

## Организация оптических измерений положения лопастей вертолета в динамике

**Прохоров П. Д.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия  
e-mail: [prokhorov\\_pd@mail.ru](mailto:prokhorov_pd@mail.ru)*

### **Аннотация**

Рассматривается задача измерения положения лопастей вертолета в реальном времени с целью исследований эффективности и безопасности функционирования соосных винтов вертолета. Предложена оптическая система измерений, основанная на обработке видеок кадров с высокоскоростной камеры с целью определения положения торца лопасти в системе координат вертолета. Разработаны алгоритмы обработки и анализа экспериментальных данных. Результаты исследований подтверждают реализуемость предложенного подхода.

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

### **Введение**

На некоторых режимах полета вертолетов с соосной схемой расположения несущих винтов, связанных с активным маневрированием, существует вероятность сближения лопастей вплоть до их столкновения и последующего разрушения.

Безопасность подобных вертолетов может быть повышена за счет управления лопастями в реальном времени, с учетом их фактического расположения [1].

После проведенного анализа способов измерения положения лопасти был выбран оптический, заключающийся в использовании высокоскоростной видеокамеры.

Преимущества данного способа измерения заключаются в том, что обеспечивается высокая точность, отсутствие контакта с измеряемой конструкцией [2].

При организации оптических измерений требуется решить следующие задачи: определение частоты съемки, обеспечение требуемых условий наблюдения, выбор метода идентификации лопастей и алгоритмов обработки видеок кадров с целью получения координат торца лопасти.

В качестве критерия качества оценки используется вероятность правильного обнаружения

$$P_{no} \approx \frac{n}{N}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество правильно обнаруженных объектов интереса,  $N$  – общее количество объектов интереса.

В рамках решаемой задачи, необходимо выполнение условия

$$P_{no} \geq 0.9. \quad (2)$$

При этом среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{изм}$  измерений должно соответствовать условию

$$3\sigma_{изм} \leq 1 \text{ см.} \quad (3)$$

## 1. Расположение измерительного оборудования

Основной задачей предлагаемой оптической системы является измерение координат торца лопасти с помощью обработки видеок кадров, получаемых с высокоскоростной видеокамеры. При этом ее положение относительно вертолета известно и направления вертикальных осей систем координат камеры и вертолета совпадают.

Так как измерения  $Y_{кам}$  (положение торца в вертикальной плоскости) проводятся в системе координат видеокамеры  $Ox_{кам}y_{кам}$  (где ось  $Ox_{кам}$  направлена по горизонтали кадра, а  $Oy_{кам}$  по вертикали), то становится возможным получить с помощью матрицы перехода  $A$  [3,4] отклонения торца лопасти  $Y_{вер}$  в системе координат, связанной с вертолетом:

$$Y_{вер} = A \cdot Y_{кам}. \quad (4)$$

Система измерений была реализована на экспериментальной установке, которая схематично изображена на рис. 1.

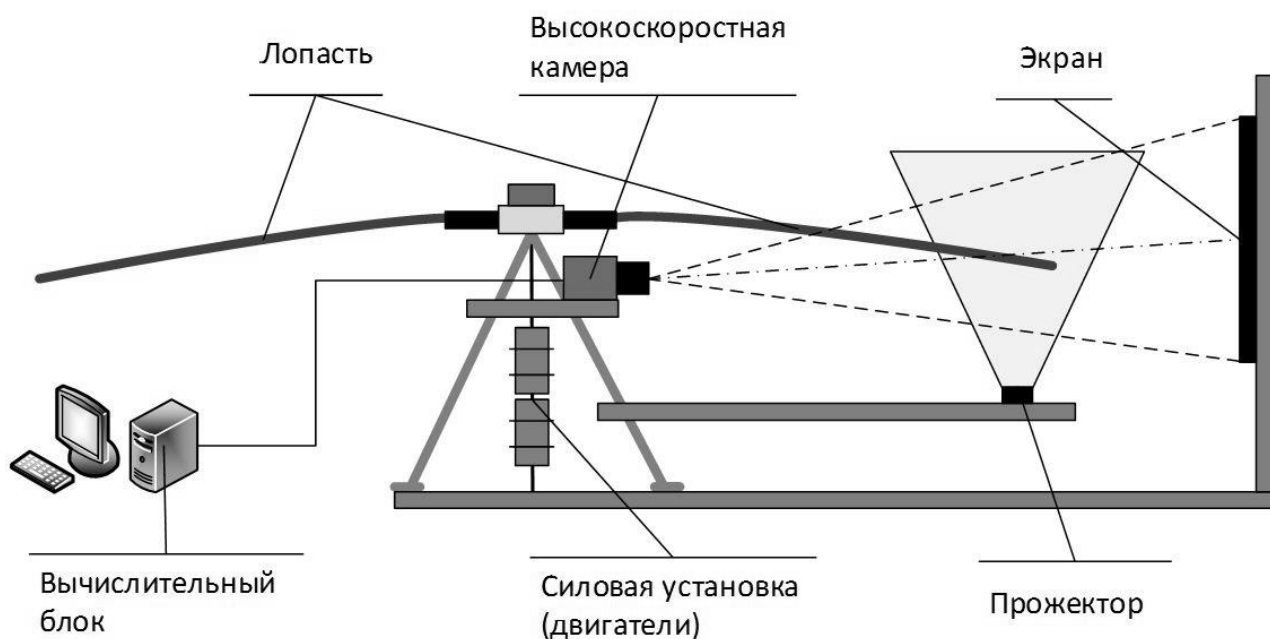


Рис. 1. Экспериментальная установка

В ее состав входят следующие компоненты:

- 1) Вычислительный блок, производящий обработку видеок кадров;
- 2) Высокоскоростная камера;
- 3) Экран для обеспечения требуемых условий наблюдения по текстуре фона;
- 4) Проектор для обеспечения требуемых условий освещенности лопасти;
- 5) Силовая установка, вращающая лопасти.

## 2. Определение частоты съемки

Одно из 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 объектива

видеокамеры в 56 градусов ( $\alpha_{об} = 0.977$  рад.) следует, что лопасть за один оборот (при  $\Omega_{max}$ ) находится в поле зрения камеры время  $t_{лон}$ , равное

$$t_{лон} = \frac{\alpha_{об}}{f_{max} 2\pi} = 0.0155 \text{ с.} \quad (5)$$

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

$$f_{кам} \geq \frac{K_{зап}}{t_{кам}}, \quad (6)$$

где  $K_{зап}$  – коэффициент запаса.

Таким образом, при задании коэффициента запаса  $K_{зап} = 3$ , частота съемки должна быть не менее 192 Гц. Данная частота обеспечивает, как минимум, получение одного кадра с изображением лопасти на каждом обороте несущего винта вертолета.

В соответствии с данными ограничениями, была выбрана высокоскоростная камера Allied Vision Tech Prosilica GE680, с частотой в 200 кадров в секунду, с разрешением 640x480 пикселей.

### 3. Обеспечение требуемых условий наблюдения

Оценка положения торца лопасти основана на выделении границ изображения лопасти и фона.

На эффективность данной процедуры воздействует два фактора:

- 1) низкая контрастность между лопастью и фоном;

2) текстура фона, затрудняющая выделение границы между лопастью и фоном.

При воздействии указанных факторов вероятность правильного обнаружения была  $P_{no} \leq 0.5$ , что недостаточно для проведения успешных исследований.

Таким образом, необходимо компенсировать влияние данных факторов.

Повышение контраста. При малых значениях выдержки, которые необходимы для получения изображения лопасти без «смаза», возникает следующая проблема: при максимально возможной открытой диафрагме используемого объектива (диафрагменное число 1.4) получаются 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 видеокadre.

Одним из вариантов увеличения контрастности изображения является использование дополнительной подсветки.

На основе проведенных экспериментов установлено, что целесообразно использовать для подсветки лопасти светодиодный прожектор (рис. 2) мощностью 30 Ватт (3000 Лм).



Рис. 2. Расположение светодиодного прожектора

Ниже показаны изображения торца лопасти, с использованием подсветки, и без нее (рис. 3).



Рис. 3. 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, получаемых 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. Данная проблема наглядно иллюстрируется на двух увеличенных фрагментах границы лопасти и фона (рис. 4).

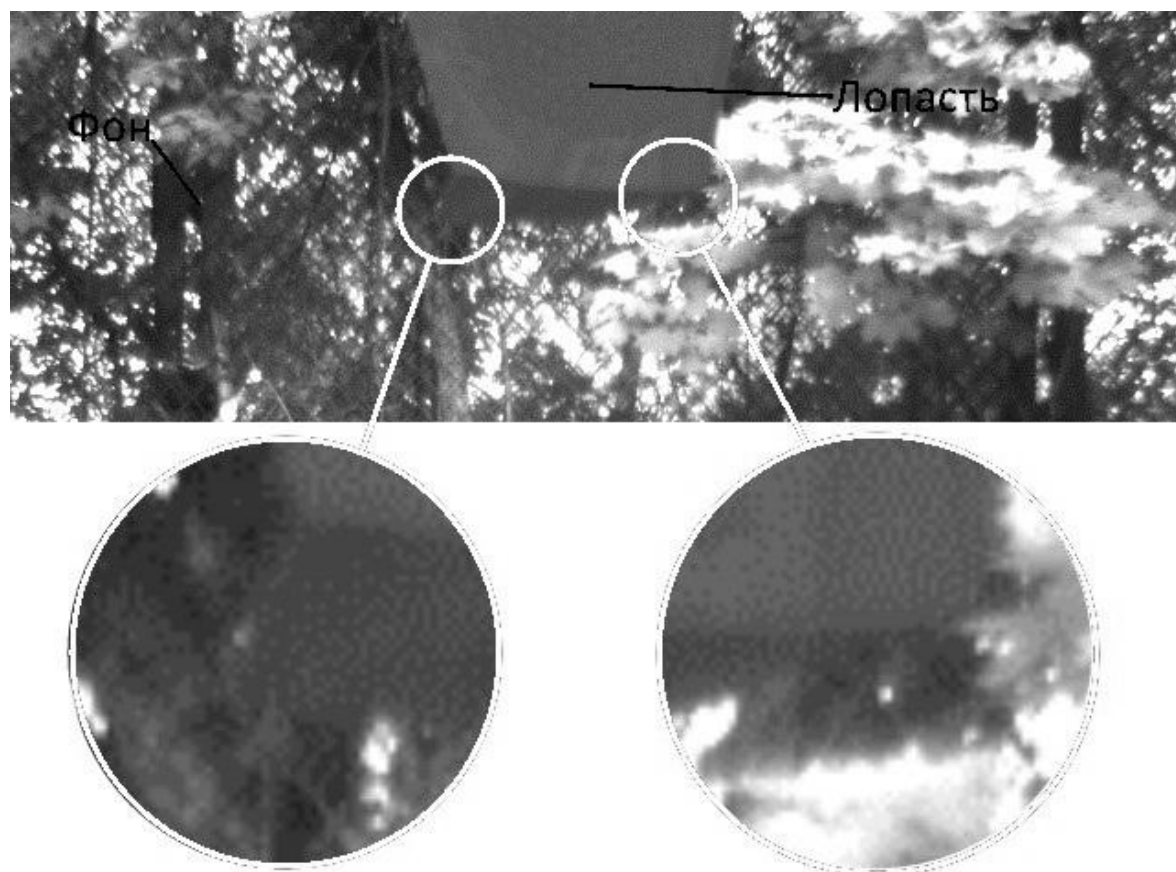


Рис. 4. Фрагменты границы лопасти и фона

Для изменения текстуры фона, было предложено использовать экран, расположенный в поле зрения камеры и покрытый черной (контрастной по отношению к лопасти) краской (рис. 5).



Рис. 5. Расположение экрана на экспериментальной установке

В результате проведенной работы по улучшению условий наблюдения, алгоритмы автоматического поиска и определения положения торца лопасти на видеокадре работают с вероятностью правильного обнаружения  $P_{no} \geq 0.9$ .

#### 4. Идентификация лопастей

Одним из важных моментов исследования поведения лопастей на различных режимах является идентификация лопастей, так как визуально они не имеют различий. Однако индивидуальные траектории их движения могут существенно различаться. Таким образом, требуется отделить измерения одной лопасти от другой.

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 (рис. 6).

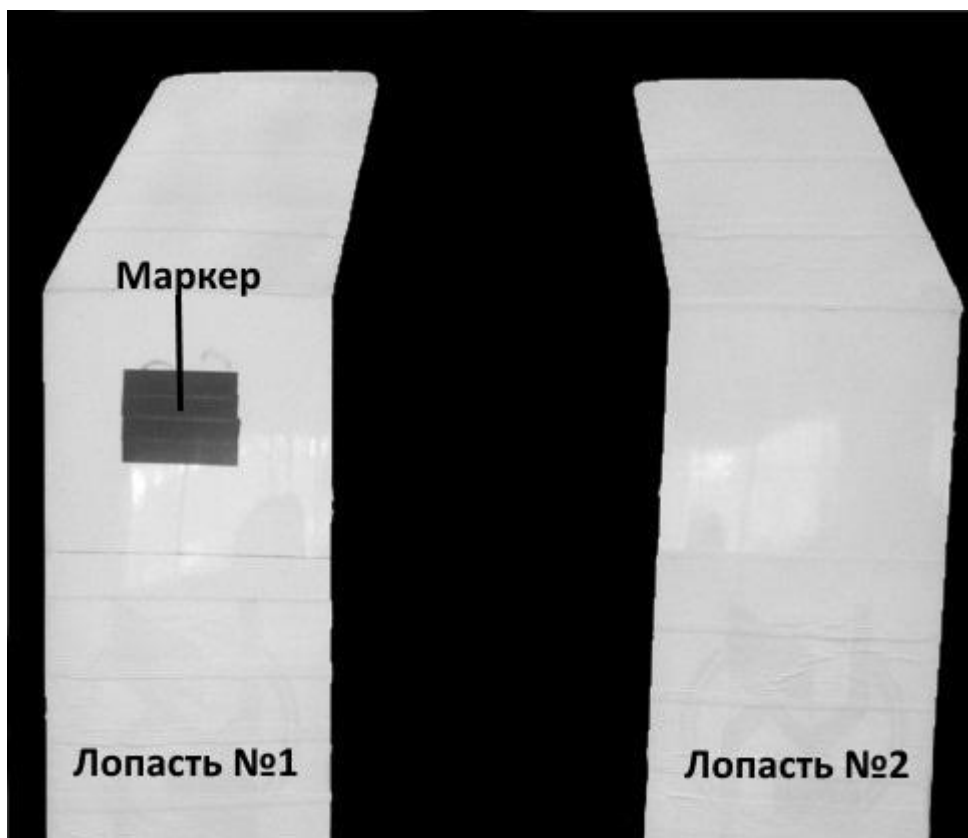


Рис. 6. Расположение маркера

Однако данный метод имеет один недостаток: появление ошибок идентификации лопастей при выходе маркера за пределы кадра (рис. 7).



Рис. 7. Ошибка идентификации

Этого недостатка можно избежать, если заранее оценить диапазон отклонения торца лопасти в поле зрения камеры и установить камеру 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.

## 5. Описание используемых алгоритмов

Немаловажным при выборе алгоритмов для автоматического распознавания положения торца лопасти является их быстродействие. Даже при постобработке время поиска лопасти на одном кадре является критичным, особенно при наличии большой видеопоследовательности.

Структура комплексов алгоритмов [1], реализуемых при обработке каждого видеокadra приводится на рис. 8.

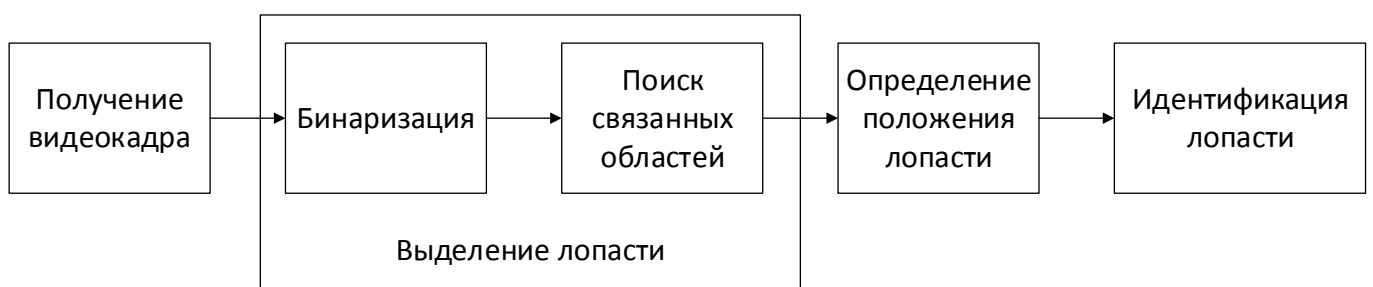


Рис. 8. Структура комплексов алгоритмов

Выделение лопасти. После проведенной работы по улучшению условий наблюдения, становится возможным достаточно просто сегментировать

изображение. Для этого используется пороговая бинаризация, как наиболее быстрый по времени выполнения алгоритм:

$$V_{\text{бин}} = \begin{cases} 0, & V_{\text{исх}} \geq V_{\text{пор}} \\ 1, & V_{\text{исх}} < V_{\text{пор}} \end{cases}, \quad (7)$$

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

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

$$V_{\text{пор}} = \frac{M_{\text{ф}} + M_{\text{л}}}{2}. \quad (8)$$

В результате, получаем бинарное изображение (рис. 9) лопасти, окрашенной белым цветом, и фона.



Рис. 9. Пример результата бинаризации

Для того чтобы отделить область, характеризующую положение лопасти, от белых областей, которые могут быть получены из-за шумов, используется алгоритм связанных областей.

Для поиска связных областей используется метод «лесного пожара» [3]. Идея метода заключается в том, что область «поджигается» в одной точке, после чего каждая «подожженная» точка, в свою очередь, «поджигает» всех своих соседей имеющих такую же яркость. Уже «сгоревшие» точки не поджигаются. Таким образом все точки области окажутся вовлеченными в этот процесс. В результате, получается совокупность связанных областей.

Определение положения лопасти. Так как наиболее крупным контрастным объектом на фоне является лопасть, то для ее выделения производится поиск наибольшей по площади связанной области (алгоритм представлен на рис. 10).

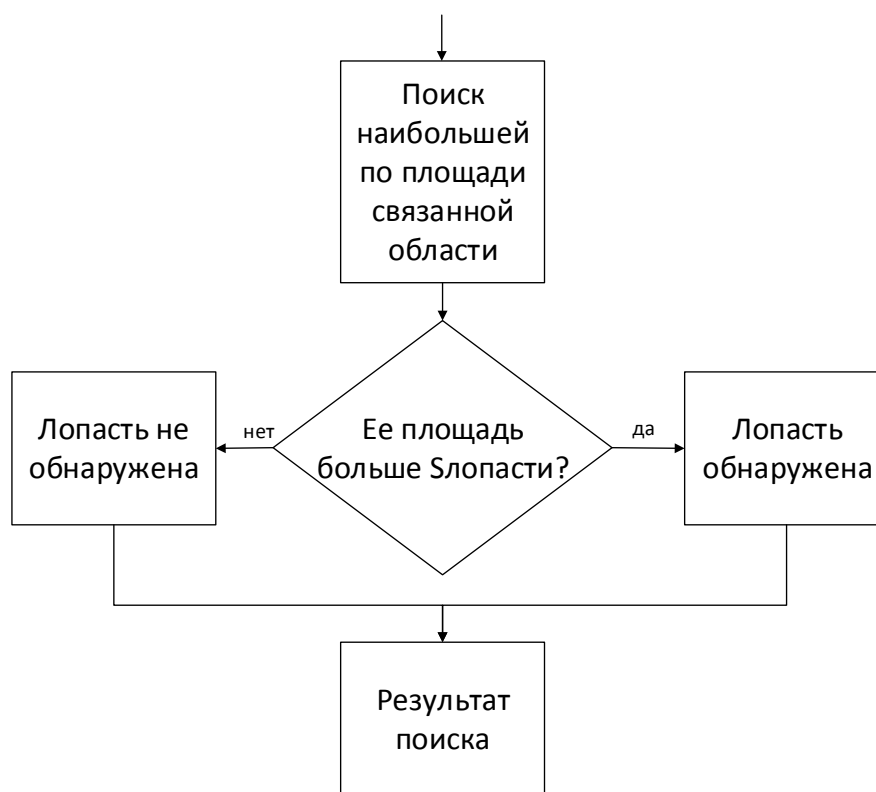


Рис. 10. Алгоритм определения положения лопасти

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 рис. 11.

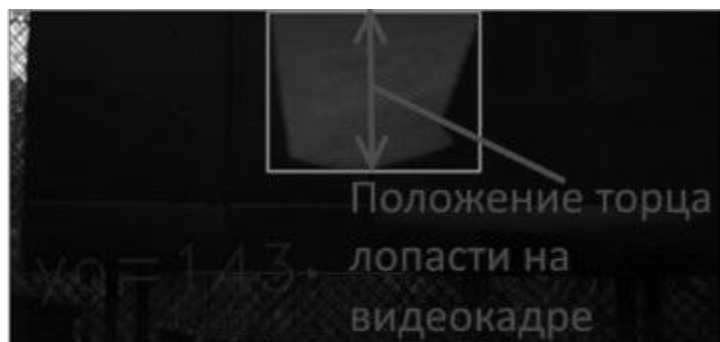


Рис. 11. Результат работы алгоритма

После обнаружения лопасти и определения положения ее торца на видеокадре, благодаря проведенной калибровке [4], можно получить отклонение торца лопасти  $Y_{кам}$  в системе координат камеры  $Ox_{кам}y_{кам}$ .

Идентификация лопастей. Алгоритм идентификации представлен на рис. 12. Порог  $S_{маркера}$  подбирается таким образом, чтобы исключить возможность ложного обнаружения маркера.

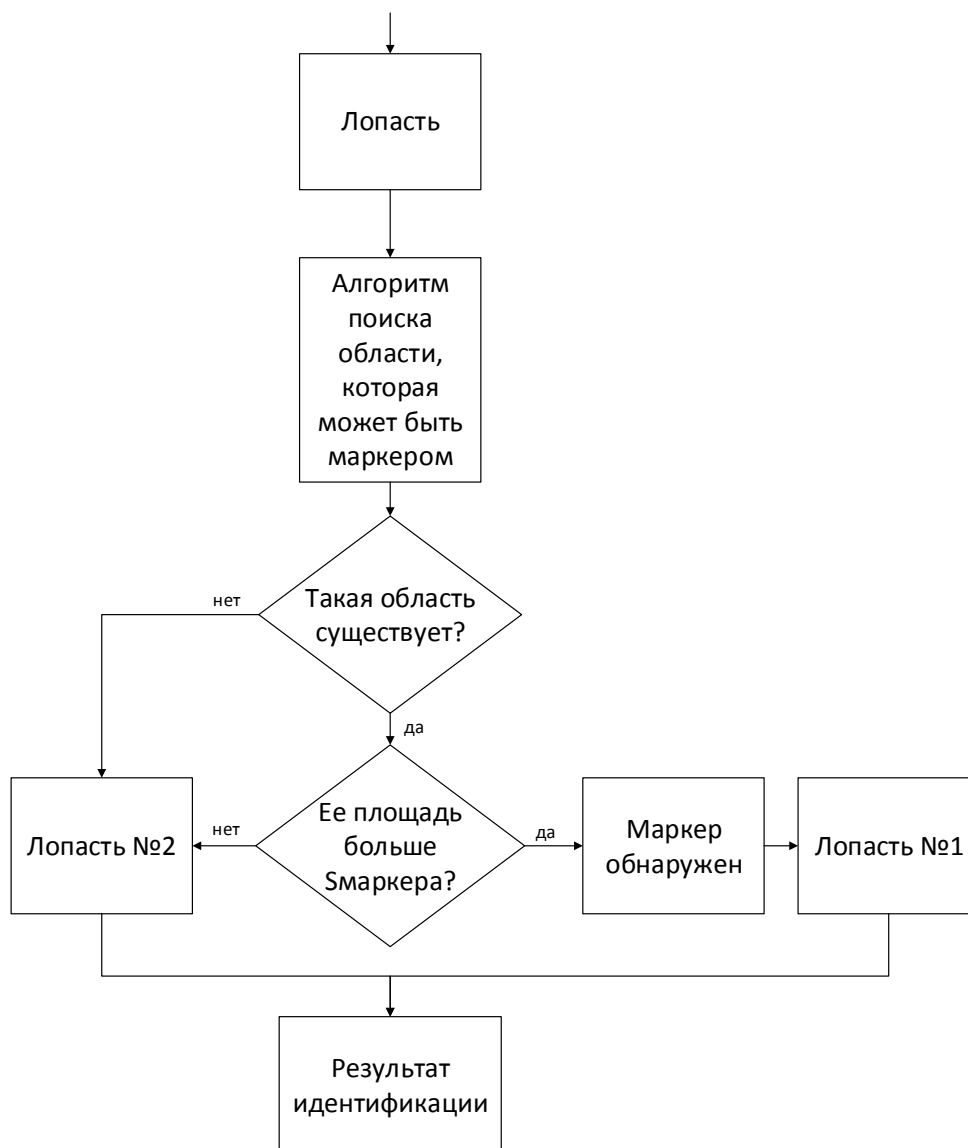


Рис. 12. Алгоритм идентификации лопасти

На лопасти производится поиск маркера, если он отсутствует, то это лопасть №2 (рис. 13), если присутствует – то лопасть №1 (рис. 14).





Рис. 13. Пример распознавания лопасти №2



Рис. 14. Пример распознавания лопасти №1

## 6. Результаты экспериментов

На экспериментальной установке были проведены исследования по работоспособности данного метода измерений.

На рис. 15 представлен график отклонения торца одной из лопастей, полученный с помощью проведенных оптических измерений. На вертикальной оси – отклонения торца лопасти в сантиметрах, на горизонтальной – номер измерения (200 измерений – 1 секунда). За уровень нулевого отклонения торца лопасти взято его положение в неподвижном состоянии.

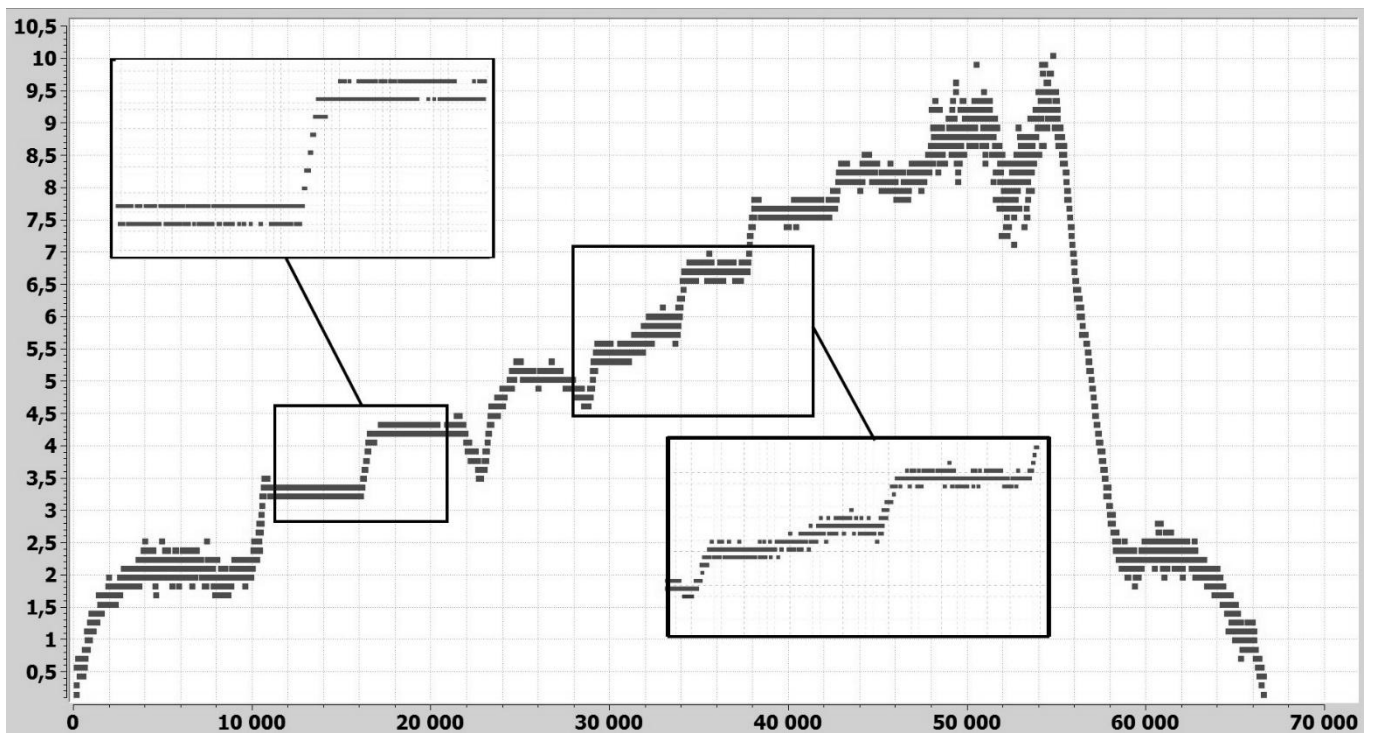


Рис. 15. График отклонений торца лопасти

На представленном графике явно выделяются участки с различной тягой (различный шаг лопастей).

Результаты измерений в нескольких диапазонах работы (при изменяемой тяге винта) при постоянстве условий вращения несущего винта представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений

Интервал измерений	Частота вращения, об/мин	Тяга (по модулю), кг	Математическое ожидание положения торца лопасти ( $m_T$ ), см	Среднеквадратическое отклонение (СКО) положения торца лопасти ( $\sigma_T$ ), см
11000-16000	500	27	3.29	0.066

17000-21000	500	50	4.24	0.069
39000-42000	500	144	7.61	0.093

СКО  $\sigma_T$  характеризует суммарную погрешность, в том числе включающую погрешность измерений  $\sigma_{изм}$ . Так как в соответствии с данными таблицы 1  $3\sigma_T < 0.3 \text{ см}$  и  $\sigma_{изм} < \sigma_T$  для всех исследованных диапазонов работы несущего винта вертолета, то условие (3) выполняется.

### Выводы

- 1) Разработан оптический метод измерений положения торца лопасти вертолета, включающий в себя структуру экспериментальной измерительной установки, комплекс алгоритмов и соответствующее программное обеспечение для выделения, определения положения и идентификации лопасти;
- 2) Проведены работы по улучшению условий наблюдения и разработаны алгоритмы, обеспечивающие выполнение заданных условий  $P_{по} \geq 0.9$  и  $3\sigma_{изм} \leq 1 \text{ см}$ .

### Библиографический список

1. Аникин В.А., Ким Н.В., Прохоров П.Д. Некоторые вопросы создания скоростного БЛА вертолетного типа // Материалы девятой научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и четвертой молодежной школы семинара «Управление и обработка информации в технических системах», Таганрог, 2014 г. С. 219-226.

2. Гвоздева Н.П., Коркина К.И. Прикладная оптика и оптические измерения – М.: Машиностроение, 1976. – 383 с.
3. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
4. Форсайт Дэвид А., Понс Жан Компьютерное зрение. Современный подход. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.