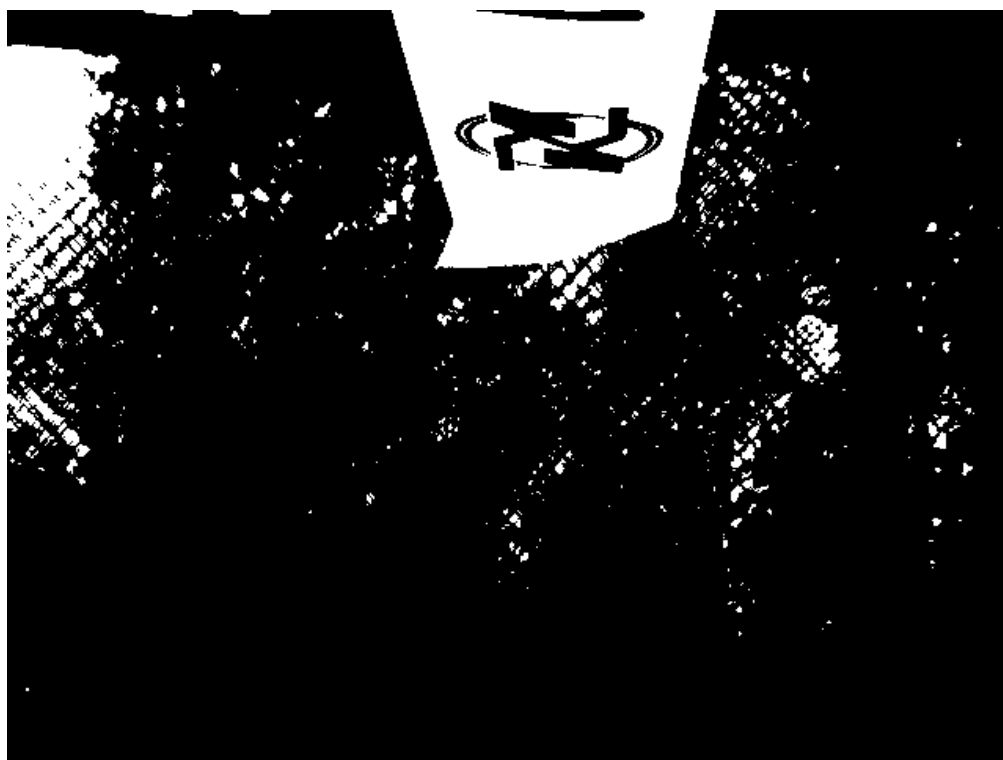


Рисунок 3.14. Бинаризация исходного изображения по критерию Фишера

На рисунке 3.15 показано наличие ошибок «пропуск цели» и «ложная тревога».

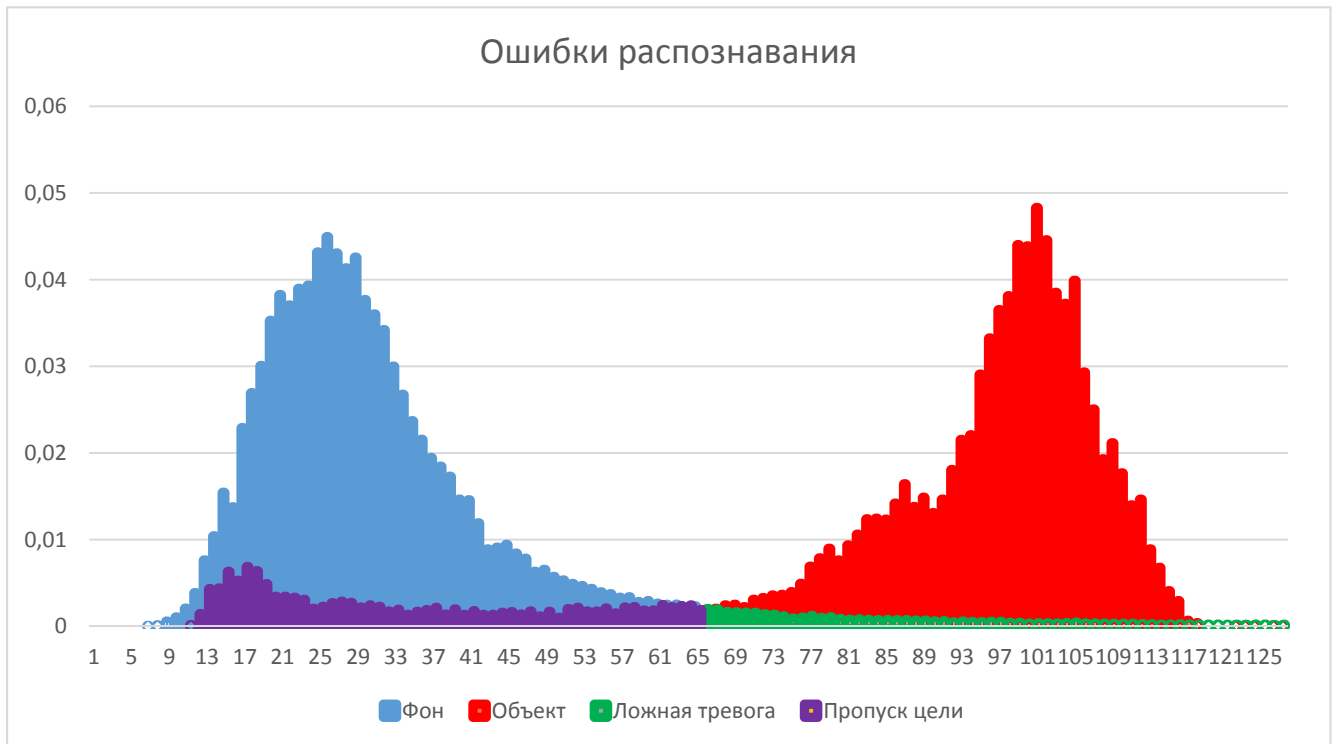


Рисунок 3.15. Ошибки обнаружения лопасти по критерию Фишера

В таблице 3.5 приведены численные значения вероятностей ошибок.

Таблица 3.5. Численные значения вероятностей ошибок по критерию Фишера

Вероятность ошибки типа «пропуск цели»	0,131
Вероятность ошибки типа «ложная тревога»	0,043
Вероятность правильного распознавания фона	0,956
Вероятность правильного распознавания объекта	0,868

Полученные значения ошибок превосходят заданные требования. Следовательно, требуется или поменять рабочий признак (яркость) на другой, более информативный, или расширить признаковое пространство. Второй вариант представляется более продуктивным.

В качестве нового дополнительного признака предложено взять площадь связанных областей, полученную после бинаризации изображения. Для предварительной оценки этого признака было выбрано несколько порогов

бинаризации исходного изображения (по яркости) и для каждого построены нормированные гистограммы распределения связанных площадей фона и объекта.

1. Порог 70 (из 255 уровней яркости).

Бинаризованное изображение показано на рисунке 3.16.

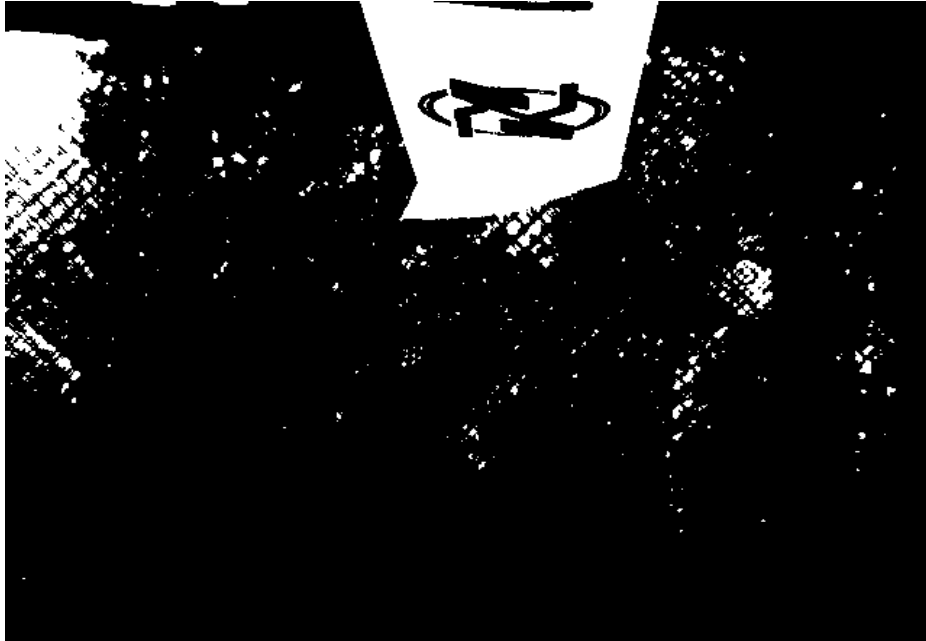


Рисунок 3.16. Бинаризация исходного изображения

Гистограмма связанных областей представлена на рисунке 3.17.

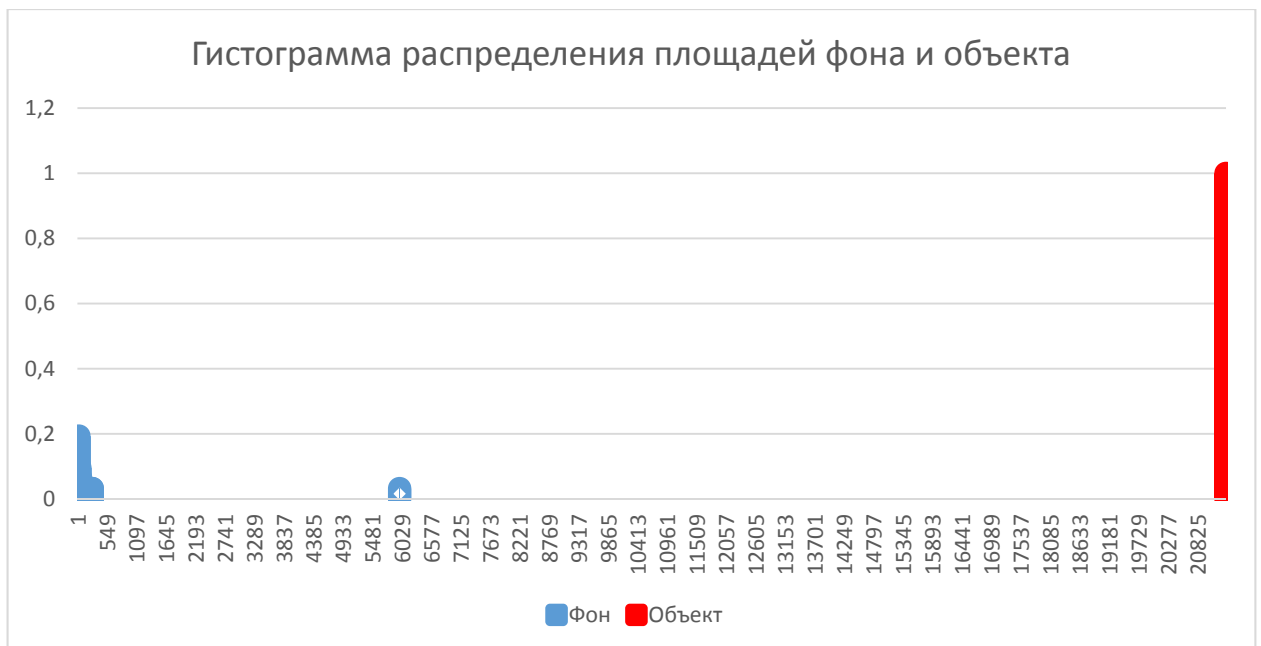


Рисунок 3.17. Гистограмма связанных областей

2. Порог 80 (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18. Бинаризация исходного изображения

Гистограмма связанных областей представлена на рисунке 3.19.

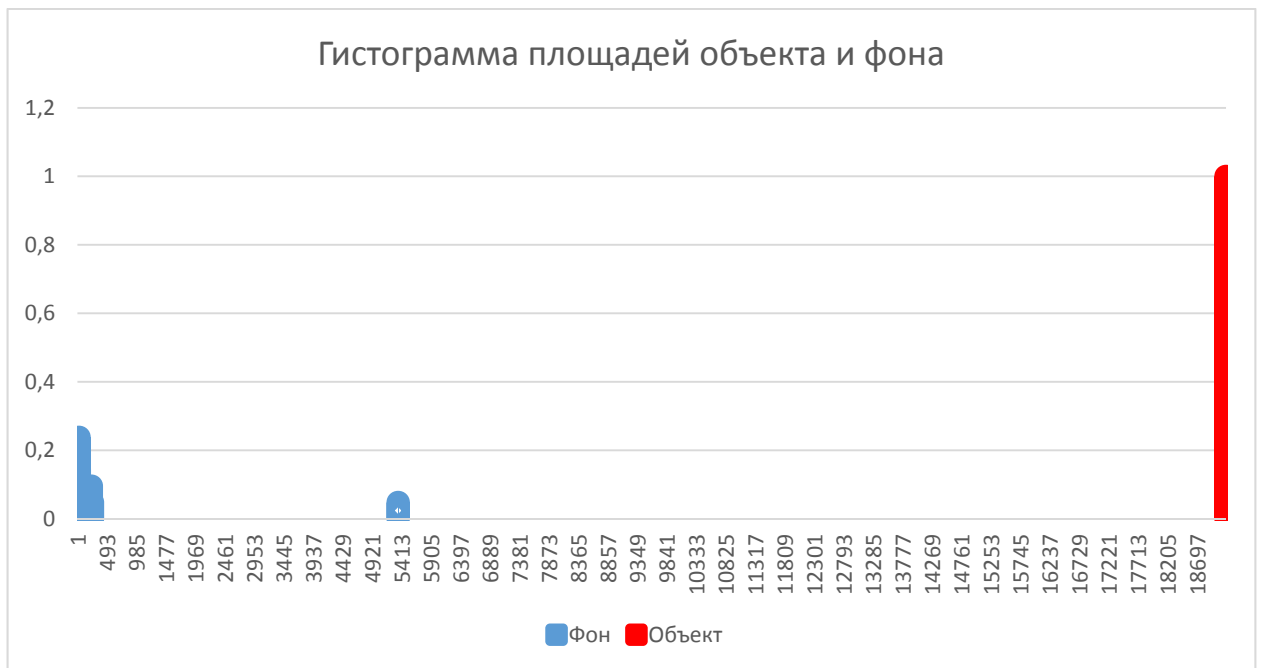


Рисунок 3.19. Гистограмма связанных областей

### 3. Порог 90 (рисунок 3.20).

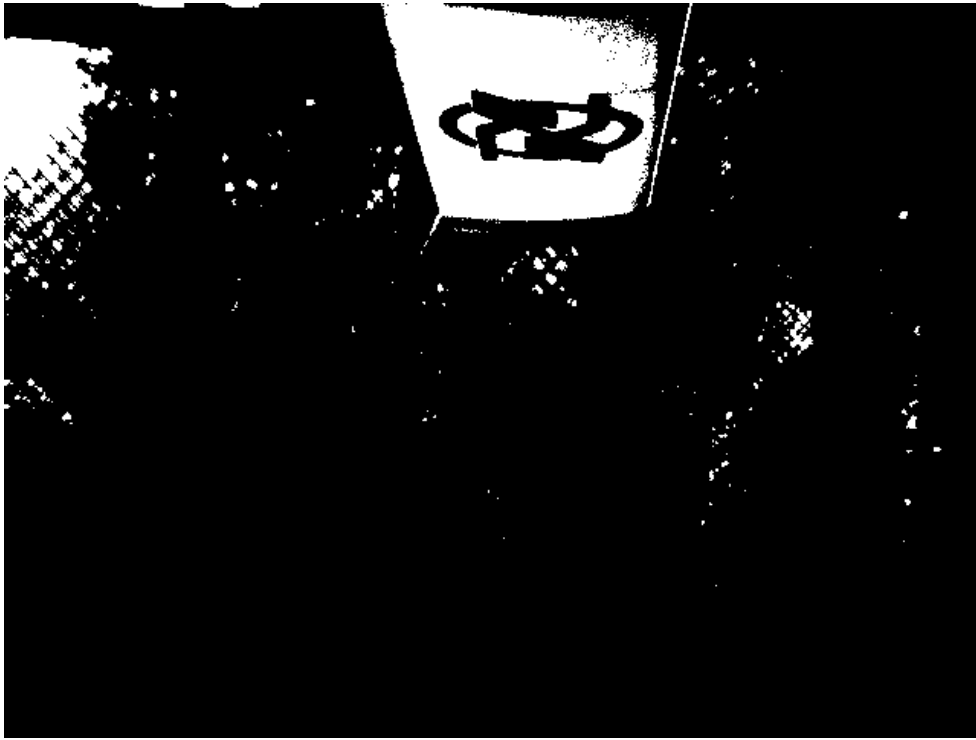


Рисунок 3.20. Бинаризация исходного изображения

Гистограмма связанных областей представлена на рисунке 3.21.



Рисунок 3.21. Гистограмма связанных областей

## 4. Порог 100 (рисунок 3.22).



Рисунок 3.22. Бинаризация исходного изображения

Гистограмма связанных областей представлена на рисунке 3.23.



Рисунок 3.23. Гистограмма связанных областей



## 5. Порог 110 (рисунок 3.24).



Рисунок 3.24. Бинаризация исходного изображения

Гистограмма связанных областей показана на рисунке 3.25.

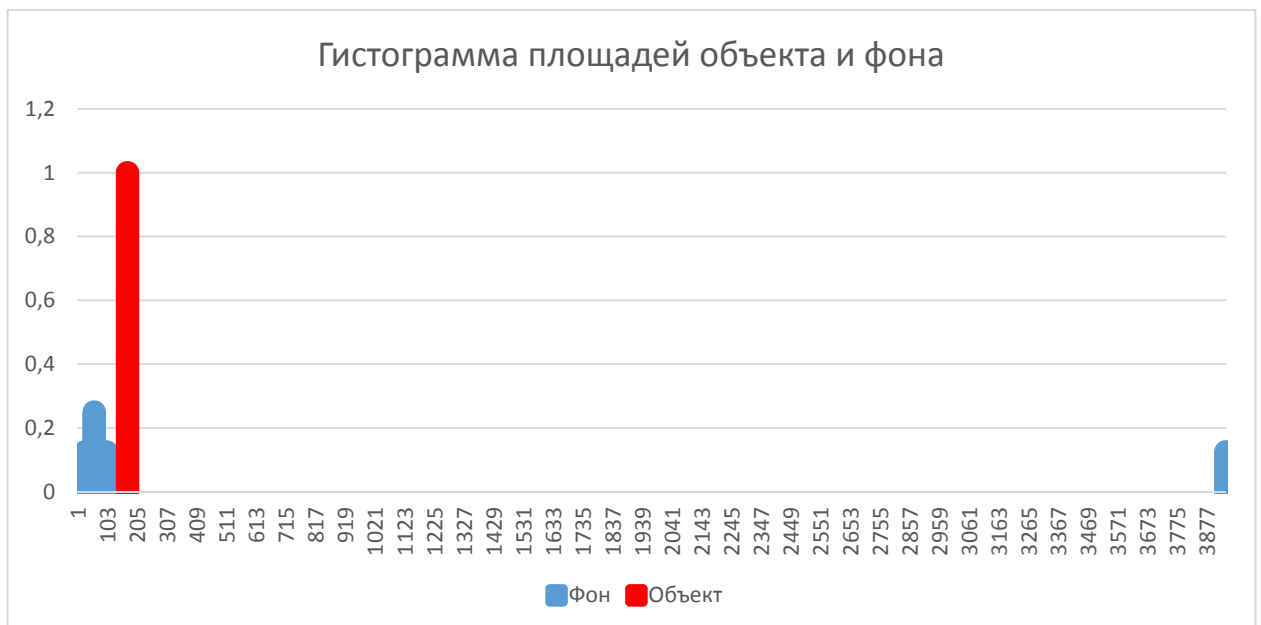


Рисунок 3.25. Гистограмма связанных областей

При порогах бинаризации от 70 до 100 видно, что гистограммы объекта и фона не пересекаются, а следовательно, возможно безошибочное распознавание. При порогах выше 110 гистограммы совпадают, что делает невозможным распознавание. Следовательно, данный признак будет корректно использовать только на определенном диапазоне порогов бинаризации.

Однако заметно, что даже при безошибочном распознавании лопасти, она выделяется частично, что затрудняет определение ее границ, а также положения торца. Для увеличения точности сегментации лопасти-фон было принято решение по улучшению условий наблюдения, в частности, с целью уменьшения влияния неоднородной текстуры фона.

### **3.3 Обнаружение с улучшенными условиями наблюдения**

Основная цель улучшения условий наблюдения – это 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.

Следовательно, необходимо компенсировать влияние данных факторов, т. е. повысить контрастность между лопастью и фоном и сформировать однородную по яркости текстуру фона.

Повышение контраста. При малых значениях выдержки, которые необходимы для получения изображения лопасти без «смаза» [59], возникает следующая проблема: при максимально возможной открытой диафрагме используемого объектива (диафрагменное число 1.4) получают видеокadres с низким контрастом между лопастью и фоном из-за недостаточной освещенности.

Низкий контраст затрудняет точное выделение краев (границы) лопасти и определение ее положения на видеокадре [60].

Один из вариантов увеличения контрастности изображения – использование дополнительной подсветки. На основе проведенных экспериментов установлено, что целесообразно использовать для подсветки лопасти светодиодный прожектор (рисунок 3.26) мощностью 30 Вт (3000 Лм) [61].



Рисунок 3.26. Расположение светодиодного прожектора

Ниже показаны изображения торца лопасти, с использованием подсветки, и без нее (рисунок 3.27).



Рисунок 3.27. Изображения торца лопасти

Контраст  $K = \frac{B_l - B_\phi}{B_\phi}$  (где  $B_l$  – яркость лопасти,  $B_\phi$  – яркость фона) между

лопастью и фоном на изображении без использования подсветки – 0,4, с использованием – 0,8. Таким образом, использование подсветки повысило контраст в 2 раза.

Улучшение текстуры фона. На исходных изображениях, полученных на экспериментальной установке, присутствовала текстура фона с большим яркостным разбросом, что не способствовало корректному автоматическому распознаванию границ лопастей. Так как в основе алгоритмов выделения лопастей лежит выделение границ изображения лопасти, то наличие элементов фона с яркостями, близкими к яркости лопасти, делают невозможным точное определение границ. Эта проблема наглядно видна на двух увеличенных фрагментах границы лопасти и фона (рисунок 3.28).

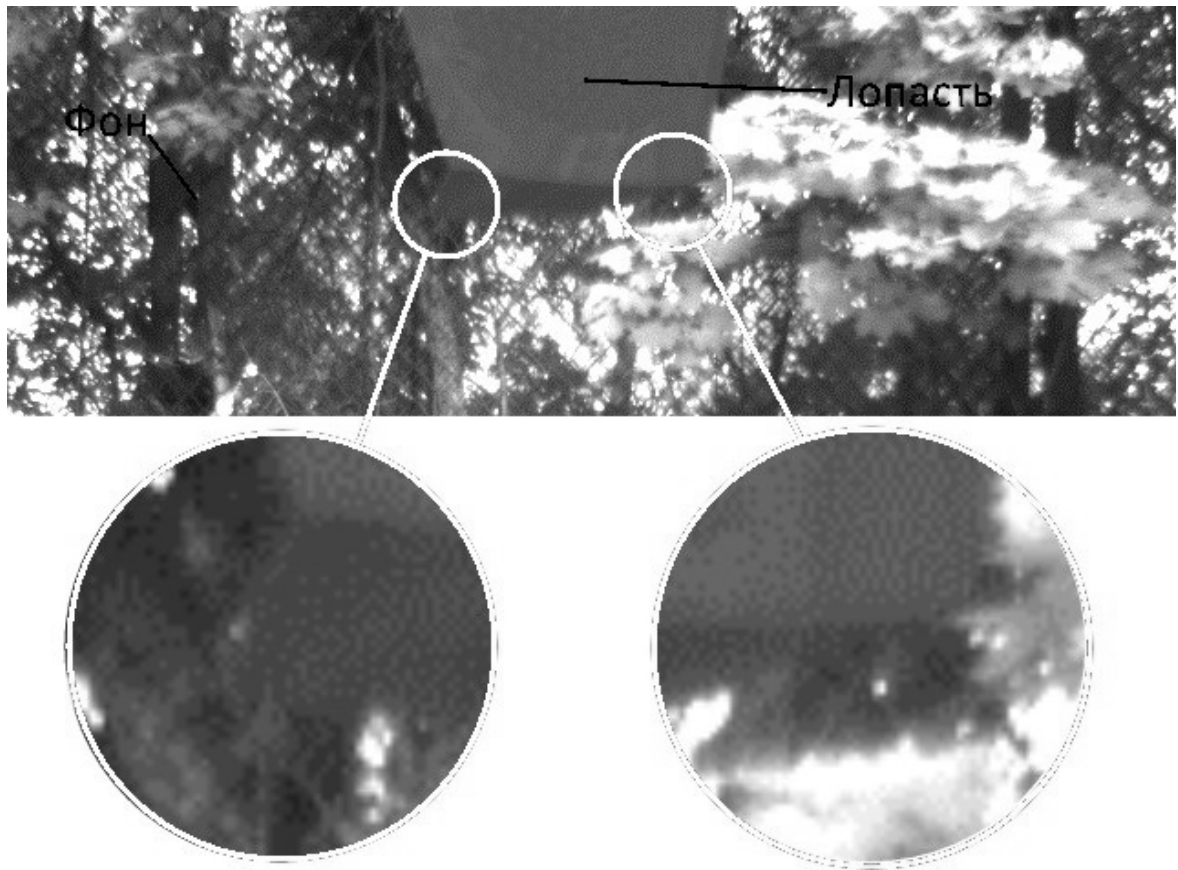


Рисунок 3.28. Фрагменты границы лопасти и фона

Для изменения текстуры фона было предложено использовать экран, расположенный в поле зрения видеокамеры и покрытый черной (контрастной по отношению к лопасти) краской (рисунок 3.29).



Рисунок 3.29. Расположение экрана на экспериментальной установке

На рисунке 3.30 приведен пример видеокadra, полученного после проведенных работ по улучшению условий наблюдения.



Рисунок 3.30. Пример видеокadra

Для этого видеокadra построены следующие нормированные гистограммы распределений яркостей объекта и фона (рисунок 3.31).



Рисунок 3.31. Нормированные гистограммы распределений яркости объекта и фона

В результате видно, что гистограммы объекта и фона практически не пересекаются.

### 3.4 Измерение положения торца лопасти

Как было показано выше, требуемым результатом оптических измерений – это измерение положения торца лопасти в системе координат вертолета. Комплекс алгоритмов, реализующий решение этой задачи, представлен на рисунке 3.32.

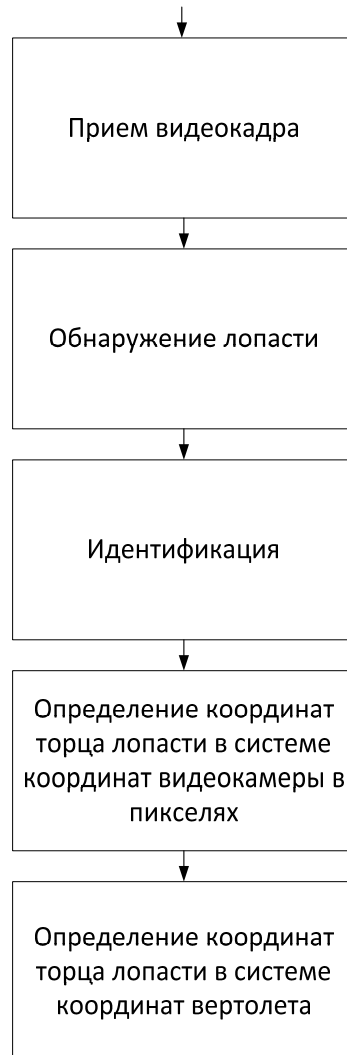


Рисунок 3.32. Комплекс алгоритмов измерения положения торца лопасти в системе координат вертолета

Структура комплексов алгоритмов [62], реализуемых при обработке каждого видеокadra, приведена на рисунке 3.33.

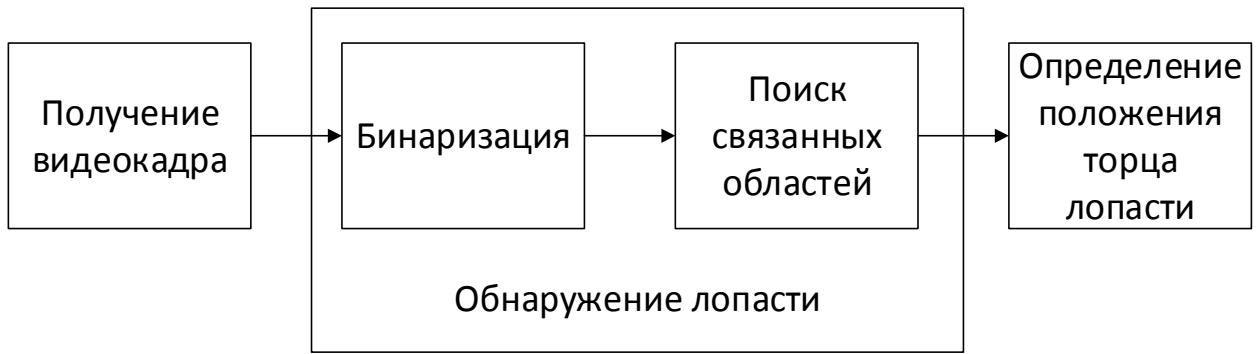


Рисунок 3.33. Структура комплексов алгоритмов

*Бинаризация.* После проведенной работы по улучшению условий наблюдения становится возможным сегментировать изображение. Для этого используется пороговая бинаризация [63, 64]:

$$B_{\text{бин}} = \begin{cases} 0, & B_{\text{исх}} \geq B_{\text{пор}} \\ 1, & B_{\text{исх}} < B_{\text{пор}} \end{cases}, \quad (3.6)$$

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:

$$B_{\text{пор}} = \frac{M_{\text{ф}} + M_{\text{л}}}{2}. \quad (3.7)$$

В результате получаем бинарное изображение (рисунок 3.34) лопасти (белая область) и фона (черная область).



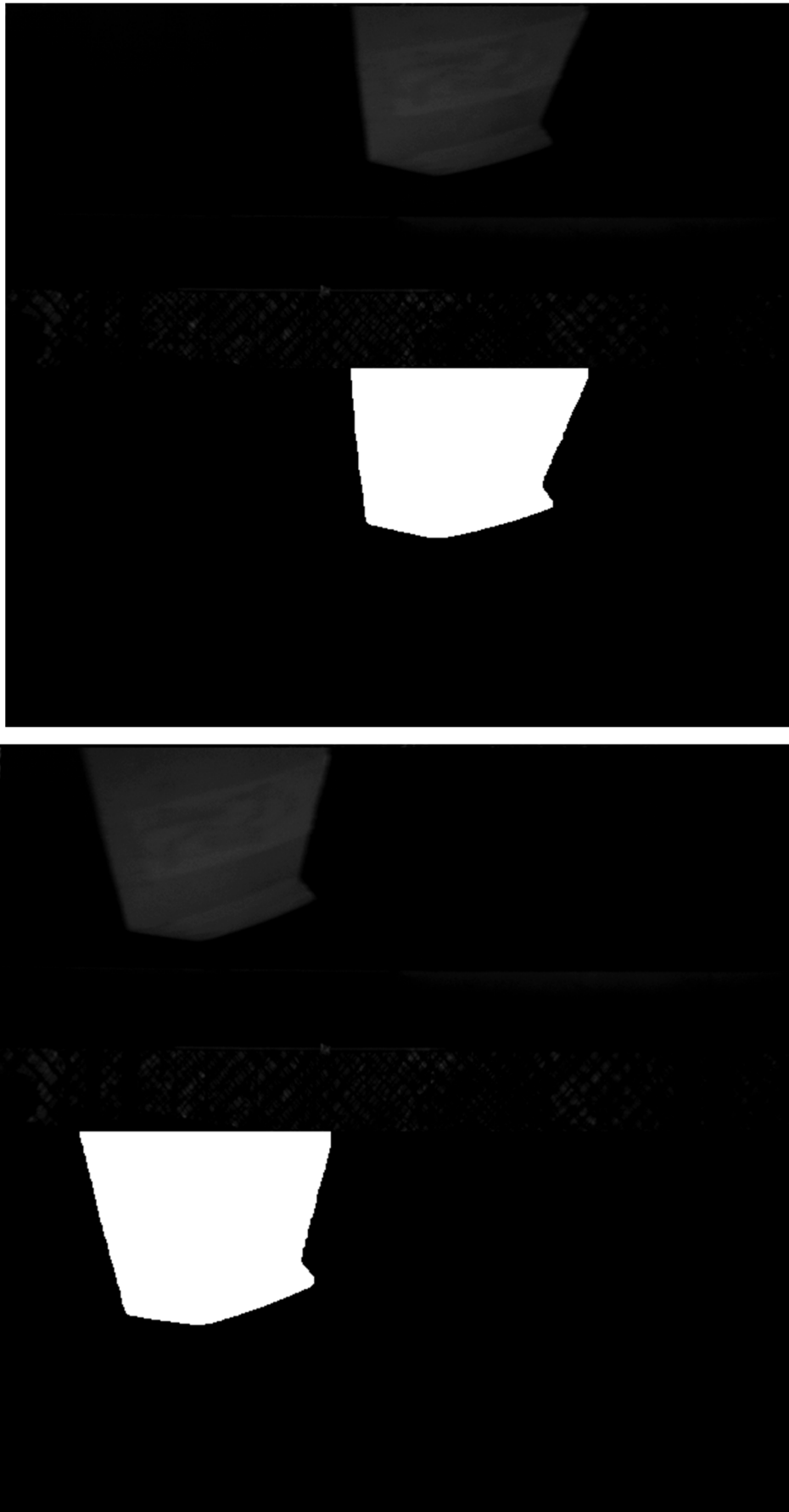


Рисунок 3.34. Примеры бинаризации

*Поиск связанных областей.* 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» [65]. В результате получается множество связанных областей, одна из которых характеризует положение лопасти.

*Обнаружение лопасти.* Так как наиболее крупный контрастный объект на фоне – это лопасть, то для ее выделения производится поиск наибольшей по площади связанной области (рисунок 3.35).

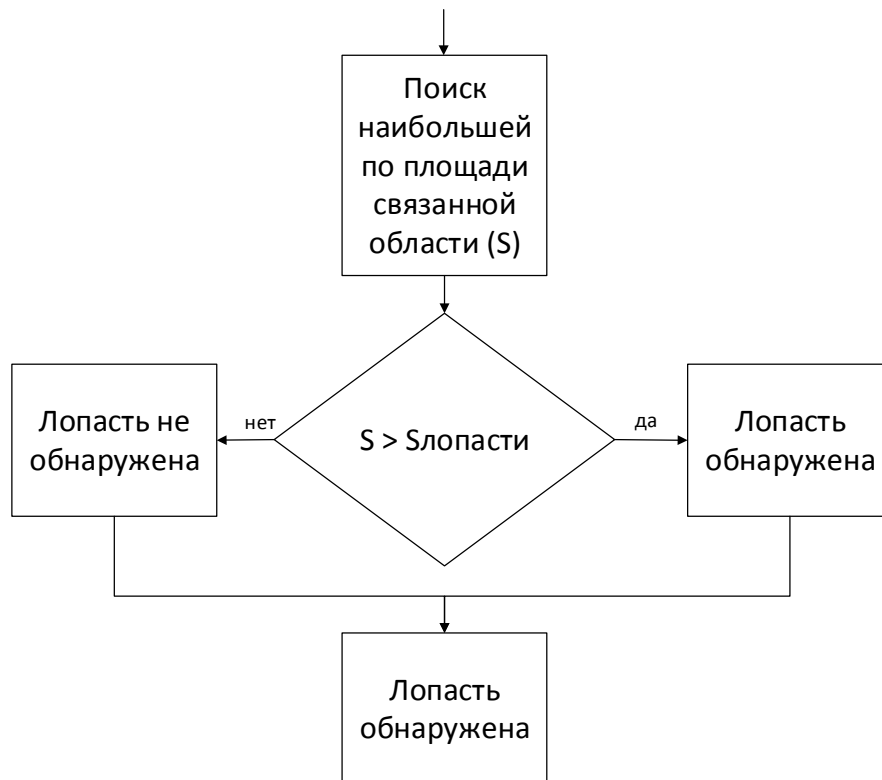


Рисунок 3.35. Алгоритм определения положения лопасти

Если такая область присутствует и удовлетворяет условию по минимальной площади  $S_{\text{лопасти}}$  (определяемое для исключения ошибок «ложная тревога»), то она считается лопастью.

Результат работы алгоритма представлен на рисунке 3.36.

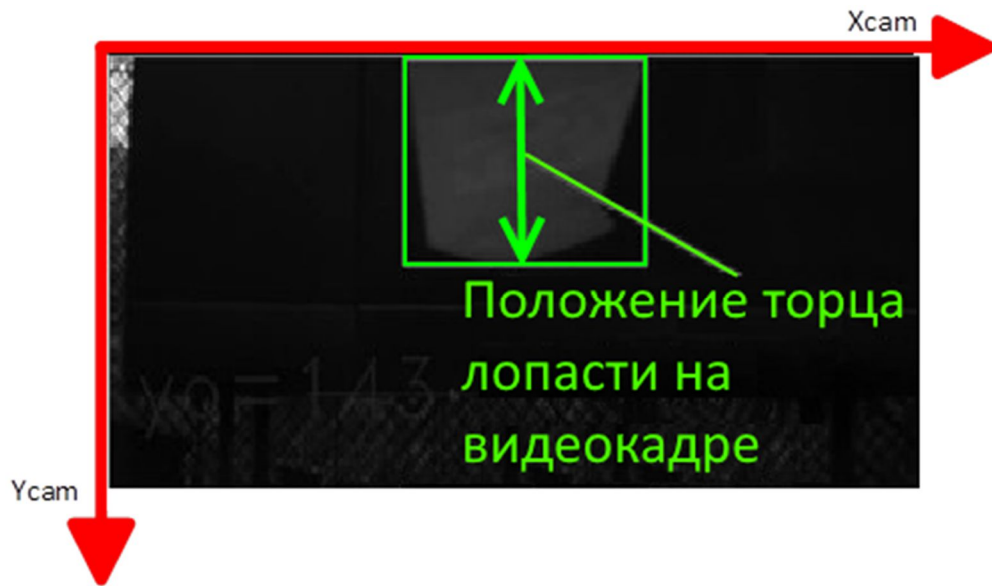


Рисунок 3.36. Результат работы алгоритма обнаружения и измерения положения торца лопасти в системе координат камеры

На рисунке 3.37 приведены примеры обнаружения лопасти на видеокадре. Лопасть обрамлена серым прямоугольником.

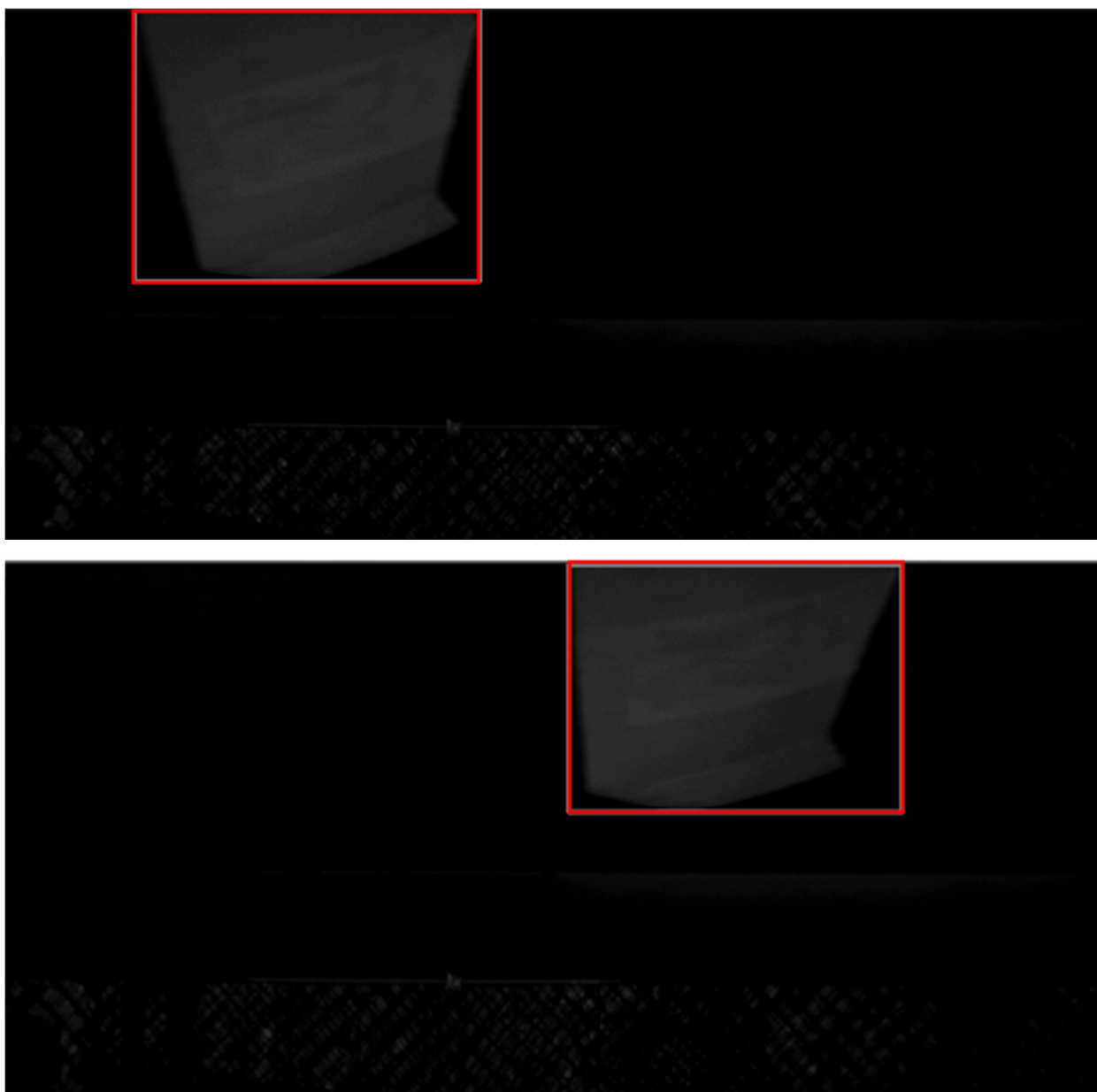


Рисунок 3.37. Примеры обнаружения лопастей

*Калибровка видеокамеры.* Калибровка видеокамеры необходима для определения коэффициентов дисторсии и коэффициента перевода отклонений торца лопасти из пикселей в миллиметры. Для устранения дисторсии координаты пикселей пересчитываются с помощью следующих формул [66]

$$\begin{aligned} x_c &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y_c &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy \end{aligned} \quad (3.9)$$

где  $x$  и  $y$  – первоначальное положение пикселя;

$x_c$  и  $y_c$  – расположение пикселя после устранения дисторсии;

$k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты радиальной дисторсии;

$p_1$  и  $p_2$  – коэффициенты тангенциальной дисторсии.

$$r^2 = x^2 + y^2. \quad (3.10)$$

В данной работе для определения коэффициентов дисторсии используется алгоритм, описанный в работе Z. Zhang [67].

Процесс определения коэффициента перевода отклонений торца лопасти из пикселей в миллиметры основан на обработке тестовой видеозаписи перемещения лопасти на фоне линейки-шаблона с метками. Так как линейное расстояние между метками заранее известно, то перемещение в пикселях на кадрах видеопоследовательности однозначно можно соотнести с линейными размерами шаблона. Кадр из видеозаписи калибровки для определения вышеуказанного коэффициента изображен на рисунке 3.38.

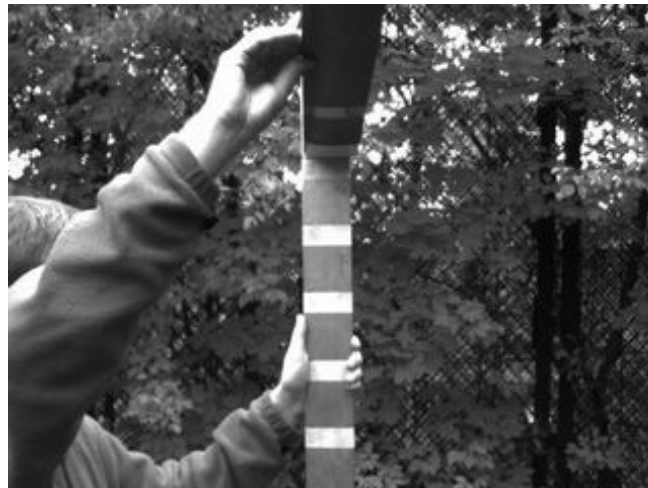


Рисунок 3.38. Кадр калибровки

По результатам калибровки можно определить:

- 1) положение лопасти в недеформированном состоянии в пикселях;
- 2) соотношение количества пикселей в 10 мм.

После получения этих данных можно произвести перерасчет по формуле:

$$Y = (N - Y_p) / S, \quad (3.11)$$

где  $Y$  – отклонение торца лопасти в мм,  $N$  – положение торца лопасти в нулевом положении,  $Y_p$  – положение торца лопасти в пикселях,  $S$  – количество пикселей в 10 мм.

*Определение координат торца лопасти.* Введем систему координат видеокамеры  $Ox_{кам}y_{кам}$ . Направление ее осей указано на рисунке 3.39.



Рисунок 3.39. Система координат видеокамеры

После распознавания лопасти на видеокадре становится возможным определить положение ее торца в системе координат видеокамеры. Так как стоит задача определить смещение торца лопасти, то рассматривается только координата  $Y$ .

Вводится допущение, что положению торца лопасти соответствует нижняя граница прямоугольника, обрамляющего лопасть (рисунок 3.40).

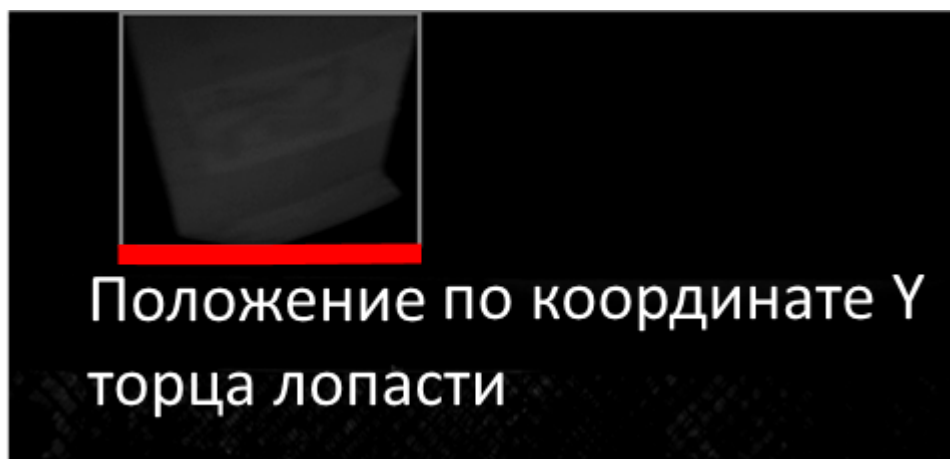


Рисунок 3.40. Положение торца лопасти

После обнаружения лопасти и определения положения ее торца на видеокадре благодаря проведенной калибровке можно получить отклонение торца лопасти  $Y_{кам}$  в системе координат видеокамеры  $Ox_{кам}y_{кам}$ .

### 3.5 Идентификация лопастей

На исследуемом винте расположены две лопасти. Один из важных моментов исследования поведения лопастей на различных режимах – идентификация лопастей. Визуально лопасти не имеют различий (по цвету и текстуре), однако индивидуальные траектории их движения могут различаться. Таким образом, требуется отделить измерения одной лопасти от другой. Без дополнительных манипуляций с текстурой лопасти практически сложно идентифицировать разные лопасти.

Для решения задачи идентификации предлагается наносить на поверхность одной из 2-х имеющихся лопастей контрастный маркер квадратной формы со стороной, равной одной трети ширины лопасти (рисунок 3.41) [62].

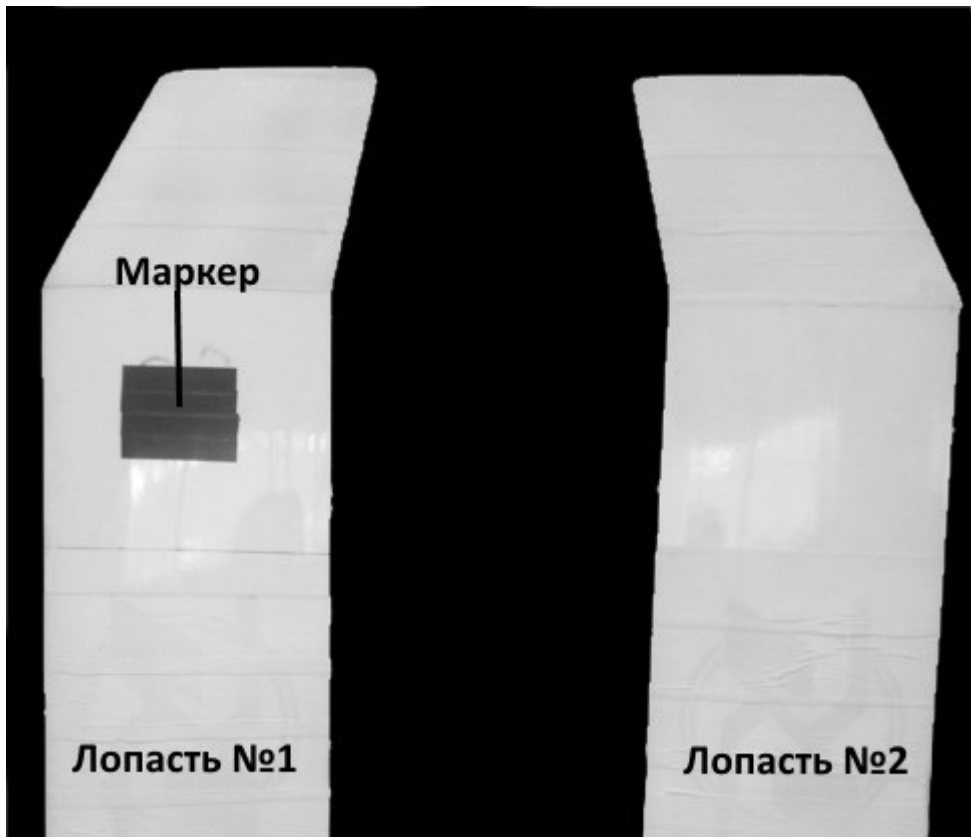


Рисунок 3.41. Расположение маркера

Недостаток этого метода в том, при выходе маркера за пределы кадра появляются ошибки идентификации лопастей (рисунок 3.42).



Рисунок 3.42. Ошибка идентификации



Этого недостатка можно избежать, если заранее оценить диапазон отклонения торца лопасти в поле зрения видеокамеры и установить видеокамеру таким образом, чтобы маркер на лопасти никогда не выходил за поле зрения на заранее известном режиме работы экспериментальной установки. Необходимо отметить, что текстура лопасти должна быть однородного белого цвета. При этом условии гарантируется, что лопасть будет обнаружена и идентифицирована корректно.

Алгоритм идентификации представлен на рисунке 3.43. Порог  $S_{\text{маркера}}$  подбирается так, чтобы исключить возможность ложного обнаружения маркера.

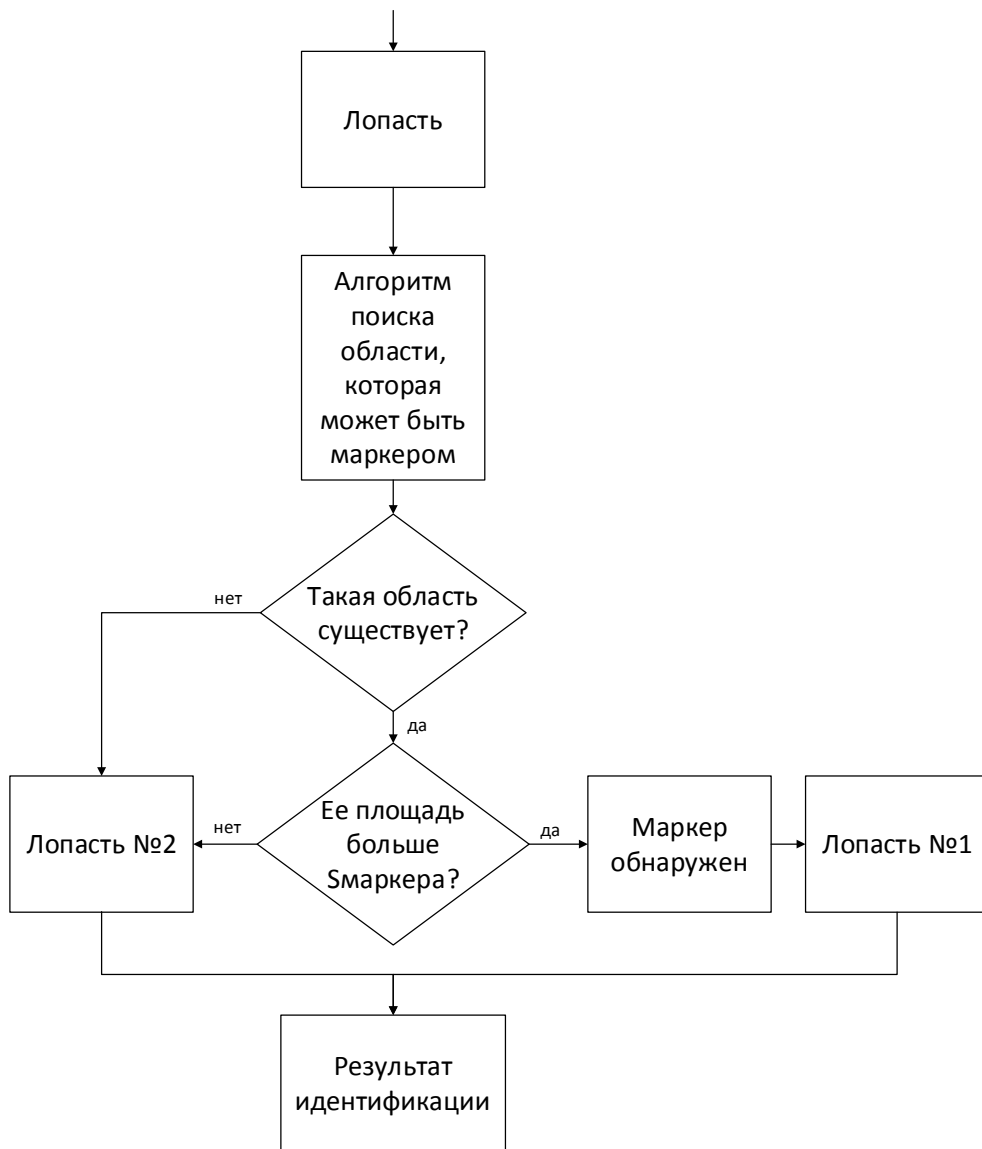


Рисунок 3.43. Алгоритм идентификации лопасти

На лопасти производится поиск маркера. Если маркер отсутствует, то это лопасть № 2 (рисунок 3.44), если присутствует – то лопасть № 1 (рисунок 3.45).



Рисунок 3.44. Пример распознавания лопасти № 2



Рисунок 3.45. Пример распознавания лопасти № 1

### 3.6. Выводы

1. Определена структура оптического канала измерений, обеспечивающие измерения положения торца лопасти вертолета;
2. Произведен выбор высокоскоростной видеокамеры, удовлетворяющей заданное требование к частоте измерений;
3. 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;

4. Для повышения точности определения положения торца лопасти по вертикали в оптическом канале измерений разработаны методы улучшения условий наблюдения, включающие в себя выравнивание текстуры фона и повышение контрастности объектов «лопасть-фон»;
5. Для получения индивидуальных траекторий движения торцов лопастей предложен метод идентификации лопастей, основанный на использовании визуальных маркеров на поверхности лопасти;
6. Разработан комплекс алгоритмов обработки и анализа видеоинформации, позволяющий: обнаруживать лопасти на получаемых изображениях, оценивать положения торца лопасти в системе координат видеокамеры и идентифицировать лопасть.

## 4. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### 4.1 Описание программно-аппаратного комплекса двухканальной системы измерений положения лопасти

#### 4.1.1 Аппаратная часть программно-аппаратного комплекса

На рисунке 4.1 представлена схема аппаратной части программно-аппаратного комплекса (ПАК).

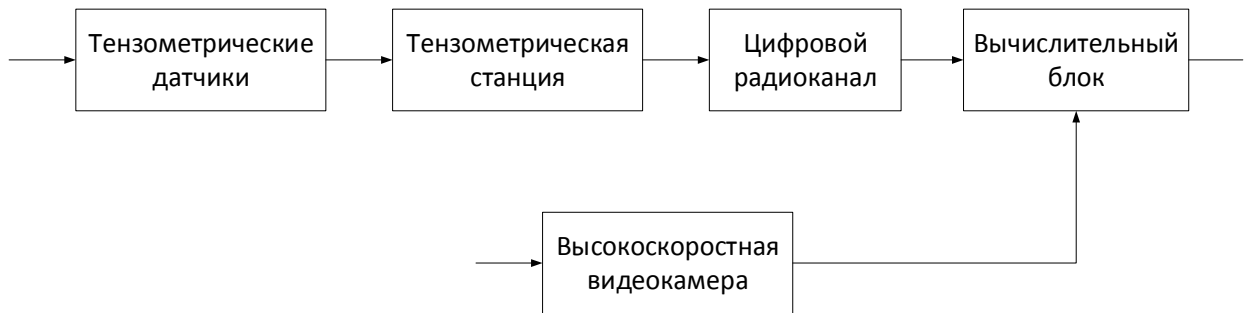


Рисунок 4.1. Структурно алгоритмическая часть ПАК

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 приемника радиоканала информация передается на вычислительный блок.

Второй канал – оптических измерений. В нем 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:

- 1) прием и последующая обработка тензометрических измерений;
- 2) прием видеокадра и его обработка с целью получения оптических измерений положения торца лопасти относительно видеокамеры;
- 3) обработка результатов измерений после эксперимента.

#### **4.1.2. Тензометрический канал**

*Тензометрические датчики.* На исследуемой лопасти использовались фольговые тензорезисторы типа КФ5П1-20-200 [43] с базой 20 мм, которые были включены по полной мостовой схеме [46]. Пример лопасти с наклеенными тензометрическими датчиками представлен на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2. Лопать с тензометрическими датчиками

***Тензометрическая станция.*** Тензометрическая станция (рисунок 4.3) состоит из платы микроконтроллера, передающего модуля, источника питания.

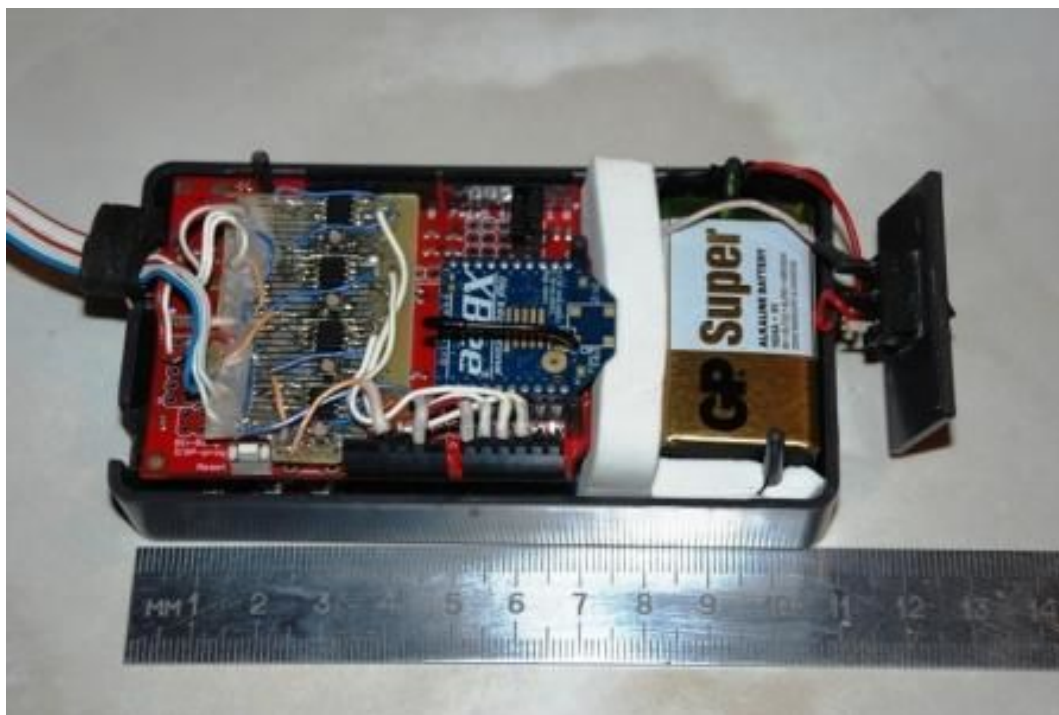


Рисунок 4.3. Тензометрическая станция

Тензометрическая станция сделана четырехканальной, при необходимости подключения дополнительных датчиков возможна установка еще двух дополнительных каналов [49].

Подключение сигнальных линий, а также питания тензометрических датчиков осуществляется через разъем, расположенный на шлейфе, выходящим из ее корпуса.

Передающий блок можно использовать с автономным питанием (используется батарея *6LR61*), установленным в его корпусе. Так же можно использовать и внешнее питание диапазоном от 8 до 12 В.

Плата микроконтроллера включает [68]:

- 1) микроконтроллер *ATMEGA-328*;
- 2) 14 цифровых порта входа/выхода;
- 3) 6 аналоговых порта ввода;
- 4) 16 МГц кварцевый генератор.

Общий вид платы микроконтроллера приведен на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4. Плата микроконтроллера

Технические характеристики [69]:

- 1) микроконтроллер *ATMEGA-328*;
- 2) ПЗУ (*Flash memory*) 32 Кбайт;
- 3) оперативная память (*SDRAM*) 2 Кбайт;
- 4) тактовая частота 16 МГц;
- 5) цифровые порты ввода/вывода – 14 портов;
- 6) аналоговые порты ввода – 6 портов;
- 7) интерфейсы - *USB, ISP/ICSP, SPI*;
- 8) питание – от *USB* или от внешнего источника;
- 9) входное напряжение – 7-12 В.

На свободном месте этой платы установлена плата с предварительными усилителями сигнала тензометрических датчиков (рисунок 4.5).



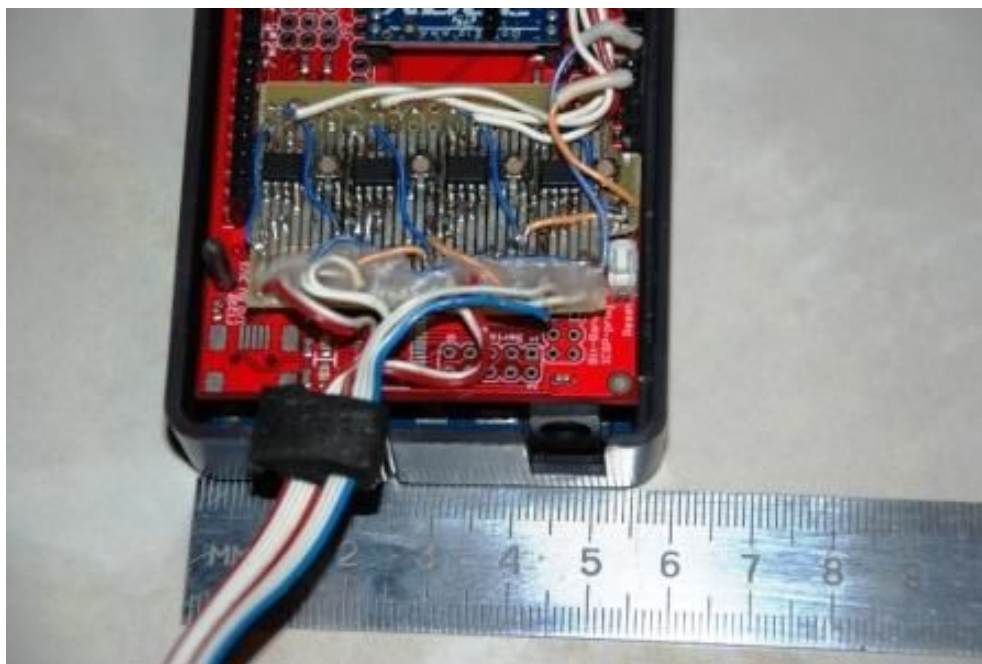


Рисунок 4.5. Расположение платы с предварительными усилителями сигнала

Тензометрическая станция размещается на втулке несущего винта (рисунок 4.6).

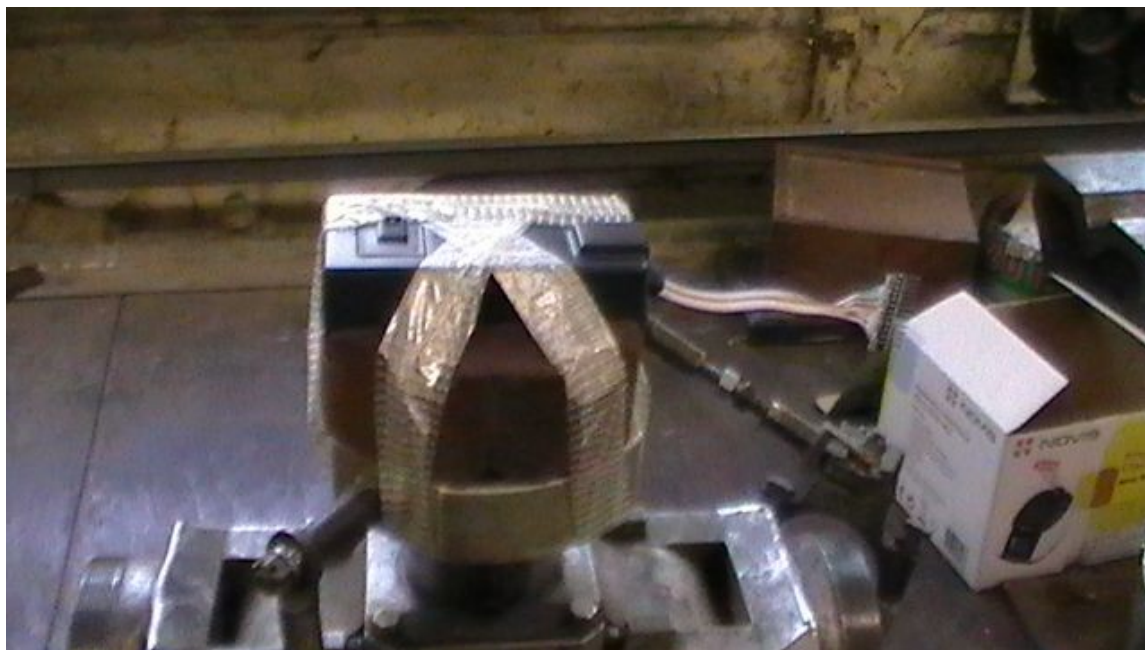


Рисунок 4.6. Расположение тензометрической станции

**Радиоканал.** Для организации радиоканала были выбраны модули *XBee* [70] компании *Digi* (рисунок 4.7), работающие на частоте 2.4 ГГц.

Для установки модуля *XBee* на тензометрическую станцию, используется плата расширения *XBee Shield* (рисунок 4.7)

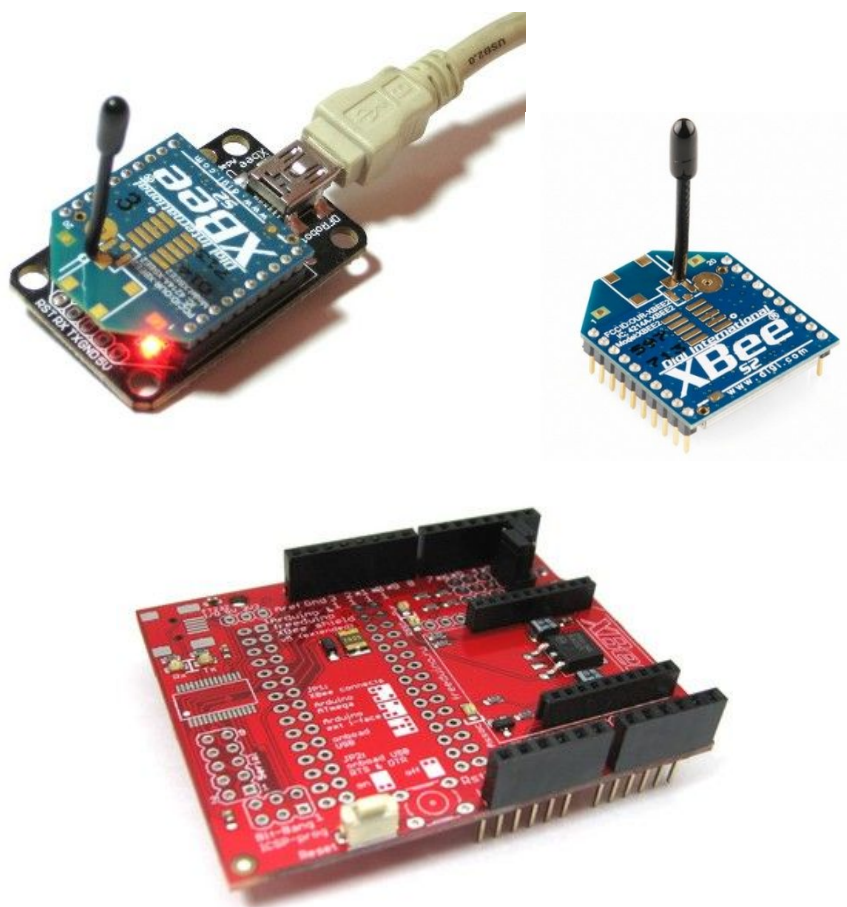


Рисунок 4.7. Модули *XBee* и *XBee Shield*

Один из модулей соединяется с тензометрической станцией с помощью *XBee Shield* и работает в качестве передатчика измерений, получаемых с тензодатчиков. Второй модуль *XBee* используется в качестве приемника и соединяется с вычислительным блоком с помощью *XBee – USB* адаптера.

Модули *XBee* имеют выходную мощность 1мВт. Радиус действия достигает 90 м на открытом пространстве, что удовлетворяет поставленному требованию по дальности.

В модулях используется собственный протокол передачи данных *ZigBee* [71]. Максимально возможная скорость передачи данных составляет 250 кбит/сек [72], что удовлетворяет поставленному требованию по пропускной способности.

### 4.1.3. Оптический канал

**Высокоскоростная видеокамера.** В соответствии с требованиями [разд. 1.1] была выбрана высокоскоростная видеокамера *Allied Vision Tech Prosilica GE680* [73] со следующими характеристиками и объективом:

- 1) частота съемки 200 кадров в секунду;
- 2) разрешение 640×480 пикселей;
- 3) объектив *Computar M0814MP* (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8. Высокоскоростная видеокамера

*Prosilica GE-680* – это высокоскоростная, основанная на сенсоре *Kodak KAI-0340D*, черно-белая видеокамера с *VGA* разрешением и интерфейсом *GigE* [74]. Питание видеокамеры осуществляется с помощью внешнего блока питания. Входное напряжение блока питания 220 В переменного тока, выходное 12 В постоянного тока 0,85 А. С вычислительным блоком видеокамера соединяется посредством сетевого кабеля *UTP CAT 5e*. В таблице 4.1 приведены основные характеристики выбранной видеокамеры [73].

Таблица 4.1. Характеристики видеокамеры

Интерфейс	<i>IEEE 802.3 1000baseT</i>
Максимальное разрешение	640 x 480
Сенсор	<i>Kodak KAI-0340</i>
Максимальная частота кадров при полном разрешении	205 кадров/с
Формат	1/3
Тип	<i>CCD Progressive</i>
Размер пикселя	7.4 мкм
Разъем объектива	<i>C</i>

В качестве объектива используется *Computar M0814MP* - объектив с фиксированным фокусным расстоянием  $f=8$  мм. Основные технические характеристики объектива приведены в таблице 4.2 [75].

Таблица 4.2. Характеристики объектива

Фокусное расстояние ( $f$ )	8 мм
Формат	2/3"
Диафрагма	Ручная
Макс. апертура	1:1,4
Диапазон резкости, м	0,3 ~ бесконечность
Угол зрения по горизонтали	56°
Угол зрения по вертикали	47°

**Вычислительный блок.** 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*.

## 4.2. Программная часть программно-аппаратного комплекса

Программная часть ПАК обеспечивает реализацию алгоритмов, описанных в разделах 3.4, 3.5, 2.3.

С помощью разработанных программ решаются следующие задачи:

- 1) получение сигналов с тензометрических датчиков, их оцифровка;
- 2) формирование сообщения с результатами измерений для последующей передачи его по цифровому радиоканалу;
- 3) получение тензометрических измерений и сохранение результата измерений;
- 4) получение видеок кадров от высокоскоростной видеокамеры;
- 5) обнаружение на видеок кадрах изображения лопасти;
- 6) идентификация лопасти;
- 7) определение координат торца лопасти с последующим сохранением результатов измерения;
- 8) обработка результатов измерений.

Программная часть ПАК разделяется на две части: ПО тензометрической станции и ПО вычислительного блока. Схема программной части ПАК представлена на рисунке 4.9.

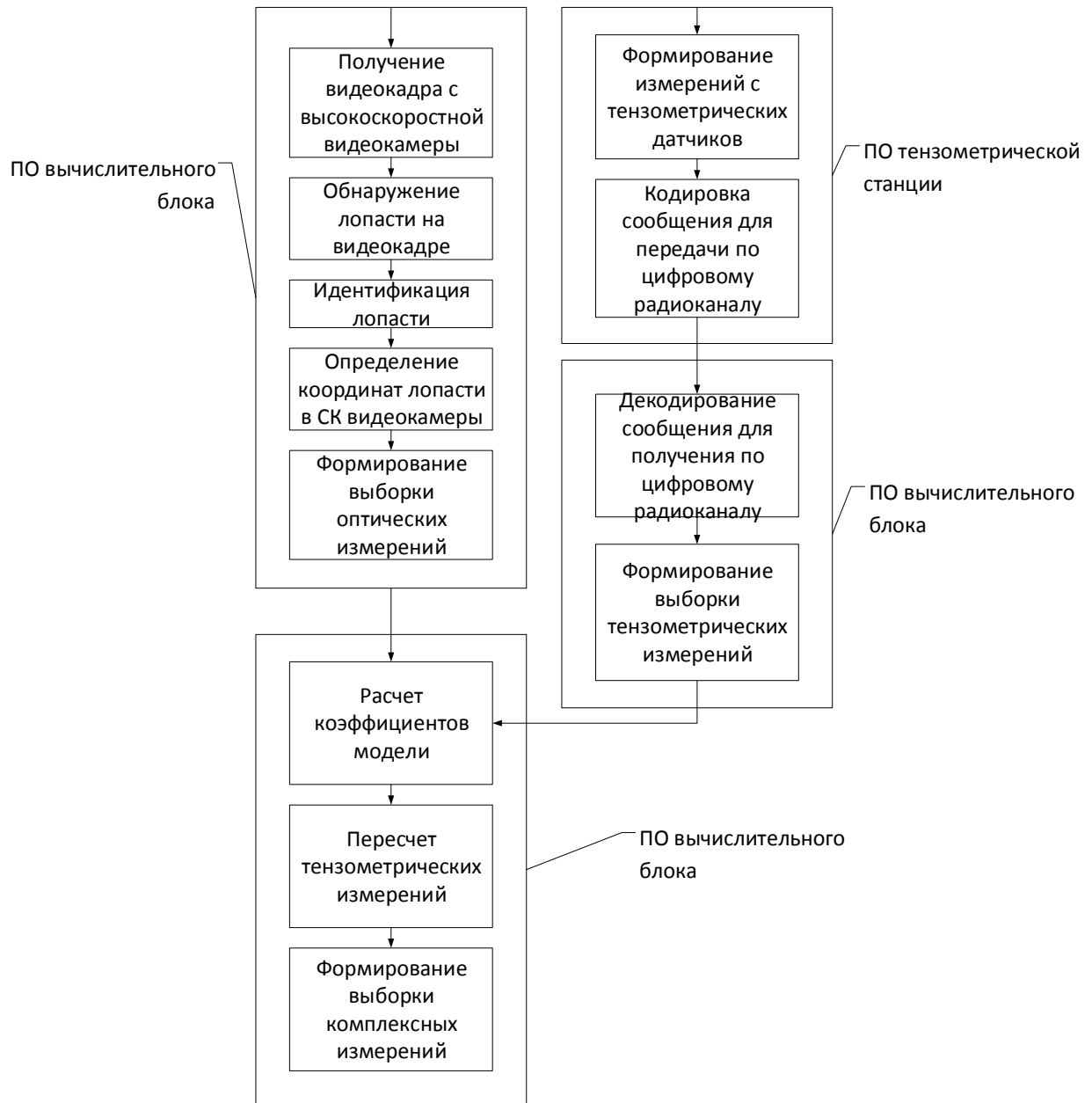


Рисунок 4.9. Схема программной части ПАК

#### 4.2.1. Программное обеспечение тензометрической станции

Написание встроенного программного обеспечения выполнялось в среде для разработки *Arduino IDE* [76]. Язык программирования – *Processing/Wiring*. Основная задача ПО тензостанции – реализация алгоритмов, описанных в разделе 2.3.

#### 4.2.2. Программное обеспечение вычислительного блока

Программное обеспечение написано на языке *C++*, с использованием библиотек *Qt*, *Qwt*, *OpenCV* [77], *PvAPI SDK*, в среде разработки *Microsoft Visual Studio*. В состав программного комплекса измерений и обработки результатов входят следующие модули (программы):

- 1) *Master*;
- 2) *StartGlue*;
- 3) *StartDetect*;
- 4) *StartRNK*.

Опишем функции каждого модуля.

**Модуль *Master*** производит прием и запись на ПЗУ компьютера результатов экспериментов. Общий вид приведен на рисунке 4.10.

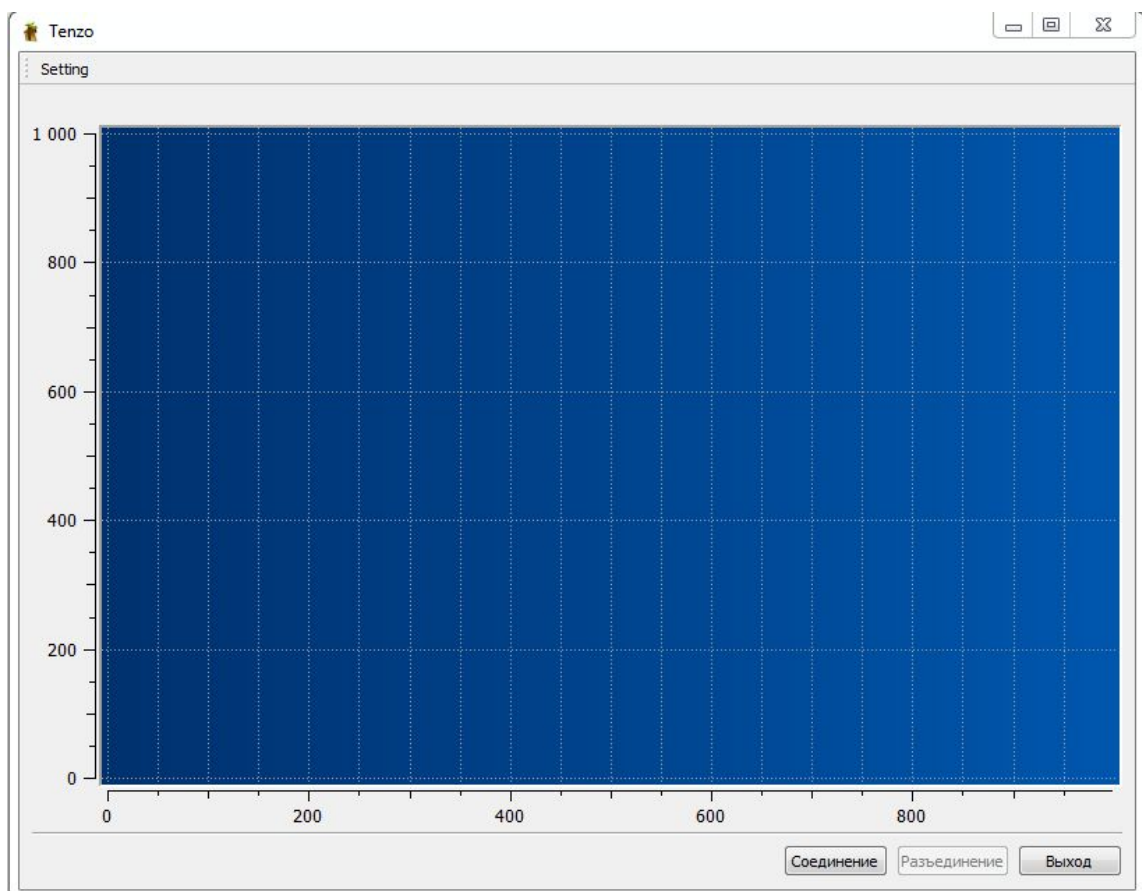


Рисунок 4.10. Графический интерфейс модуля

Список параметров хранится в файле настройки (*setting.ini*). В таблице 4.3 даются объяснения каждому параметру.

Таблица 4.3. Настройки параметров

Секция <i>GENERAL</i> (общие настройки)	
<i>path</i>	абсолютный путь к директории на ПЗУ, в которой будут сохраняться измерения
Секция <i>TENZO</i> (настройки тензометрического канала)	
<i>numberCom</i>	номер <i>COM</i> порта
<i>sensorsNum</i>	количество тензодатчиков
<i>rate</i>	скорость соединения по <i>COM</i> порту
<i>countTenzo</i>	параметр, отвечающий за количество измерений в одном файле
Секция <i>CAMERA</i> (настройки оптического канала)	
<i>height</i>	разрешение видеокамеры по высоте
<i>width</i>	разрешение видеокамеры по ширине
<i>exposure</i>	длина выдержки видеокамеры (миллисекунда*1000)
<i>framerate</i>	частота съёмки видеокамеры, кадры в секунду
<i>gain</i>	цифровое усиление (от 0 до 24).
<i>fps</i>	частота кадров видеозаписи полученных кадров
<i>countVideo</i>	параметр, отвечающий за количество измерений в одном файле
<i>countCamera</i>	параметр, отвечающий за количество измерений в одном файле
<i>fourcc</i>	идентификатор видеокодека, используемого в видеозаписи полученных кадров
<i>thresh</i>	порог бинаризации

Результаты экспериментов, как было упомянуто выше, пишутся в директорию, указанную параметром *path* в *setting.ini*. Для каждого эксперимента создается директория по шаблону (*DD\_MM\_YYYY*)(*HH\_MM\_SS*), где:



- 1) *DD* – день;
- 2) *MM* – месяц;
- 3) *YYYY* – год;
- 4) *HH* – час;
- 5) *MM* – минута;
- 6) *SS* – секунда.

Каждая директория имеет определенную структуру и содержит в себе следующие файлы и директории (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11. Структура директории

В директории *camera* сохраняются параметры каждого полученного видеокadra в файлы формата *csv*. Пример файла приведен на рисунке 4.12.

	A	B	C
1	1	1	7163
2	2	2	7663
3	3	3	8163
4	4	4	8663
5	5	5	9163
6	6	6	9663
7	7	7	10163
8	8	8	10663
9	9	9	11163
10	10	10	11663

Рисунок 4.12. Пример файла

Описание параметров представлено в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Описание столбцов файла.

Столбец	Параметр
<i>A</i>	номер кадра, получаемый в сообщении от видеокамеры
<i>B</i>	номер кадра, формируемый программой при его получении
<i>C</i>	метка времени формирования видеокadra видеокамеры

В директории *tenzo* сохраняются параметры каждого тензоизмерения. Пример файла приведен на рисунке 4.13.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	445	494	552	616	9661145	2.13E+08	213315.5	166
2	446	495	553	617	9661158	2.13E+08	213320.5	167
3	444	495	553	618	9661158	2.13E+08	213325.5	168
4	447	496	554	618	9661158	2.13E+08	213330.5	169
5	445	496	554	618	9661174	2.13E+08	213335.5	170
6	446	496	554	620	9661174	2.13E+08	213340.5	171
7	444	496	555	619	9661200	2.13E+08	213345.5	172
8	445	496	555	620	9661200	2.13E+08	213350.5	173
9	446	496	560	618	9661200	2.13E+08	213355.5	174
10	446	496	555	620	9661200	2.13E+08	213360.5	175
11	445	496	555	620	9661200	2.13E+08	213365.5	176
12	446	496	555	621	9661200	2.13E+08	213370.5	177
13	444	496	555	619	9661200	2.13E+08	213375.5	178
14	446	496	560	617	9661200	2.13E+08	213380.5	179
15	445	496	555	619	9661216	2.13E+08	213385.5	180
16	445	496	554	619	9661216	2.13E+08	213390.5	181
17	445	495	554	619	9661216	2.13E+08	213395.5	182
18	445	496	554	619	9661232	2.13E+08	213400.5	183
19	444	495	554	618	9661232	2.13E+08	213405.5	184
20	446	496	553	617	9661248	2.13E+08	213410.5	185
21	445	495	553	617	9661248	2.13E+08	213415.5	186
22	446	495	553	617	9661248	2.13E+08	213420.5	187

Рисунок 4.13. Пример файла с тензометрическими измерениями

Описание параметров представлено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 Описание столбцов файла.

Столбец	Параметр
<i>A</i>	измерения 1 датчика
<i>B</i>	измерения 2 датчика
<i>C</i>	измерения 3 датчика
<i>D</i>	измерения 4 датчика
<i>H</i>	номер измерения, формируемый микроконтроллером, входящим в состав тензостанции

В директории *video* сохраняются видеокадры, полученные от видеокамеры в файлы формата *avi*.

В файл *log.txt* сохраняются отладочные сообщения от видеокамеры.

Для уменьшения нагрузки на ПЗУ используется метод записи не в один файл, а в несколько. Нумерация файлов начинается с 0. Каждый файл содержит в себе информацию об определенном числе измерений/видеокадров (за это отвечают параметры *countCamera*, *countTenzo*, *countVideo*).

**Модуль *StartGlue*.** Для последующей обработки измерений необходимо, чтобы дополнительная информация об измерениях была в одном файле *csv*. Программа создает в корне папки файлы *camera.csv*, *tenzo.csv* и производит проверку на потерю данных, результат которой выводит в файл *check.txt*.

**Модуль *StartDetect*.** Производит обработку видеок кадров с целью получения информации о положении торца лопасти в пикселях. Параметр *thresh* в *setting.ini*, упомянутый выше, отвечает за порог бинаризации.

На выходе в директории *result* создаются два файла *blades1.avi* и *blade2.avi*. В них содержатся видеок кадры с результатами распознавания 1 и 2 лопасти, соответственно. Выходом является файл *blades.csv* (рисунок 4.14), созданный в корне директории эксперимента.

17659	17659	0	0	0	0
17660	17660	0	0	0	0
17661	17661	1	135	0	0
17662	17662	1	136	0	0
17663	17663	0	0	0	0
17664	17664	0	0	0	0
17665	17665	0	0	0	0
17666	17666	0	0	0	0
17667	17667	0	0	0	0
17668	17668	0	0	0	0
17669	17669	0	0	0	0
17670	17670	0	0	0	0
17671	17671	0	0	0	0
17672	17672	0	0	0	0
17673	17673	0	0	0	0
17674	17674	0	0	0	0
17675	17675	0	0	0	0
17676	17676	0	0	0	0
17677	17677	0	0	0	0
17678	17678	0	0	0	0
17679	17679	0	0	0	0
17680	17680	0	0	0	0
17681	17681	0	0	0	0
17682	17682	0	0	1	133
17683	17683	0	0	1	133
17684	17684	0	0	0	0
17685	17685	0	0	0	0

Рисунок 4.14. Файл с результатами оптических измерений

Файл содержит в себе следующие данные (таблица 4.6).

Таблица 4.6 Описание столбцов файла

<i>A</i>	номер кадра
<i>B</i>	флаг наличия первой лопасти в кадре (1 – да/0 – нет)
<i>C</i>	отклонение торца первой лопасти в пикселях от начала кадра
<i>D</i>	флаг наличия второй лопасти в кадре (1 – да/0 – нет)
<i>E</i>	отклонение торца второй лопасти в пикселях от начала кадра

**Модуль *StartRNK*.** Предназначен для комплексирования информации от двух каналов, вычисления коэффициентов модели пересчета тензометрических измерений в линейное отклонение торца лопасти. Настройки этой программы хранятся в файле *settingRNK.ini* (таблица 4.7).

Таблица 4.7. Описание параметров

Секция <i>RNK</i>	
<i>ZEROCAM</i>	уровень нуля в пикселях
<i>KOEFFCAM</i>	коэффициент для перевода отклонений торца лопасти из пикселей в миллиметры

Результат работы данной программы выводится в файл (рисунок 4.15) в корне директории эксперимента *result.csv* (Таблица 4.8).

4444	2.53572	0	0
4445	2.56791	0	0
4446	2.3014	0	0
4447	2.13796	0	0
4448	2.23706	0	0
4449	2.23706	0	0
4450	2.23706	0	0
4451	2.23706	0	0
4452	2.04143	0	0
4453	1.96788	0	0
4454	2.17273	0	0
4455	2.23433	0	0
4456	2.03221	1.95096	0.081248
4457	2.04143	0	0
4458	1.99734	0	0
4459	2.17	0	0
4460	2.17273	0	0
4461	2.20487	0	0
4462	2.04143	0	0
4463	1.96788	0	0
4464	1.96788	0	0

Рисунок 4.15. Файл с результатами

Файл содержит в себе следующие данные (таблица 4.8).

Таблица 4.8. Описание столбцов файла

<i>A</i>	комплексные измерения, мм
<i>B</i>	оптические измерения, мм
<i>C</i>	невязка между комплексными и оптическими измерениями, мм

### **4.3. Выводы**

1. Определены параметры аппаратных составляющих ПАК, обеспечивающие согласованную работу оптического и тензометрического каналов измерения;
2. Разработан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающего реализацию предложенных алгоритмов для оптического и тензометрического каналов измерения.

## 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

### 5.1. Оценка точности оптической системы на основе обработки изображений

Реализация оптических измерений, полученных высокоскоростной видеокамерой, позволяет оценить положения торца исследуемой лопасти в секторе, ограниченном полем зрения видеокамеры. В частности, на каждом обороте винта может быть получено по крайней мере одно измерение.

Представим оптические измерения положения торца лопасти случайной величиной с гауссовским законом распределения, со следующими характеристиками:  $m_{\Sigma_{oi}}$  – математическое ожидание,  $\sigma_{\Sigma_{oi}}$  – среднее квадратическое отклонение. Примем, что среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{\Sigma_{oi}}$  определяется в основном ошибками, связанными с неточным измерением положения торца лопасти на изображениях, и реальными отклонениями торца лопасти во время движения:

$$\sigma_{\Sigma_{oi}} = \sqrt{\sigma_{oi}^2 + \sigma_l^2}. \quad (5.1)$$

где  $\sigma_{oi}$  – среднее квадратическое отклонение измерения оптической системы,

$\sigma_l$  – среднее квадратическое отклонение торца лопасти.

Здесь размерности среднее квадратических отклонений приняты в миллиметрах.

Откуда из (5.1) получается  $\sigma_l$

$$\sigma_l = \sqrt{\sigma_{\Sigma_{oi}}^2 - \sigma_{oi}^2}. \quad (5.2)$$

Как было показано в разделе 3.4, оптические измерения положения торца лопасти основаны на выделении (обнаружении) изображения лопасти на отдельных

кадрах, определении положения торца лопасти сначала на изображении, а затем в выбранной пространственной системе координат. В случае правильного обнаружения лопасти ошибки измерений определяются ошибками в определении положения ее торца на изображении. На рисунке 5.1 представлен видеокадр, на котором выделен участок границы лопасти и фона.

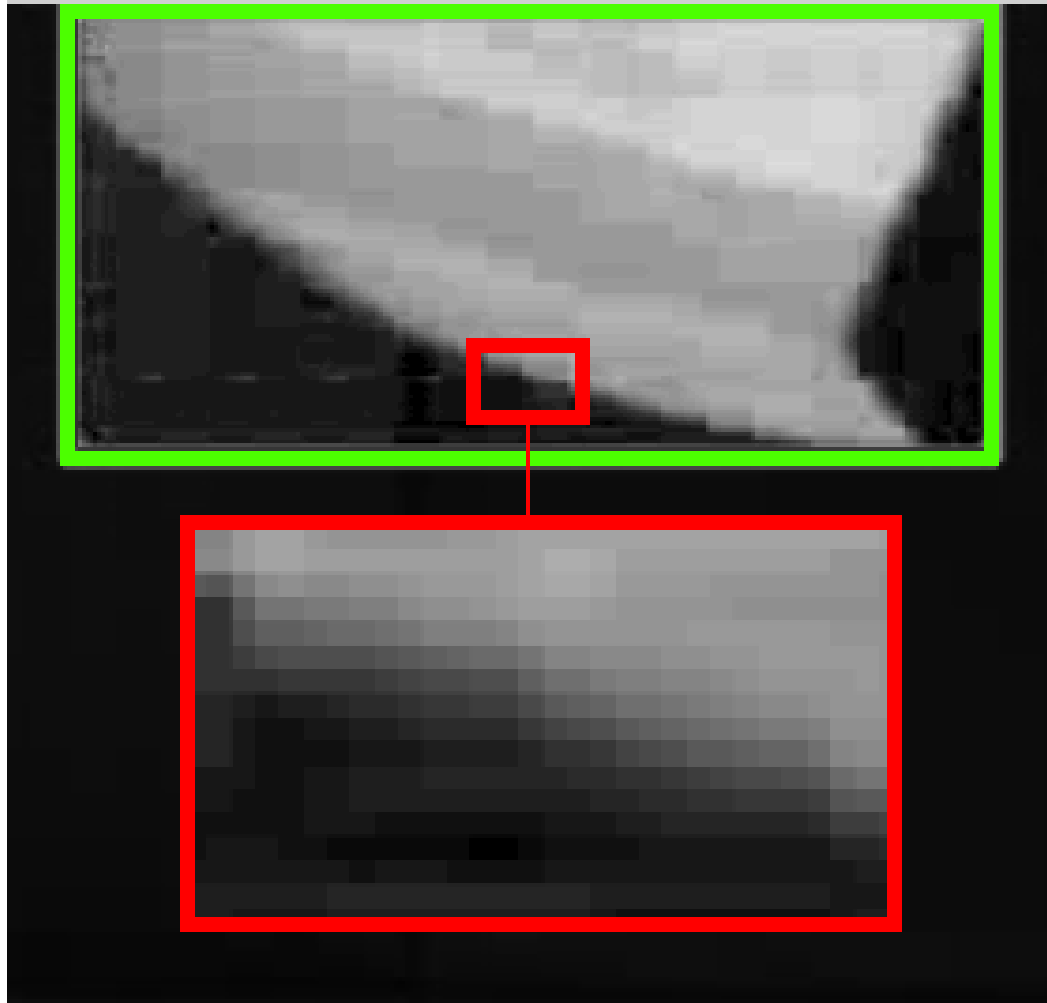


Рисунок 5.1. Увеличенный фрагмент границы лопасти и фона

Анализ выделенного фрагмента показывает, что основная проблема точного определения края (границы объекта) связана с размытием его яркости. Бинаризация изображения с различными порогами приводит к смещению координат положения границы, что затрудняет однозначное измерение положения торца. При этом область размытия также не является определенной, т. к. зависит от положения лопасти и условий освещенности. Для решения указанной проблемы предлагается выделить максимально возможную область размытия границы  $\Delta_{max}$  на изображениях и принять



$$6 \cdot \sigma'_{oi} = \Delta_{max} \quad (5.3)$$

Анализ серии кадров (50 кадров) с изображениями лопасти показал, что область размытия границы лопасти и фона составляет

$$\Delta_{max} \leq 5 \text{ пикселей}, \quad (5.4)$$

откуда значение среднеквадратического отклонения (без учета калибровки видеокамеры)

$$\sigma'_{oi} \leq 0,8 \text{ пикселя}. \quad (5.5)$$

Для оценки реального среднеквадратического отклонения в миллиметрах необходимо учитывать результаты калибровки измерений.

С учетом калибровки [разд.3] получим искомое значение  $\sigma_{oi}$  (мм):

$$\sigma_{oi} = \sigma'_{oi} \cdot k_c = 0,8 \cdot 0,716 = 0,5 \text{ мм}, \quad (5.6)$$

где  $k_c = 0,716$  – коэффициент перевода отклонений лопасти из пикселей в миллиметры, полученный экспериментально.

## 5.2. Оценка подобия траекторий движения лопастей

В процессе исследований было высказано предположение, что две однотипные лопасти, установленные на одном винте, должны иметь сходные траектории движения (в направлении, параллельном оси винта) на любом из возможных режимов работы на экспериментальной установке. Проверка этого предположения позволит подтвердить надежность получаемых оценок положения лопасти с помощью оптического канала измерений. Таким образом, цель экспериментов – проверка адекватности оптических измерений и оценка устойчивости результатов. Суть экспериментальных исследований состоит в измерении и сопоставлении положений торцов двух 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 отличаются длительностью и количеством участков с разным шагом лопастей.

*Эксперимент № 1.* На рисунках 5.2 и 5.3 представлены графики отклонений торцов лопастей № 1 и № 2. На горизонтальной оси находится номер измерения (измерение проводится с шагом в 5 миллисекунд).

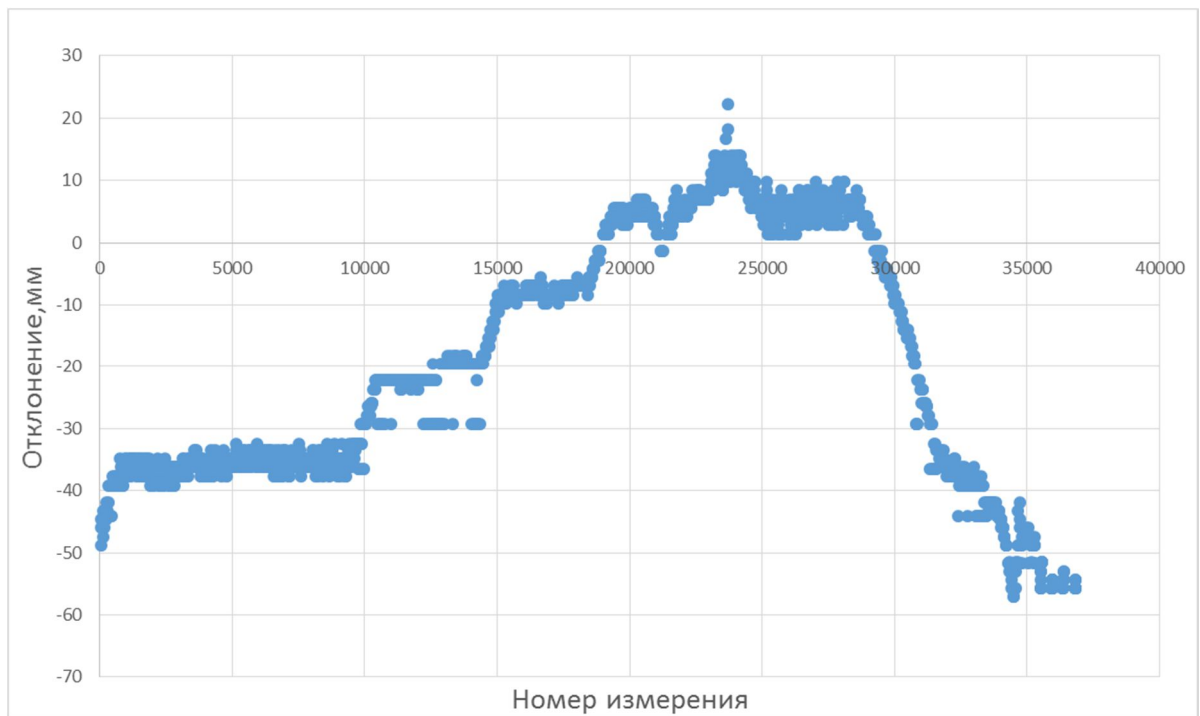


Рисунок 5.2. График отклонений торца лопасти № 1 (с тензометрическими датчиками)

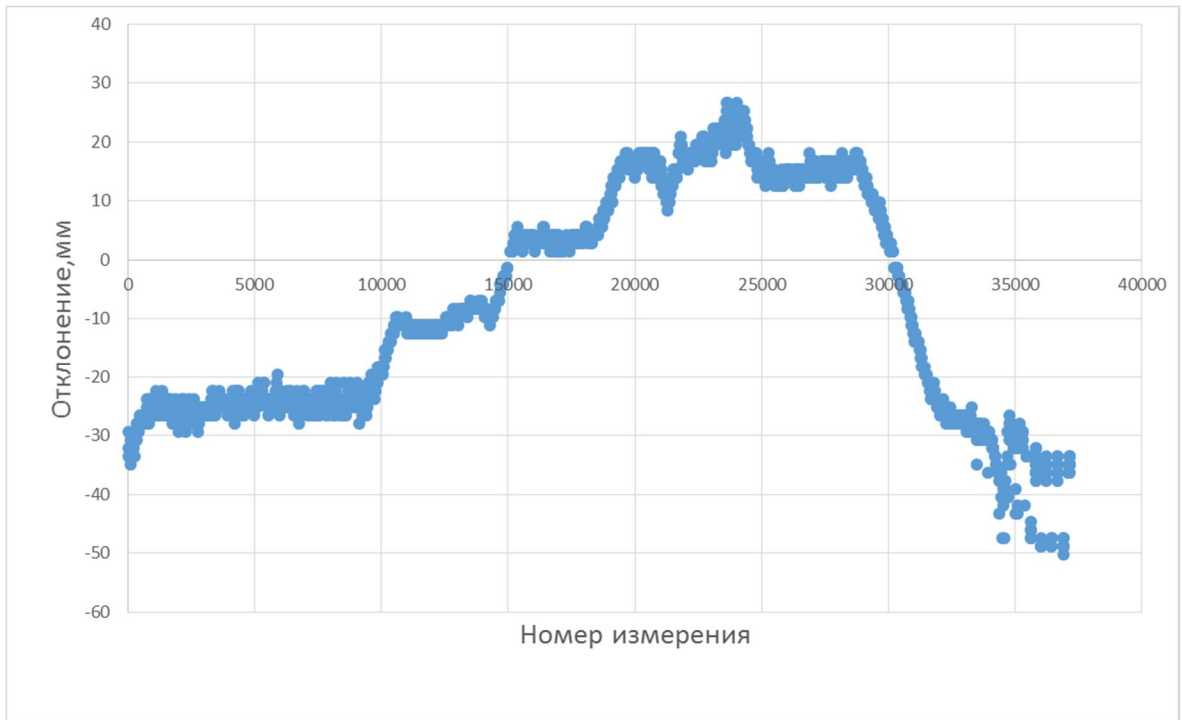


Рисунок 5.3. График отклонений торца лопасти № 2 (без тензометрических датчиков)

**Эксперимент 2.** На рисунках 5.4 и 5.5 представлены графики отклонений торцов лопастей № 1 и № 2.

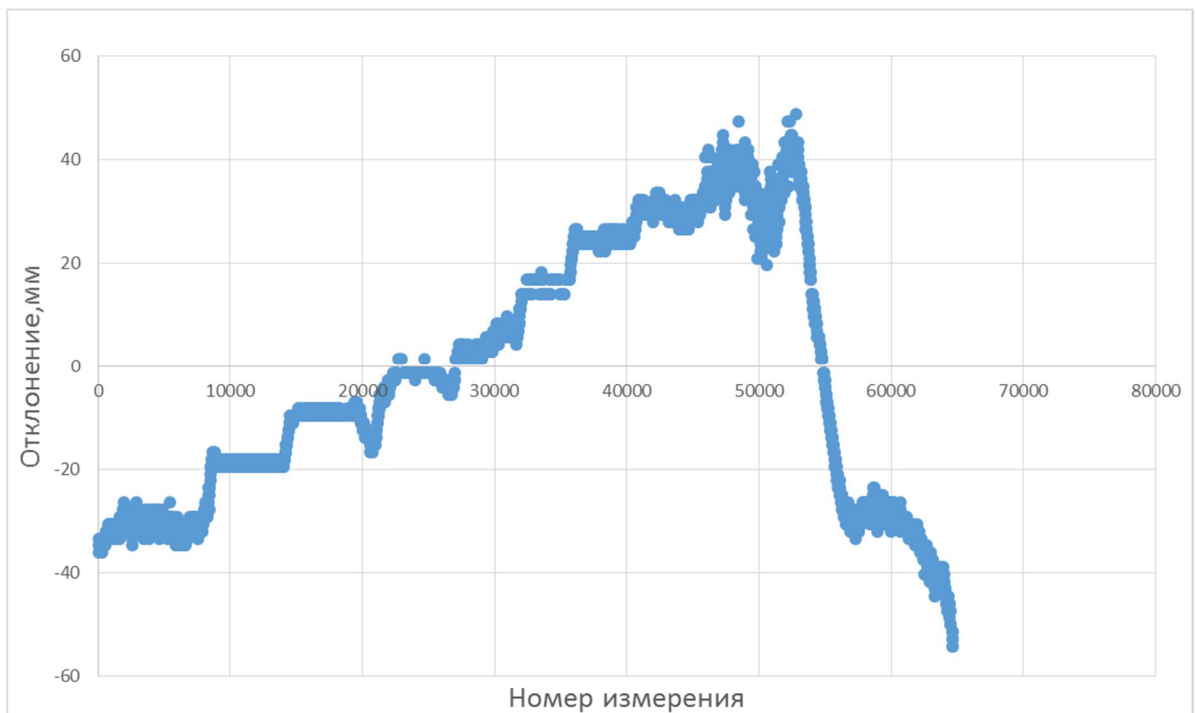


Рисунок 5.4. График отклонений торца лопасти № 1 (с тензометрическими датчиками)

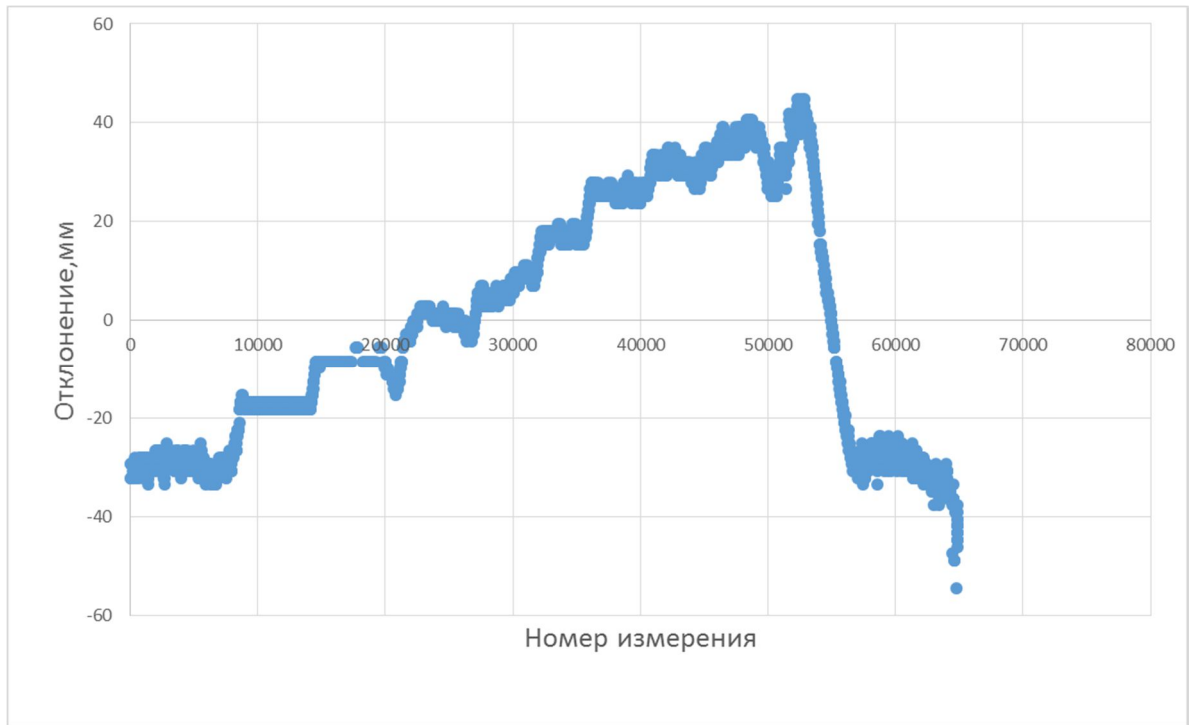


Рисунок 5.5. График отклонений торца лопасти № 2 (без тензометрических датчиков)

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

Для эксперимента № 1 эти данные представлены в таблице 5.1 (количество измерений 37000), для эксперимента № 2 – в таблице 5.2 (количество измерений 65000).

Таблица 5.1. МО и СКО на участках (эксперимент № 1)

Диапазон измерений	Тяга, кг	МО, мм		СКО, мм	
		Лопасть № 1	Лопасть № 2	Лопасть № 1	Лопасть № 2
6000-7000	0	-35,31	-31,47	1,13	1,38
14000-15000	16	-19,93	-15,47	0,98	0,77
18000-19000	35	-7,85	-3,73	0,76	0,9
22000-23000	56	5,13	9,64	1,03	1,28
28000-29000	60	6,17	8,33	1,96	1,08

Таблица 5.2. МО и СКО на участках (эксперимент № 2)

Диапазон измерений (шаг измерения 5 мс.)	Тяга, кг	МО, мм		СКО, мм	
		Лопасть № 1	Лопасть № 2	Лопасть № 1	Лопасть № 2
4000-5000	0	-30,09	-28,71	1,37	1,31
11000-12000	27	-18,63	-17,24	0,68	0,66
16000-18000	50	-9,29	-8,39	0,68	0,61
23000-24000	72	-1,28	1,31	0,55	0,74
28000-29000	94	2,47	4,53	0,84	1,11
33000-34000	121	11,04	12,17	1,44	0,97
39000-40000	144	24,72	26,05	0,99	1,07
44000-45000	162	28,4	29,49	1,46	0,99

На рисунках 5.6 и 5.7 представлены графики зависимости МО отклонения торца лопасти на участках (приведенных в таблицах 5.1 и 5.2 соответственно) от тяги для двух экспериментов.

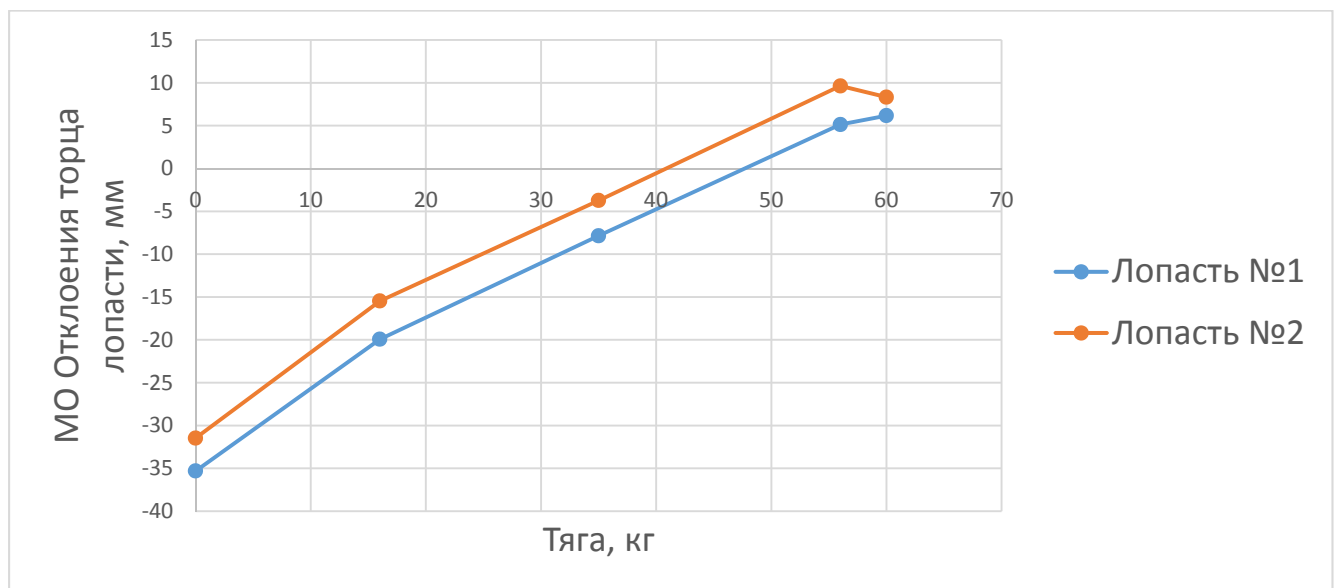


Рисунок 5.6. Эксперимент № 1

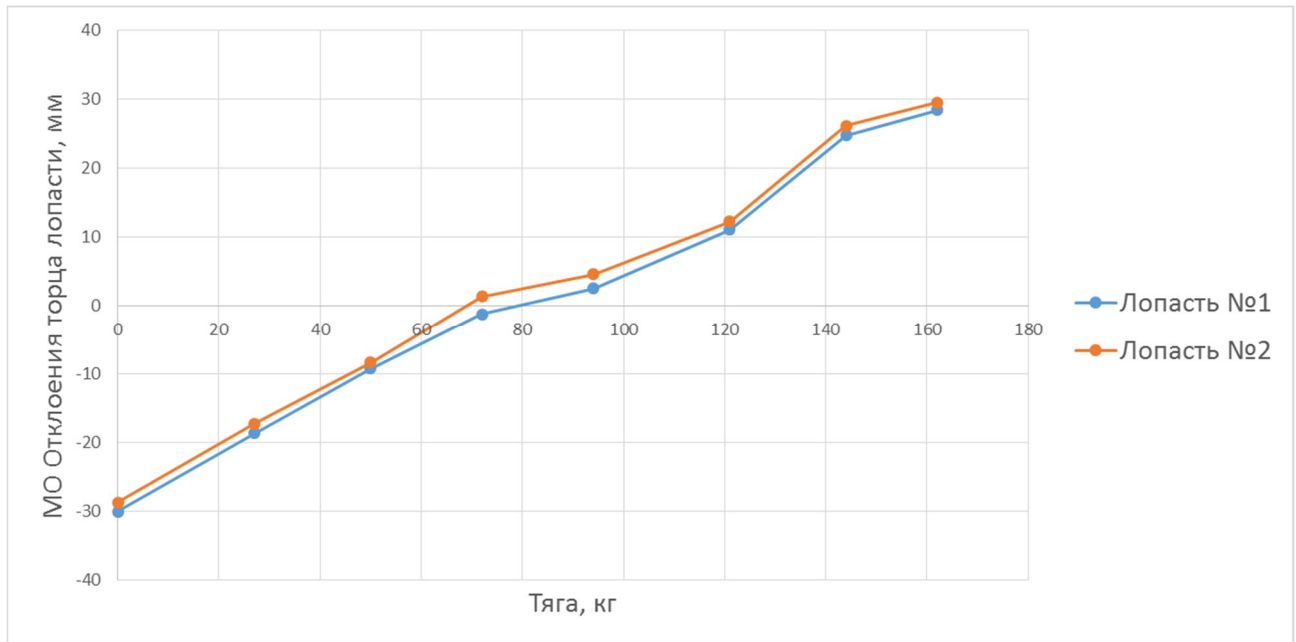


Рисунок 5.7. Эксперимент № 2

На рисунках 5.8 и 5.9 представлены графики зависимости СКО отклонения торца лопасти на участках (приведенных в таблицах 5.1 и 5.2 соответственно) от тяги для двух экспериментов.

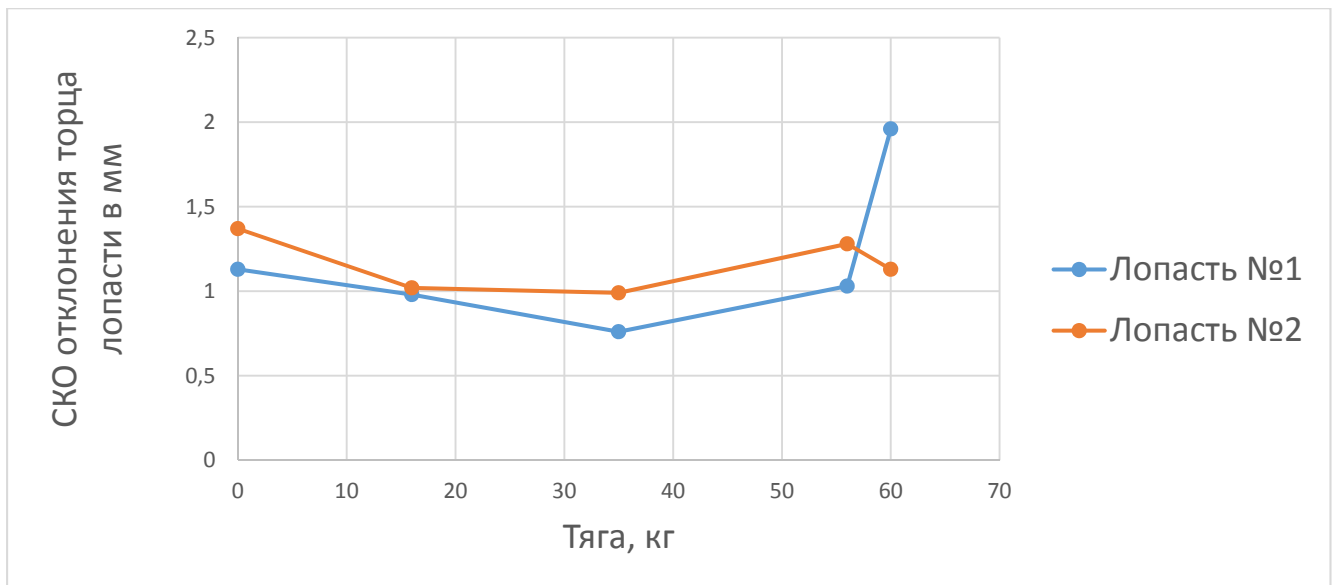


Рисунок 5.8. Эксперимент № 1

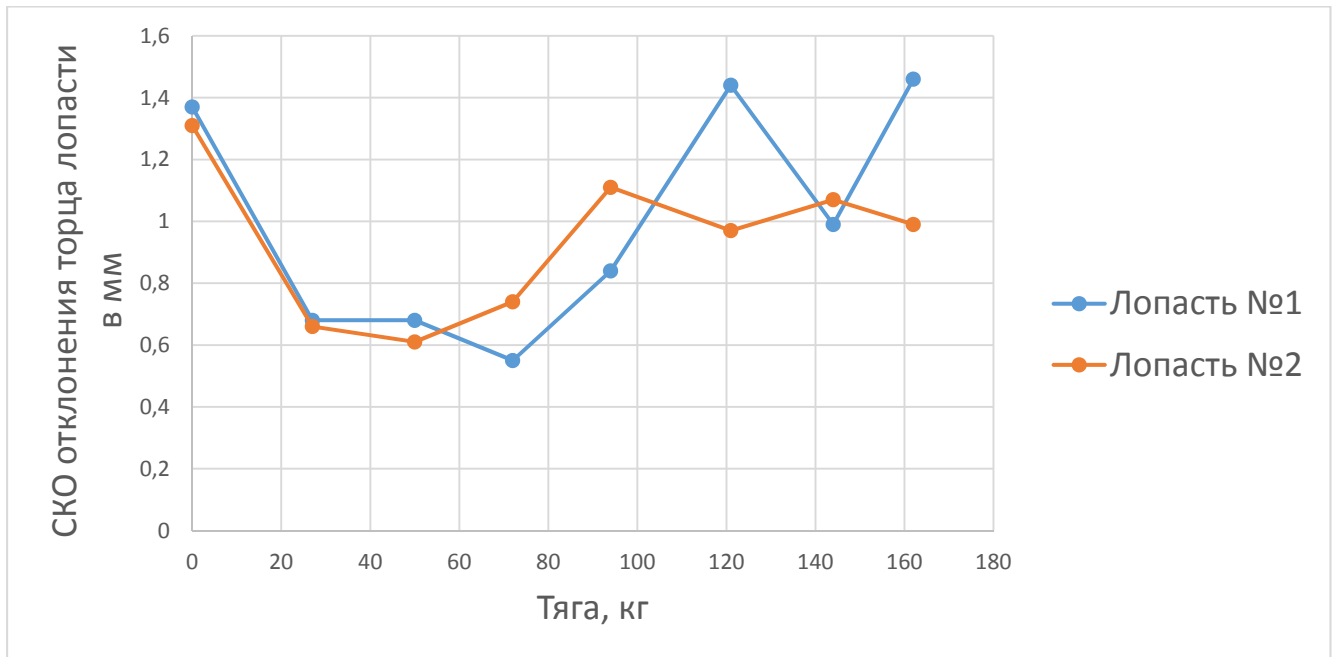


Рисунок 5.9. Эксперимент № 2

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Характер траекторий движения лопастей № 1 и № 2 (рисунки 5.6 и 5.7) 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. Отличие 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.

### 5.3. Комплексные измерения

Реализация комплексных (оптических и тензометрических) измерений должна обеспечивать выполнение поставленных требований [разд. 1.1] в части частоты, точности, диапазона измерений, а также системы координат.

Цель данных экспериментов – оценка работоспособности разработанной двухканальной системы измерений, а также сопоставление 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.

Основные решаемые задачи: расчет коэффициентов модели пересчета (1.11) на основе оптических измерений и получение измерения отклонения торца лопасти (комплексные измерения), основанных на пересчете тензометрических измерений [разд. 1.4].

На рисунке 5.10 представлен фрагмент схемы получения комплексных измерений.



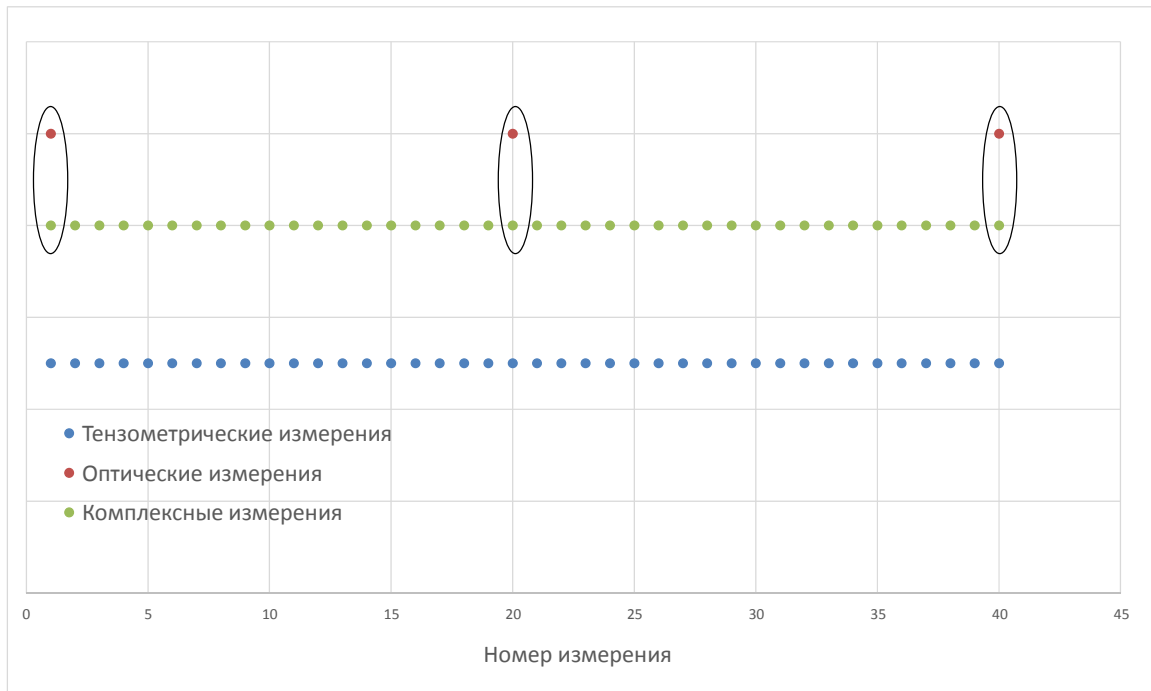


Рисунок 5.10. Схема получения комплексных измерений

Нижний ряд (синие точки) соответствует тензометрическим измерениям (20 измерений на каждый оборот винта) деформаций лопасти в соответствующие моменты времени.

Верхний ряд (оранжевые точки) обозначает оптические измерения (как минимум одно измерение на каждом обороте). Здесь на основе обработки и анализа изображений проводится измерение положения лопасти в искомой системе координат вертолета.

После пересчета тензометрических измерений с учетом результатов оптических измерений получают значения комплексных измерений (в системе координат вертолета) во всем диапазоне тензометрических измерений (средний ряд точек).

На рисунках 5.11 и 5.12 приведены графики тензометрических измерений для четырех тензометрических датчиков для экспериментов № 1 и № 2. Нумерация датчиков начинается от кончика лопасти. На горизонтальной оси находится номер измерения (измерение проводится с шагом в 5 миллисекунд).

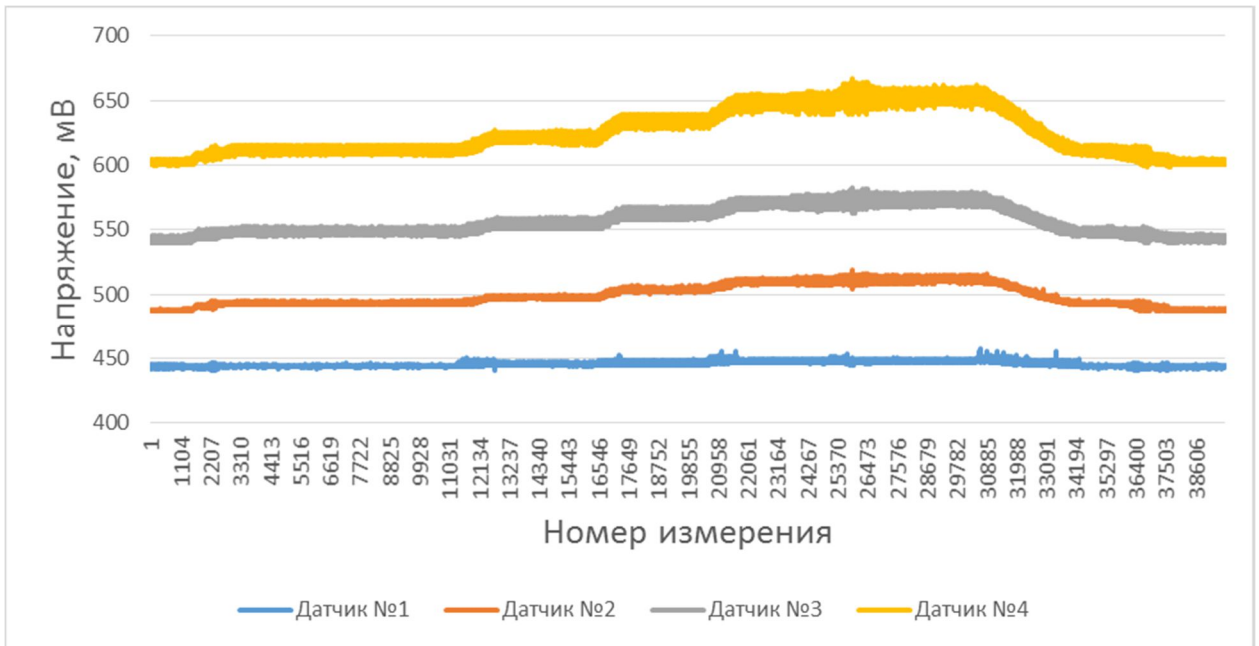


Рисунок 5.11. Измерения тензометрической системы (эксперимент № 1)

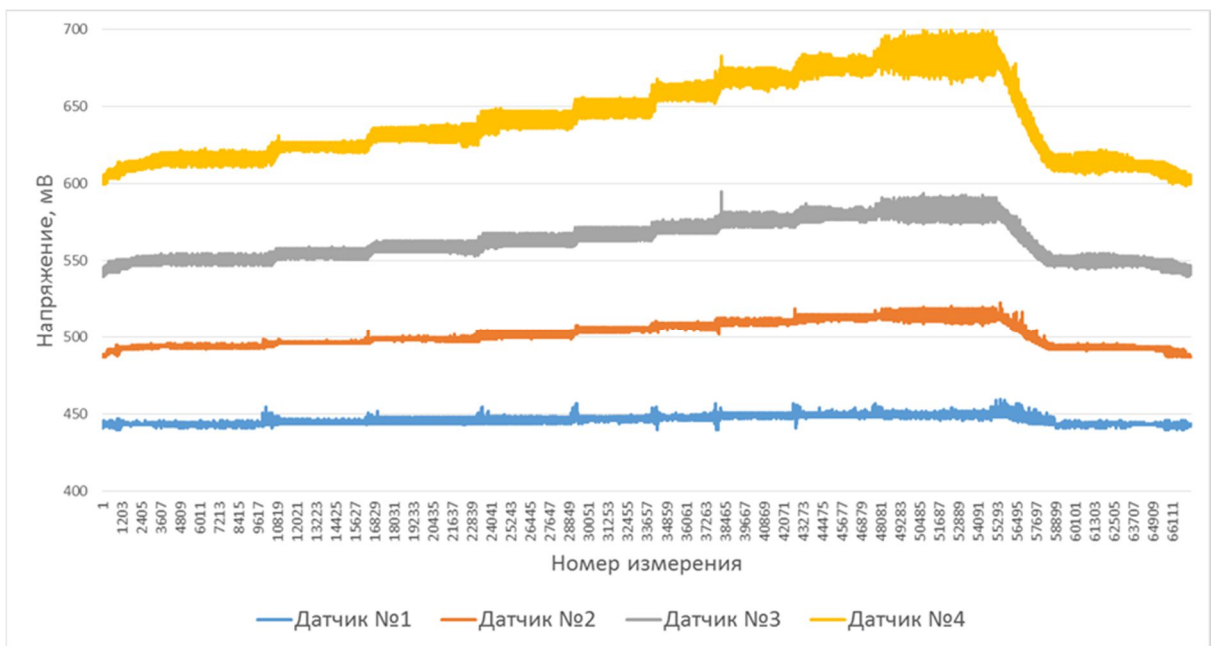


Рисунок 5.12. Измерения тензометрической системы (эксперимент № 2)

Были выбраны несколько участков с постоянным режимом работы винта (шаг лопастей, частота оборотов) и рассчитаны математические ожидания (МО) и среднеквадратические отклонения (СКО) для каждого участка (таблица 5.3 и 5.4) для каждого из экспериментов. Эксперимент № 1 содержит 5 участков, эксперимент № 2 – 9 участков.

Таблица 5.3. МО и СКО на участках (эксперимент № 1)

Диапазон измерений (шаг измерения 5 мс.)	Тяга, кг	МО, мВ				СКО, мВ			
		1 датчик	2 датчик	3 датчик	4 датчик	1 датчик	2 датчик	3 датчик	4 датчик
8500-9500	0	443	493	547	612	0,51	0,71	1,39	1,81
14000-15000	16	444	497	553	622	0,83	0,99	2,15	1,88
18000-19000	35	445	503	561	635	0,92	1,06	2,15	2,69
23000-24000	56	447	509	569	649	0,75	1,35	2,24	3,07
27000-28000	60	447	511	571	653	0,68	1,57	2,61	3,58

Таблица 5.4. МО и СКО на участках (эксперимент № 2)

Диапазон измерений (шаг измерения 5 мс.)	Тяга, кг	МО, мВ				СКО, мВ			
		1 датчик	2 датчик	3 датчик	4 датчик	1 датчик	2 датчик	3 датчик	4 датчик
6000-7000	0	443	494	549	617	0,64	0,56	1,58	2,07
13000-14000	27	444	496	553	625	0,74	0,47	1,65	1,43
20000-21000	50	445	499	557	633	1,03	0,51	1,75	2,26
26000-27000	72	446	502	561	641	1,04	1,04	1,93	2,66
31000-32000	94	447	504	566	650	0,78	0,75	2,27	3,02
36000-37000	121	447	507	570	660	0,58	0,91	2,01	2,77
40000-41000	144	448	510	575	669	0,82	0,99	1,91	2,75
45000-46000	162	449	513	579	677	1,01	0,73	1,54	2,09
50000-51000	176	449	514	582	683	1,11	2,47	3,71	6,72

На рисунке 5.13 и 5.14 представлены графики оптических измерений положений торца лопасти, на которой расположены тензометрические датчики для обоих экспериментов. На горизонтальной оси находится номер измерения (измерение проводится с шагом в 5 миллисекунд).

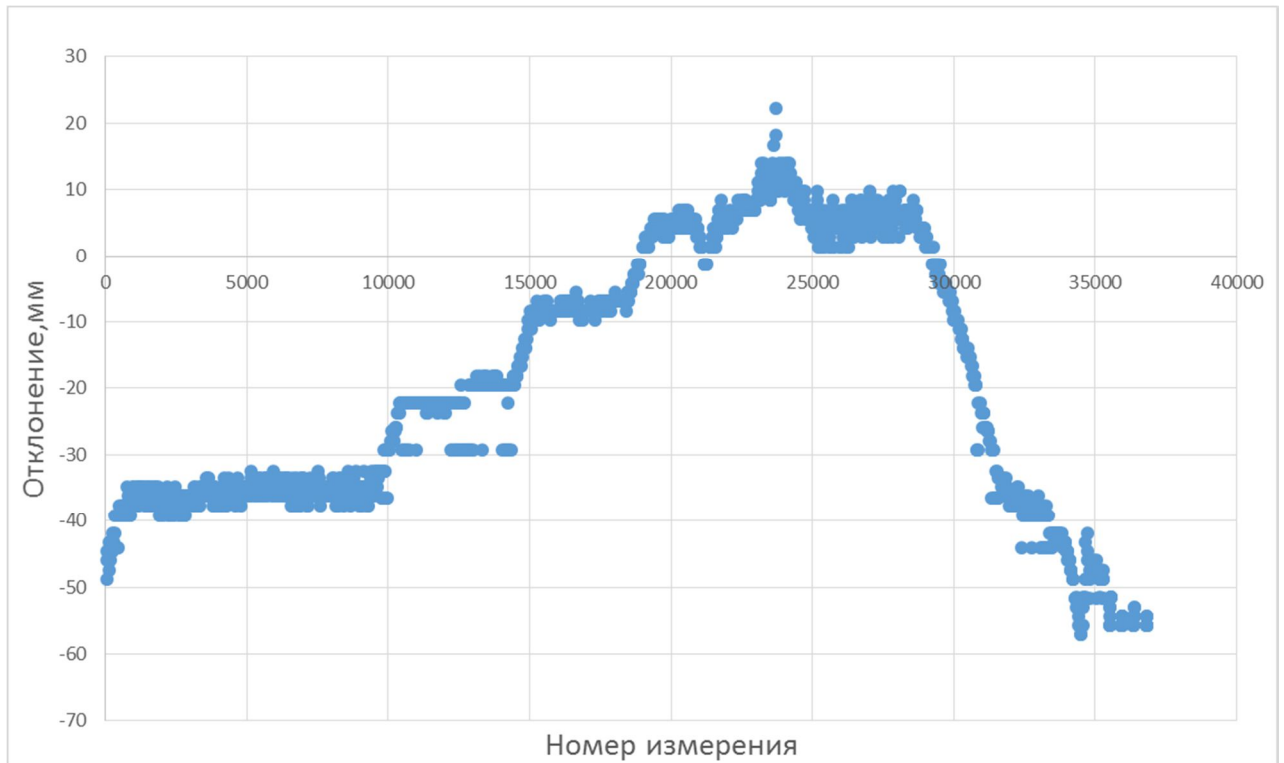


Рисунок 5.13. Измерения оптической системы (эксперимент № 1)

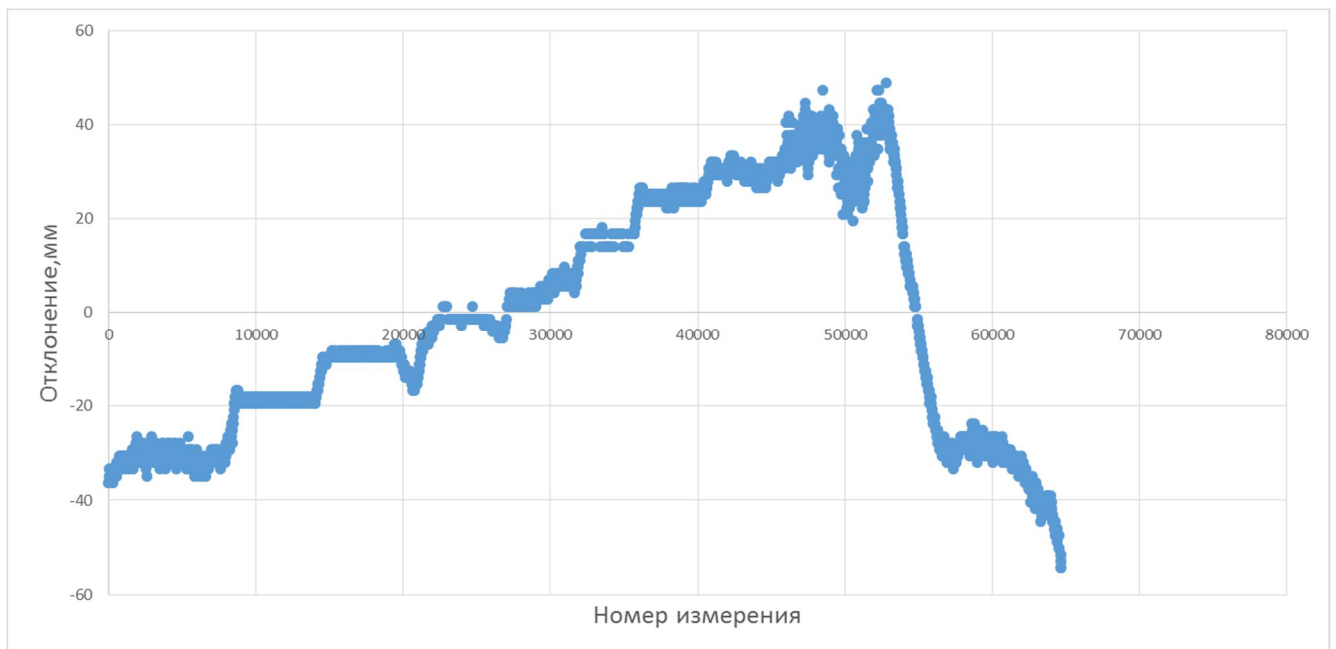


Рисунок 5.14. Измерения оптической системы (эксперимент № 2)

Были выбраны аналогичные участки с постоянным режимом работы винта (шаг лопастей, частота оборотов) и определены МО и СКО для каждого участка (таблица 5.5 и 5.6).

Таблица 5.5. МО и СКО на участках (эксперимент № 1)

Диапазон измерений (шаг измерения 5 мс.)	Тяга, кг	МО, мм	СКО, мм
6000-7000	0	-35,31	1,13
14000-15000	16	-19,93	0,98
18000-19000	35	-7,85	0,76
22000-23000	56	5,13	1,03
28000-29000	60	6,17	1,96

Таблица 5.6. МО и СКО на участках (эксперимент № 2)

Диапазон (шаг измерения 5 мс.)	Тяга, кг	МО, мм	СКО, мм
4000-5000	0	-30,09	1,37
11000-12000	27	-18,63	0,68
16000-18000	50	-9,29	0,68
23000-24000	72	-1,28	0,55
28000-29000	94	2,47	0,84
33000-34000	121	11,04	1,44
39000-40000	144	24,72	0,99
44000-45000	162	28,4	1,46

Используя методику комплексирования [разд. 1.4], были вычислены коэффициенты модели пересчета. Результаты расчетов приведены в таблицах 5.7 и 5.8.

Таблица 5.7. Значения коэффициентов (эксперимент № 1)

$x_0$	-128,881
$x_1$	-0,029
$x_2$	-0.247
$x_3$	0.025
$x_4$	-0.0065

Таблица 5.8. Значения коэффициентов (эксперимент № 2)

$x_0$	-115.449
$x_1$	-0.099
$x_2$	-0.021
$x_3$	-0.034
$x_4$	-0.062

На рисунках 5.15 и 5.16 представлены графики комплексных измерений положения торца лопасти. На горизонтальной оси находится номер измерения (измерение проводится с шагом в 5 миллисекунд).

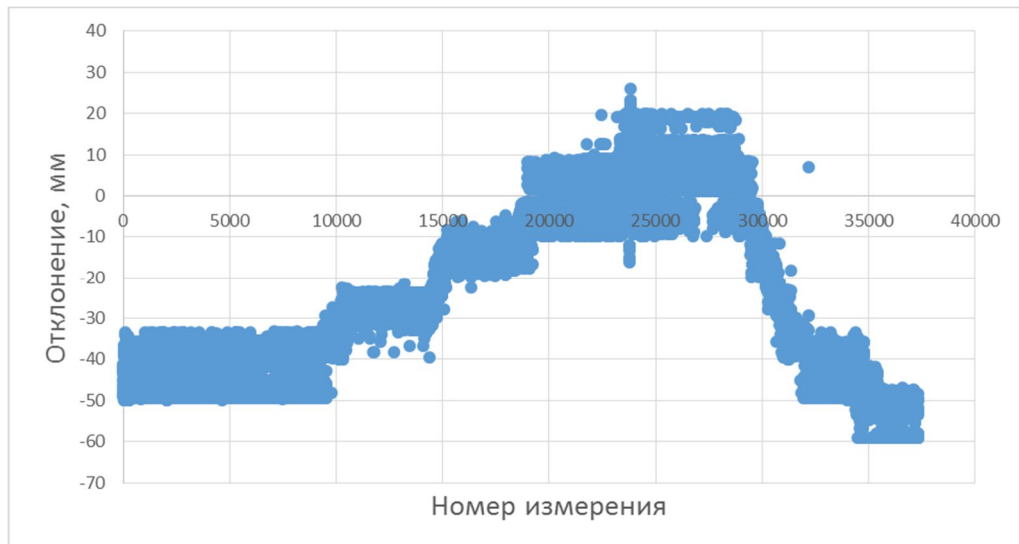
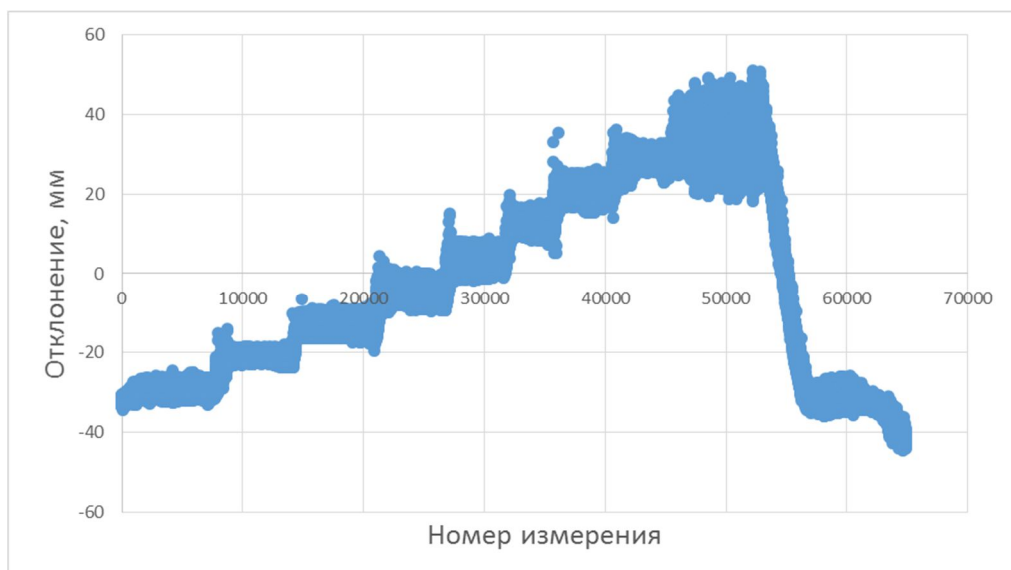


Рисунок 5.15. Комплексные измерения (эксперимент № 1)



## Рисунок 5.16. Комплексные измерения (эксперимент № 2)

Были выбраны участки с постоянным режимом работы винта (шаг лопастей, частота оборотов) и определены МО и СКО для каждого участка (таблица 5.9 и 5.10).

Таблица 5.9. МО и СКО на участках (эксперимент № 1)

Диапазон измерений (шаг измерения 5 мс.)	Тяга, кг	МО, мм	СКО, мм
6000-7000	0	-38,09	3,42
14000-15000	16	-27,35	2,88
18000-19000	35	-13,77	2,48
22000-23000	56	1,03	4,27
28000-29000	60	6,02	3,68

Таблица 5.10. МО и СКО на участках (эксперимент № 2)

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

На рисунках 5.17 и 5.18 приведены графики СКО комплексных измерений на выбранных участках для экспериментов № 1 и № 2.

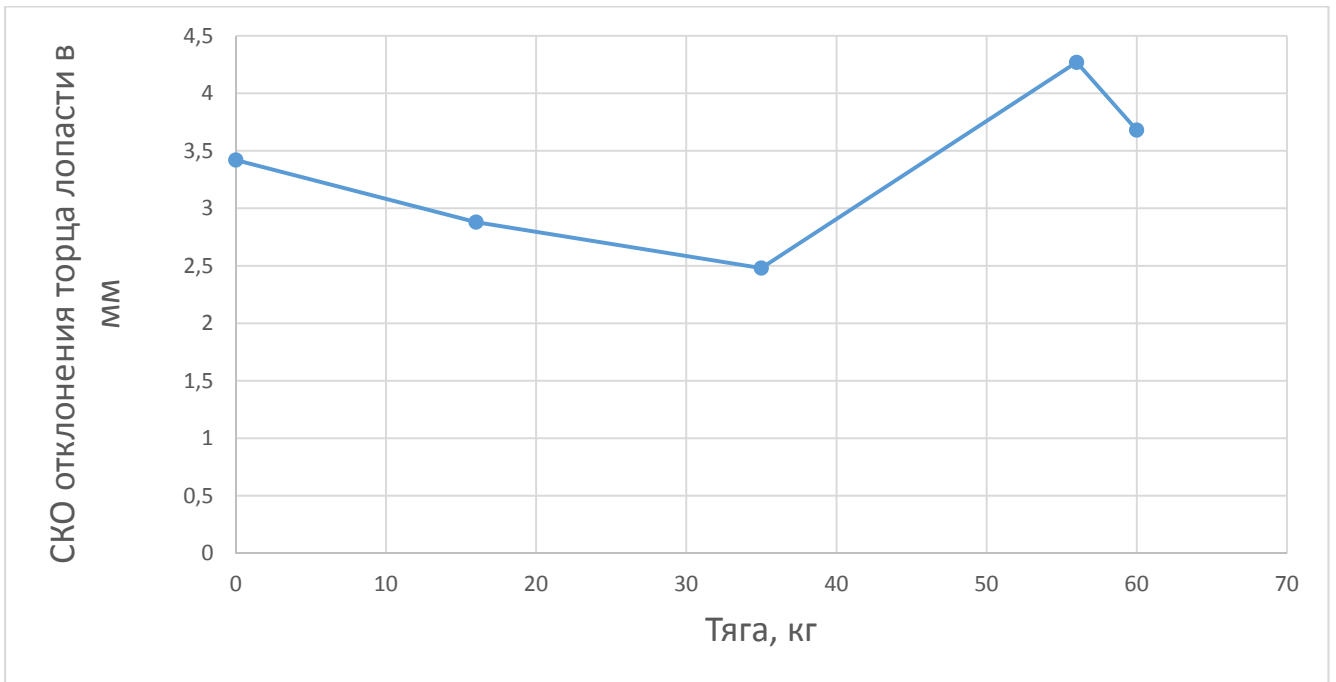


Рисунок 5.17. Эксперимент № 1

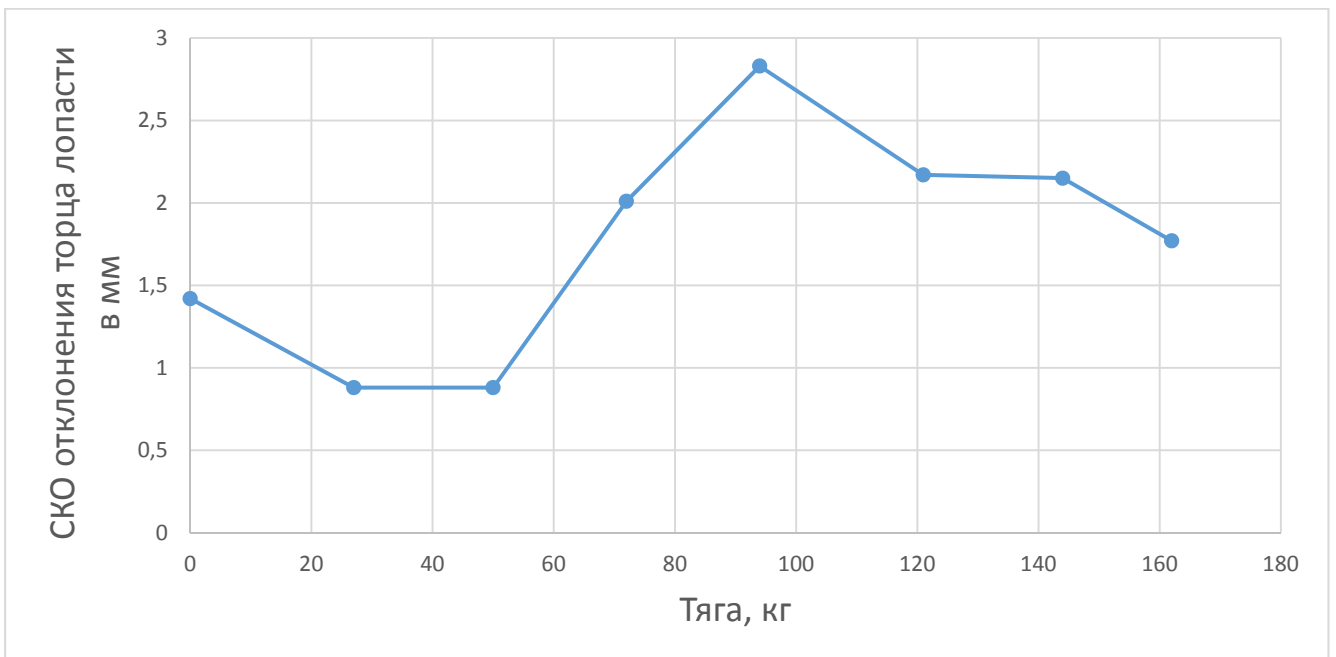


Рисунок 5.18. Эксперимент № 2

Анализируя данные из таблиц с тензометрическими измерениями (таблицы 5.3, 5.4) и с оптическими (таблицы 5.5, 5.6) измерениями можно сделать вывод, что для этих экспериментов присутствует некоторый разброс измерений для участков с постоянным режимом работы винта, что видно по СКО. Это объясняется погрешностью измерений и собственными колебаниями торца лопасти.



СКО на участках с постоянным режимом работы винта у комплексных измерений (график 5.17 и 5.18) удовлетворяет поставленным требованиям к задаче.

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

$$|\Delta_{\max}| \leq 3 \cdot \sigma_{mp} = 30 \text{ мм.} \quad (5.7)$$

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

$$|\Delta_{\max}| = \max(y_{\text{компл}} - y_{\text{опт}}) \quad (5.8)$$

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

Адекватность выбранной модели подтверждают графики 5.19 и 5.20. На горизонтальной оси находятся комплексные измерения, на вертикальной оси – оптические измерения. Принимая, 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 рисунках 5.19 и 5.20.

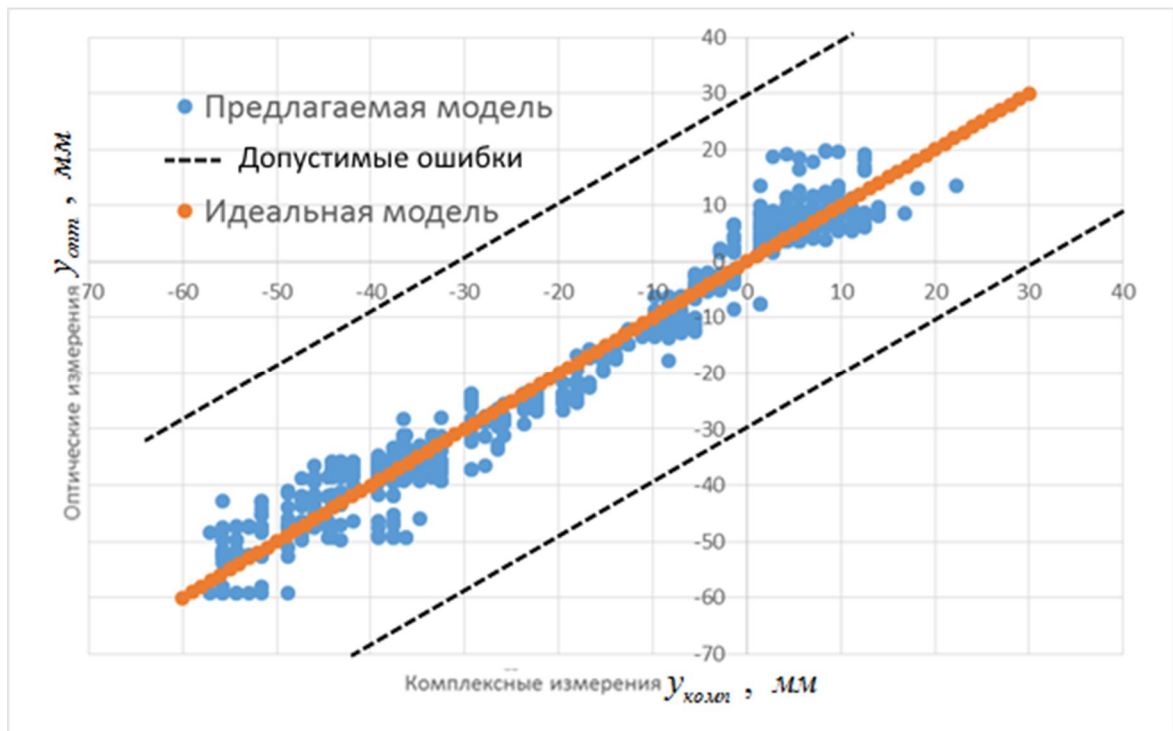


Рисунок 5.19. Эксперимент № 1

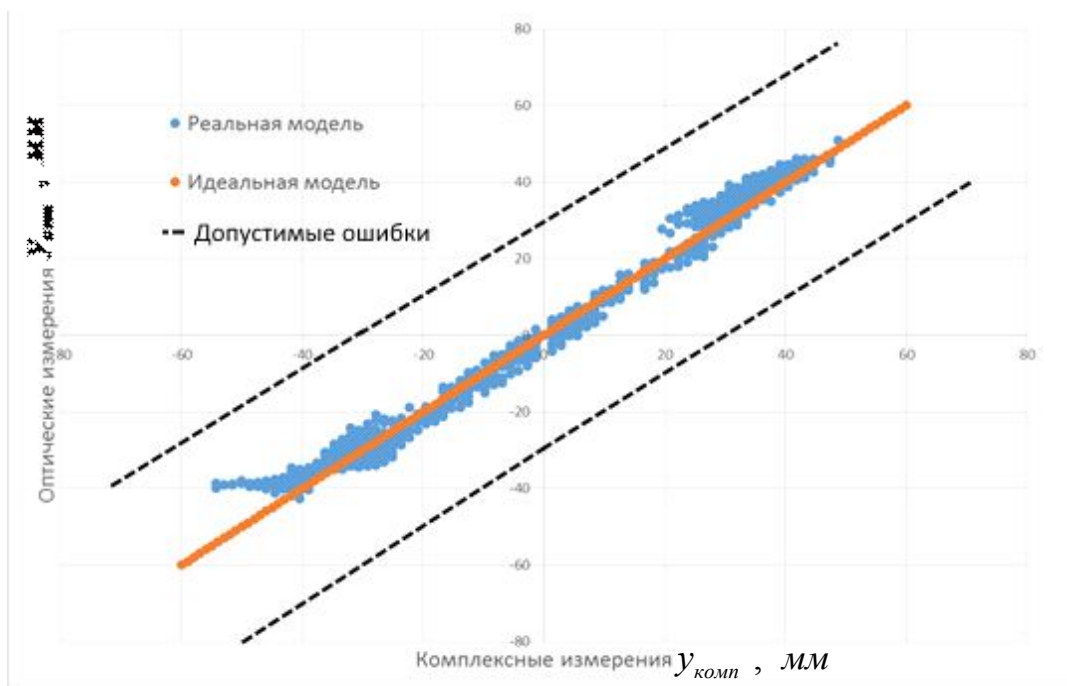


Рисунок 5.20. Эксперимент № 2

На графиках видно, что реальные значения комплексных измерений качественно соответствуют оптическим измерениям. Таким образом, предлагаемая модель во всем диапазоне отклонений торца лопасти близка к идеальной модели.

**Невязка между оптическими и комплексными измерениями.** На графиках 5.21 и 5.22 представлены невязки между комплексными и

соответствующими им по времени оптическими измерениями (рисунок 5.10) для экспериментов № 1 и № 2 соответственно.

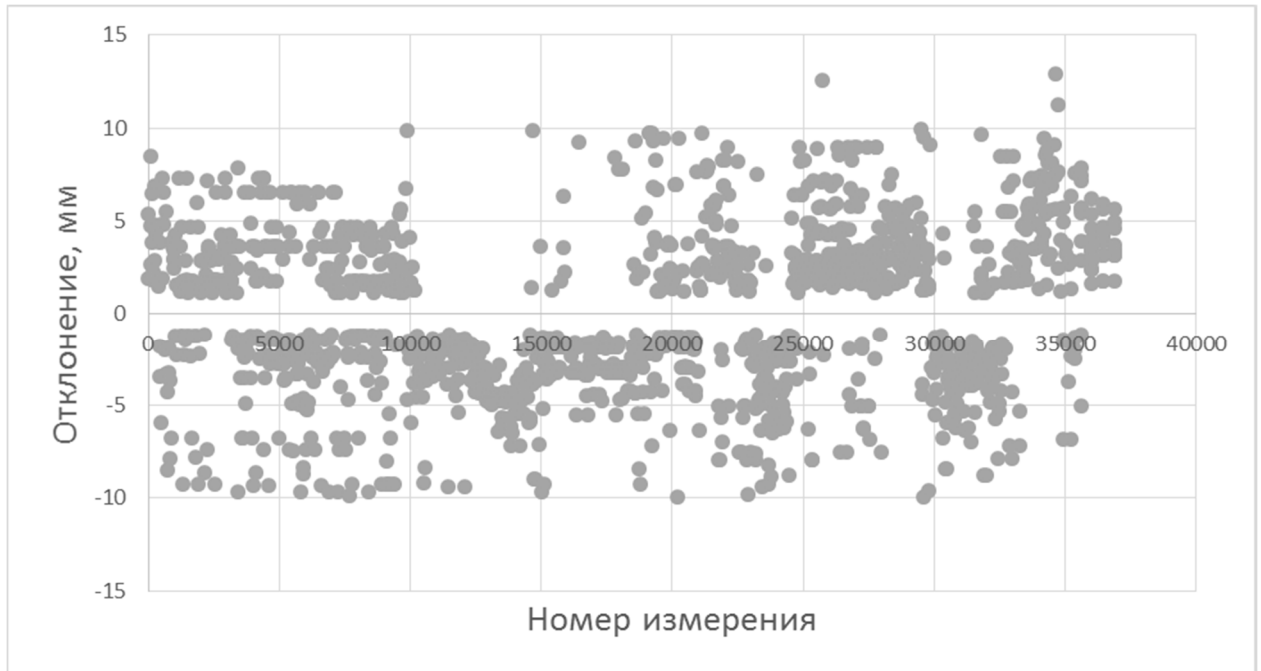


Рисунок 5.21. График невязки (эксперимент № 1)

Математическое ожидание невязки составляет 0,15 мм, среднеквадратическое отклонение 2,81 мм.

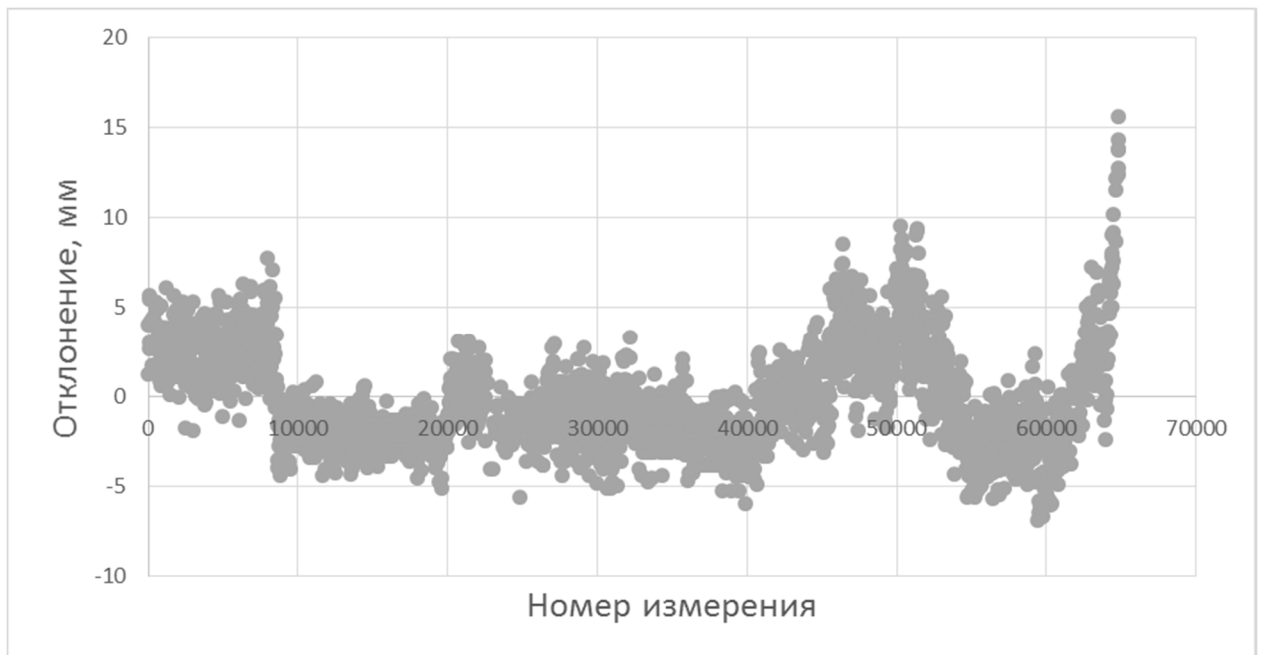


Рисунок 5.22. График невязки (эксперимент № 2)

Математическое ожидание невязки составляет 0,13 мм, среднеквадратическое отклонение 4,28 мм.

#### 5.4. Выводы

В результате проведенных исследований полученные результаты экспериментальных исследований подтвердили физическую реализуемость измерений и их соответствие следующим требованиям к комплексной системе измерений:

- частоту измерений  $f = 200 \text{ 1/с}$ ;
- измерения (в системе координат вертолета) на всем круговом диапазоне (0 - 360°) положения лопасти;
- среднеквадратическую ошибку измерений  $\sigma \leq 10 \text{ мм}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса двухканальной системы измерений (оптический и тензометрический каналы) обеспечиваются измерения положения торца лопасти:
  - с частотой измерений  $f \leq 200 \text{ 1/c}$ ;
  - 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 [разд. 1.3] 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривцов, В.С. Проектирование вертолетов [Текст]: учебник / В.С. Кривцов, Я.С. Карпов, Л.И. Лосев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003, – 344 с.
2. Володько, А.М. Вертолет в особой ситуации [Текст] / А.М. Володько. – М.: Транспорт, 1992. – 262 с.
3. Володько, А.М. Основы летной эксплуатации вертолетов. Динамика полета [Текст]: учебник / А.М. Володько. – М.: Транспорт, 1986. – 263 с.
4. А.И. Данилин, С.В. Жуков, Оптоэлектронные системы определения деформационного состояния несущего винта вертолета // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. №4(5). С. 57-62
5. Advanced Technologies in Failure Prevention: Proceedings of the 43rd Meeting of the Mechanical Failures Prevention Group, T. Robert Shives (Editor), Cambridge University Press, 1991
6. M.B. Walter, Mechanical diagnostics-past, present and future, AUTOTESTCON '90. IEEE Systems Readiness Technology Conference, 1990
7. Bosnyakov S., Kulesh V., Morozov A. [et al.]. Videogrammetric system for study of deformation of real-scaled helicopter rotor blades // SPIE 0277-786X/99. — 1999. — V. 3516, Part 1. — P. 196–209.
8. Иншаков, И.С., Исследование движения лопасти натурного винта вертолета в наземных испытаниях и в полете, Тезисы 52-ой научной конференции МФТИ, 2009, 38-39 с
9. Кузнецов А.М. Устройство для измерения координат лопастей вращающегося несущего винта вертолета: Пат. 2180122 (РФ). 2002

10. Борисов Ю.А., Левко Г.В., Муравьев А.Ю. Способ измерения несоконусности лопастей несущего винта вертолета и устройство для его осуществления: Пат. 2415053 (РФ). 2009.
11. Устройство «Оптикон» // all-pribors.ru: [Сайт]. URL: [www.all-pribors.ru/opisanie/47917-11-optikon-50679](http://www.all-pribors.ru/opisanie/47917-11-optikon-50679) (дата обращения 14.06.2017).
12. Maxwell R.H. Optical tracker system for determining the position of a rotating body: Patent US 5929431A. 1999
13. Simpkins W., Wilson J., Dorris D. Systems and Methods of Tracking Rotor Blades: Patent US 20140064966A1. 2014
14. Christopher I.M. Position detector: Patent EP0112031B1. 1987
15. Завальнюк О.Т., Майоров М.А., Автоматическая телевизионная система измерения степени отклонения вращающихся лопастей вертолетов, Тезисы докладов X юбилейного международного форума «Оптические системы и технологии - OPTICS-EXPO 2014, 2014 г.
16. Якеменко Г.В., Селеменев С.В., Михеев С. В., Карцев Ю.А. Система измерения сближения лопастей соосного вертолета: Пат. 57241 (РФ). 2006
17. Nagy P.B., Greguss P. Helicopter blade tracking by laser light / Optics and laser technology. 1982. December. P. 299-302
18. Wireless fiber optic sensor system for strain and pressure measurements on a rotor blade / Y. Liu, A. Lacher, G. Wang, A. Purekar, M. Yua // Fiber Optic Sensors and Applications V. 2007.P. 145-156
19. An optoelectronic system for the in-flight measurement of helicopter rotor blades motions and strains / H. Youwei, C. Weizhen, L. Yan, L. Wanxin // Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications II. 2012.P. 314-320
20. Теоретические основы информационной техники [Текст]: Ф.Е. Темников [и др.]. – М., Энергия, 1971, 423 с.: ил.
21. Котюк, А.Ф. Датчики в современных измерениях [Текст] // Массовая радиобиблиотека / А.Ф. Котюк – М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006. – Вып. 1277 – 96 с.: ил.

22. Немец, И. Практическое применение тензорезисторов [Текст] / И. Немец. – М., Энергия, 1970. – 144 с.: ил.
23. Клокова, Н.П. Тензорезисторы: теория, методики расчета, разработки [Текст] / Н.П. Клокова. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.: ил.
24. Instrumentation and Measurement / ed. by A.D. Stephen. – Wiley-IEEE Press, New York, 2004. – 1112 p.
25. Фрайден, Дж. Современный датчики [Текст]: справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
26. Михеев, В.П. Датчики и детекторы [Текст]: учебное пособие / В.П. Михеев, А.В. Просандаев. – М.: МИФИ, 2007. – 172 с.
27. Олещук, В.А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля [Текст]: учеб. пособие / В.А. Олещук, А.С. Верещагина. – Комсомольск-на-Амуре, КНАГТУ, 2015. – 92 с.
28. Коротаев, В.В. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Часть 1. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений [Текст]: учебное пособие / В.В. Коротаев, А.В. Прокофьев, А.Н. Тимофеев. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 114 стр.
29. Глухов, Д.А. Технические измерения и приборы [Текст]: учеб. пособие. – Воронеж, 2009. – 251 с.
30. Андреев, А.Н. Оптические измерения [Текст]: учебное пособие / А.Н. Андреев, Е.В. Гаврилов, Г.Г. Ишанин [и др.]. – М.: Университетская книга; Логос, 2012. – 416 с.
31. Грибанов, Д.Д. Лазерно-оптический метод исследования траектории движения и изгибно-крутильных деформаций лопастей моделей несущих винтов [Текст] // Ученые записки ЦАГИ / Д.Д. Грибанов, В.П. Кулеш [и др.]. – М.: 1980. – Т. XI. – № 6. С. 88-94.
32. Бакулев, П.А. Радиолокационные системы [Текст]: учебник для вузов / П.А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.: ил.
33. Белоцерковский, Г.Б. [Текст] / Основы радиолокации и радиолокационные устройства / Г.Б. Белоцерковский. – М.: Сов. радио, 1975. – 336 с.: ил.



34. Датчики [Текст]: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
35. Кулеш, В.П. Измерение параметров движения и деформации модели самолета в аэродинамической трубе методом видеограмметрии [Текст] // Ученые записки ЦАГИ / В.П. Кулеш, С.Д. Фонов. – 1998. – Т. XXIX. – № 1–2. – С. 165–176.
36. Videogrammetric system for study of deformation of real-scaled helicopter rotor blades // SPIE 0277-786X/99. / S. Bosnyakov, V. Kulesh, A. Morozov [et al.]. – 1999. – Vol. 3516, Part 1. – P. 196–209.
37. Kuhajda, B. New Strategies for Frequency Measurement using High-Speed Video Camera System // IEEE / Blazej Kuhajda, Radek Martinek, Michal Kelnar, Jan Vanus and Petr Bilik. – 2015. – Pp. 125–130.
38. Аникин, В.А. Оценка положения лопасти вертолета двухканальной системой измерений [Текст] // Научный вестник МГТУ ГА / В.А. Аникин, Н.В. Ким, П.Д. Прохоров. – М., 2016. – 19(6). – С. 77–85.
39. 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» / В.А. Аникин, Н.В. Ким, П.Д. Прохоров. – Таганрог, 2014– С. 219–226.
40. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Макашов С.Ю., Аникин В.А., Громов В.В. Об определении акустических характеристик моделей несущих вертолетных винтов на открытом стенде, Акустический журнал, 62, 6, с. 725-730 (2016)
41. Грешилов, А.А. Математические методы построения прогнозов [Текст] / А.А. Грешилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.: ил.
42. Болотин, Ю.В. Обобщенный метод наименьших квадратов в задаче оценивания по угловым измерениям [Текст] // Автомат. и телемех / Ю.В. Болотин. – 1997. – Вып. 2. – С. 65–74.

43. Отчет о НИР «Разработка системы измерения траектории движения лопастей. Разработка принципов построения и создание демонстрационных макетов тензометрической, оптической и радиотехнической систем измерения, входящих в состав комплекса измерений положения лопастей вертолета». – М: МАИ, 2012.
44. Дайчик, М.Л. Методы и средства натурной тензометрии [Текст]: справочник / М.Л. Дайчик, Н.И. Пригоровский, Г.Х. Хуршудов. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.: ил.
45. Джонсон, У. Теория вертолета: В 2-х кн. – М.: Мир, 1983. – Кн. 1., 502 с.: ил.
46. Мехеда, В.А. Тензометрический метод измерения деформаций [Текст]: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
47. Пейн, П.Р. Динамика и аэродинамики вертолета [Текст] / П.Р. Пейн. – М.: Оборонгиз, 1963. – 440 с.
48. Пономаренко, В.И. Использование платформы Arduino в измерениях и физическом эксперименте [Текст] // Изв. вузов «ПНД» / В.И. Пономаренко, А.С. Караваев. – 2014. – Т. 22. – № 4.
49. Отчет о НИР «Адаптация системы измерения траектории движения конца лопасти, для трубного эксперимента на крупномасштабных винтах в скоростной трубе АДТ-104». – М: МАИ, 2013.
50. Сэломон, Д. Сжатие данных, изображения и звука [Текст] / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
51. Мамчев, Г.В. Цифровое телевизионное вещание [Текст]: учеб. пособие для вузов / Г.В. Мамчев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 448 с.: ил.
52. Миано, Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии [Текст] / Дж. Миано. – М.: «Триумф», 2003. – 336 с.: ил.
53. Горелик, А.Л. Методы распознавания [Текст]: учеб. пособие / А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин. – М.: Высшая школа, 1989. – 208 с.: ил.

54. Коссов, П.В. Улучшение качества тепловизионных изображений на основе суперразрешения и анализа ситуаций [Текст]: дисс... канд. тех. наук: 05.13.01 / Коссов Павел Валерьевич. – М.: МАИ, 2011. – 111 с.: ил.
55. Яне, Б. Цифровая обработка изображений [Текст] / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
56. Форсайт, Д.А. Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / Дэвид А. Форсайт, Жан Понс. – М.: Вильямс, 2004. – 928 с.: ил.
57. Ким, Н.В. Обработка и анализ изображений в системах технического зрения [Текст]: учебное пособие / Н.В. Ким. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 146 с.: ил.
58. Computer Vision in Control Systems-2: Innovations in Practice / ed. by M.N. Favorskaya, L.C. Jain. – Springer International Publishing, 2015.
59. Szeliski, R. Computer vision: algorithms and applications / Richard Szeliski. – Springer, 2011.
60. Wesley, E.S. Machine vision / E. S. Wesley, Q. Hairong. – Cambridge University Press, 2010.
61. Отчет о НИР «Модификация двухканальной системы измерения положения лопастей вертолета и проведение исследований на экспериментальной установке». – М: МАИ, 2014.
62. Прохоров, П.Д. Организация оптических измерений положения лопастей вертолета в динамике [Текст] // Труды МАИ. – М., 2016. – Вып. № 86.
63. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
64. Jain, R. Machine vision / R. Jain, R. Kasturi, V. G. Schunck. – New York, McGraw-Hill, 1995. – Vol. 5.
65. Визильтер, Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения [Текст]: курс лекций и практических занятий / Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В. [и др.]. – М: Физматкнига, 2010. – 672 с.
66. Визильтер, Ю.В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision [Текст] / Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Князь В.А. [и др.]. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 464 с.

67. Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. / Z. Zhang. – 2000. – 22(11). – Pp. 1330–1334.
68. Arduino Uno // Arduino.ru: [Сайт]. URL: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno> (дата обращения 14.06.2017).
69. Arduino Uno: технические характеристики // Освой программирование играючи. Сайт Александра Климова: [Сайт]. URL: <http://developer.alexanderklimov.ru/arduino/спец.php> (дата обращения 14.06.2017).
70. Пушкарев, О. ZigBee-модули XBee: вопросы практического применения // Беспроводные технологии, № 3б, 2009: электрон. верс. журн. URL: [http://www.wireless-e.ru/articles/bluetooth/2009\\_3\\_18.php](http://www.wireless-e.ru/articles/bluetooth/2009_3_18.php) (дата обращения 14.06.2017).
71. Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст] / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.: ил.
72. Пушкарев, О. Передача данных в ZigBee-сети с помощью модулей XBee ZNet 2.5 // Новости электроники, № 3, 2008: электрон. верс. журн. URL: <http://www.compel.ru/lib/ne/2008/3/8-peredacha-dannyih-v-zigbee-seti-s-romoshhyu-moduley-xbee-znet-2-5> (дата обращения 14.06.2017). Режим доступа: [www.compel.ru](http://www.compel.ru), свободный. – Загл. с экрана.
73. Prosilica GE [Эл. документ]. URL: <https://www.alliedvision.com/en/products/machine-vision-cameras/detail/Prosilica%20GE/680/action/pdf.html> (дата обращения 14.06.2017). Режим доступа: [www.alliedvision.com](http://www.alliedvision.com), свободный. – Загл. с экрана.
74. Allied Vision Prosilica GE: Technical manual [Эл. документ]. URL: [https://www.alliedvision.com/fileadmin/content/documents/products/cameras/Prosilica\\_GE/techman/Prosilica\\_GE\\_TechMan.pdf](https://www.alliedvision.com/fileadmin/content/documents/products/cameras/Prosilica_GE/techman/Prosilica_GE_TechMan.pdf) (дата обращения 14.06.2017). Режим доступа: [www.alliedvision.com](http://www.alliedvision.com), свободный. – Загл. с экрана.

75. M0814-MP 8mm F1.4 for 2/3" format cameras C-Mount [Эл. документ] URL: <https://secure.mightexsystems.com/pdfs/M0814MP.pdf> (дата обращения 14.06.2017). Режим доступа: [secure.mightexsystems.com](https://secure.mightexsystems.com), свободный. – Загл. с экрана.
76. Среда разработки Arduino // [Arduino.ru](http://arduino.ru): [Сайт]. URL: [http://arduino.ru/Arduino\\_environment](http://arduino.ru/Arduino_environment) (дата обращения 14.06.2017).
77. Bradski, G. Learning OpenCV 3 / Adrian Kaehler, Gary Bradski. – O'Reilly Media, 2017.