## Промежуточный отчет о выполнении проекта РФФИ № 20-08-01056 А «Разработка подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП при помощи БЛА, включающего планирование движения БЛА и определение состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах» за 2021 г.

#### Аннотация

В 2021 г. в ходе работ по проекту был разработан новый метод автономного планирования движения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для обследования воздушных линий электропередач (ЛЭП). Чтобы обеспечить автоматизированное обследование частей ЛЭП в данном проекте были выделены ключевые элементы, которые могут быть обнаружены при помощи данных с камеры и алгоритмов компьютерного зрения. К таким ключевым элементам относятся: части опоры (верхняя и нижняя), провода, траверсы. Новизна разработанного метода обследования ЛЭП заключается в динамическом построении траектории в зависимости от местоположения БЛА относительно элементов ЛЭП. Траектория движения БЛА создается на основе рассчитанных положений БЛА, опорных точек и особых алгоритмов обследования. Рассчитанные положения зависят от параметров камеры (высоты и ширины кадра, процента перекрытия кадров). Опорные точки, хранятся в базе данных, которая формируется при движении БЛА. Детальное обследование отдельных элементов ЛЭП производится на основе заданных паттернов траекторий движения, на основе которых формируется полетное задание для обследования конкретного типа элемента ЛЭП. Во время выполнения полетного задания по обследованию опоры ЛЭП БЛА пополняет базу данных типом обнаруженных ключевых элементов и координатами опорных точек, которые необходимы для связи полетных заданий между собой. Для построения траектории движения между опорными точками используется RRT алгоритм. Для тестирования проверки эффективности предложенного алгоритма планирования пути между двумя опорными точками были проведены симуляционные эксперименты в программной Gazebo. Для этого рамках проекта была разработана среде В специализированная платформа моделирования движения БЛА. Посредством разработанного ПО была продемонстрирована автономная навигация БЛА и тестовые полёты в симуляторе. Результаты моделирования показали, что среднее время планирования пути составляет не более 1 с для одного участка ЛЭП. Более того, разработанный алгоритм позволяет БЛА перемещаться относительно опоры на безопасном расстоянии. Это исключает столкновения БЛА с элементами ЛЭП и влияние электромагнитного излучения от ЛЭП на оборудование БЛА. Предложенный алгоритм планирования пути между опорными точками может работать с минимальными задержками по времени на больших расстояниях при обследовании ЛЭП в реальных условиях.

Для проверки разработанного подхода к определению состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах была собрана база данных из различных снимков элементов ЛЭП: в видимом спектре, инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) спектрах. База данных включает в себя 7566 снимков в видимом спектре, 2550 снимков в ИК спектре и 1498 снимков в УФ спектре. На снимках в видимом спектре содержатся изображения опор разнообразных форм и на различном фоне, изображения траверсов с изоляторами и креплениями. Изображения с ЛЭП в ИК спектре содержат информацию о температуре опор и элементов ЛЭП. Наличие этой информации позволяет выявить такие дефекты, как пробой изолятора, излом или перетирание проводов. Снимки изоляторов ЛЭП в УФ спектре показывают наличие коронного разряда на проводах линий электропередач, который вызывает значительные потери передаваемой энергии.

Был разработан подход к определению состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах. Данный подход обеспечивает детектирование дефектов опор, траверсов, изоляторов, проводов и креплений в опорных точках пространства при их достижении БЛА. Подход состоит из следующих этапов: создание полетной миссии оператором, движение БЛА по имеющимся паттернам траекторий, создание базы данных снимков элементов ЛЭП в видимом, ИК- и УФ- спектрах, переход между полетными заданиями в опорных точках и анализ собранных изображений на наличие дефектов у снятых на камеры элементов ЛЭП. Также были рассмотрены дефекты на различных элементах ЛЭП, спектральные диапазоны, в которых они находятся, и методы обработки. Было проведено тестирование метода поиска дефектов посредством обработки изображений, снятых с БЛА. Обработка изображения проводилась посредством нейронных сетей семейства YOLO. Сравнительный анализ YOLOv3, YOLOv4 и их упрощенных версий показал высокие результаты точности детекции дефектов на изоляторах при помощи YOLOv3-tiny  $(mAP@0,50=0,97\pm0,03; mAP@0,75=0,78\pm0,04).$ 

## Abstract

In 2021, a new method of autonomous planning of the movement of unmanned aerial vehicles (UAVs) for the survey of overhead power lines (PTL) was developed. In order to provide an automated inspection of parts of power lines in this project, key elements were identified that can be detected using data from a camera and computer vision algorithms. These key elements include: support parts (upper and lower), wires, traverses. The novelty of the developed method for the survey of power transmission lines lies in the dynamic construction of the trajectory depending on the location of the UAV relative to the elements of the power transmission line. The UAV's trajectory is based on the calculated UAV positions, control points and special survey algorithms. The calculated positions depend on the camera parameters (frame height and width, percentage of frame overlap). Control points are stored in the database, which is formed when the UAV moves. A detailed examination of individual elements of power transmission lines is carried out specified patterns of trajectories, on the basis of which a flight task is formed for examining a specific type of power transmission line element. During the execution of the flight task for the survey of the RTL support, the UAV replenishes the database with the type of detected key elements and the coordinates of the control points, which are necessary for connecting the flight tasks with each other. The RRT algorithm is used to construct the trajectory of movement between the control points. To test the effectiveness of the proposed algorithm for planning a path between two control points, simulation experiments were carried out in the Gazebo software environment. For this, within the framework of the project, a specialized platform for modeling the motion of a UAV was developed. The developed software was used to demonstrate autonomous UAV navigation and test flights in the simulator. The simulation results showed that the average route planning time is no more than 1 s for one section of the power transmission line. Moreover, the developed algorithm allows the UAV to fly around the supports at a safe distance. This excludes collisions of UAVs with elements of power lines and the influence of electromagnetic radiation from power lines on UAV equipment. The proposed algorithm for planning the path between the control points can effectively work with minimal time delays at large distances when inspecting power lines in real conditions.

To test the developed approach to determining the state of PTL elements based on the analysis of images in various spectra we collect a database. The database consists of various images of PTL elements: in the visible spectrum, infrared (IR) and ultraviolet (UV) spectra. The database includes 7566 visible images, 2550 infrared images and 1498 UV images. The images in the visible spectrum contain images of supports of various shapes and against different backgrounds, images of traverses with insulators and fasteners. Images from power transmission lines in the IR spectrum contain information about the temperature of the towers and elements of power transmission lines. The presence of this information allows you to identify such defects as breakdown of the insulator, break or chafing of wires. Pictures of power line insulators in the UV spectrum show the presence of corona discharge on the wires of power lines, which causes significant losses of transmitted energy.

An approach was developed to determine the state of PTL elements based on the analysis of images in various spectra. This approach provides detection of defects in supports, traverses, insulators, wires and fasteners at the reference points of space when the UAV reaches them. The approach consists of the following stages: creation of a flight mission by the operator, movement of the UAV along the available trajectory patterns, creation of a database of images of power transmission line elements in the visible, IR and UV spectra, transition between flight tasks at reference points and analysis of the collected images for defects. Possible defects on various elements of power transmission lines, spectral ranges in which they are located, and processing methods were also considered. The testing of the method of searching for defects by processing images taken from the UAV was carried out. Image processing was carried out using neural networks of the YOLO family. Comparative analysis of YOLOv3, YOLOv4 and their simplified versions showed high results of the accuracy of defect detection on insulators using YOLOv3-tiny (mAP ( $\hat{a}$ ) 0.50 = 0.97 ± 0.03; mAP ( $\hat{a}$ ) 0.75 = 0.78 ± 0.04).

## Заявленные цели проекта на текущий этап

На 2021 год выполнения проекта были запланированы следующие цели:

1. Разработка метода планирования движения БЛА для проведения фотосъемки ЛЭП;

2. Разработка подхода к определению состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах

3. Создание базы данных снимков ЛЭП в различных спектрах;

4. Подготовить серию статей для публикации в высокорейтинговых российских и зарубежных изданиях, индексируемых в РИНЦ и SCOPUS/WoS.

## Введение

Своевременный мониторинг ЛЭП может обеспечить предотвращение многих аварийных ситуаций, поскольку позволяет обнаружить и устранить причины большинства неполадок. Основные причины выхода из строя

кабелей электросети - локальный нагрев кабеля, критическая раскачка обледенение, проводов, критический провис, разрыв изоляции. Использование БЛА для мониторинга ЛЭП, как правило, обходится дешевле и эффективнее других визуальных методов обследования [1]. Кроме того, БЛА обеспечивает мониторинг участков элементов ЛЭП И В труднодоступных местах.

В результате работы по проекту в 2020 году было определено, что существующие методы планирования движения БЛА не подходят для обеспечения обследования инфраструктурных сложных объектов. Существующие методы планирования движения не позволяют в полной мере производить аэромониторинг различных дефектов ЛЭП, поскольку не учитывают многообразие опор и местоположение элементов ЛЭП. В ходе выполнения проекта в 2021 году был разработан метод инспекции ЛЭП, который обеспечивает визуальный мониторинг различных элементов линий электропередач. Новый метод обследования заключается в последовательном обследовании ключевых элементов посредством переключения полетных заданий из заданного набора и сборе изображений в различных спектрах участков или элементов ЛЭП. Собранная база данных в дальнейшем анализируется при помощи специальных алгоритмов машинного обучения с целью поиска дефектов, которые могут привести к выходу из строя или нарушению работы частей ЛЭП.

БЛА в ходе инспекции совершает полет в автономном режиме следуя траектории, построенной по выбранным заранее опорным точкам, и выполняет мультиспектральную съемку элементов ЛЭП. Полученные изображения отправляются на наземную базовую станцию по каналу беспроводной связи для дальнейшего анализа с целью обнаружения дефектов и составления плана технического обслуживания по их ликвидации.

Построение маршрута для исследования ЛЭП непосредственно влияет на качество, скорость и результаты обследования опор и элементов воздушных линий электропередач. Таким образом, актуальной проблемой является разработка программного обеспечения (ПО) для выполнения высокоуровневых полетных миссий по обследованию ЛЭП.

В 2020 году был также проведен обзор современных методов мониторинга состояния элементов конструкции ЛЭП посредством обработки изображений в ИК-, УФ- и видимом спектрах. Для изображений в видимом спектре применяются методы, основанные на алгоритмах глубокого и машинного обучения. УФ спектр используется для выявления коронных разрядов на проводах и изоляторах, а ИК спектр позволяет выявлять так называемые горячие точки (hotspot). Основной проблемой для ИК- и УФ-

спектров является отсутствие открытой базы данных снимков. Поэтому в этой работе описан процесс создания собственной базы данных для анализа изображений ключевых элементов ЛЭП на наличие дефектов. Кроме того, представлен новый метод динамического планирования траектории по данным, получаемым с датчиков БЛА, подход к определению состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах и полученной базы данных снимков ЛЭП в различных спектрах.

## 1. Метод планирования движения БЛА для проведения фотосъемки ЛЭП

Для автономного планирования движения БЛА для осмотра ЛЭП особенности существующих инфраструктуры следует учесть типов опоры ЛЭП бывают нескольких энергосистем. Так. принципиально различных видов. В зависимости от используемого материала различают опоры, выполненные из дерева, железобетона, стали. Деревянные опоры используются для сооружения А- и П-образных конструкций. В зависимости от особенности конструкции различают следующие виды стальных опор: решетчатые, многогранные; закрытого и открытого профиля.

Исходя из многообразия опор и других частей ЛЭП, необходимо определить ключевые элементы для обследования, объединяющие все виды опор ЛЭП. К таким ключевым элементам можно отнести: саму опору, траверсы, провода и верхнюю часть опоры. Диагностика опоры позволяет выявлять геометрические изменения опоры (наклон), дефекты конструкции (трещины, разломы, ржавчина), дефекты фундамента. Осмотр траверсов поможет установить дефекты или поломку изоляторов, креплений, виброзащиты при её наличии, а также проверить траверсы на наличие геометрических отклонений (наклон, смещение). На верхней части опоры располагается грозозащитный трос, который также необходимо обследовать для поиска дефектов самого троса и его крепления.

Разнообразие видов опор и элементов ЛЭП не позволяет использовать заранее заданные траектории движения, по которым возможно производить обследование посредством БЛА. Поэтому необходимо разработать новый метод автономного планирования движения БЛА для обследования опор и участков ЛЭП. В основе предлагаемого метода обследования ЛЭП лежит процесс детектирования ключевых элементов. Разработанный метод движения БЛА по динамически формируемым траекториям обеспечивает обследование частей ЛЭП на основе собираемых данных о ключевых элементах, которые могут быть получены при помощи алгоритмов компьютерного зрения и данных с камеры. Использование визуальной SLAM навигации на БЛА является перспективным решением навигационных задач для автономных систем. Изображения, собранные камерой, являются необходимыми и достаточными данными для навигации БЛА при определении опорных точек траектории. Для реализации собственного метода автоматизированного мониторинга опор и участков ЛЭП рассмотрим существующие SLAM алгоритмы и выберем наиболее подходящий для целей проекта.

В настоящее время SLAM навигация получила распространение в Robotic Operating System (ROS) в виде пакетов, зачастую находящихся в открытом доступе, например: «GMapping» [2], «Cartographer» [3], «Rtabmap» [4]. Фреймворк ROS [5] является популярной и наиболее удобной платформой, имеющий различные математические инструменты и пакеты программного обеспечения. Многие реальные навигационные комплексы имеют свой пакет версий в ROS и очень удобны в интеграции и использовании. Далее рассмотрим готовые и широко используемые пакеты SLAM навигации: «Rtabmap», «Gmapping» и «Google Cartographer».

«Rtabmap» – это метод SLAM, основанный на поиске и сопоставлении соответствий визуальных данных сенсоров с использованием механизма памяти, где хранится база данных визуальных образов в соответствии с данными о местоположении робота [6]. Стоит отметить, что такой подход сильно зависит от качества получаемых изображений, а также от участка местности, где происходит картографирование. Например, Rtabmap будет плохо работать в пространствах, где все объекты одинаковые и получаемые изображения идентичны.

«Gmapping» создает карту благодаря данным с лидара (транслитерация LiDAR – «Light Identification Detection and Ranging» — система световой идентификации, обнаружения и определения дальности). Как правило, в библиотеке «Gmapping» используется 2D лидар, способный сканировать окружающее пространство на 360 градусов вокруг. Далее, происходит сопоставление готовой карты и данных с лидара, в результате чего оценивается и корректируется местоположение робота.

«Google Cartographer» схож с «Gmapping» в том, что может строить карту по 2D лидару и данных с одометрии. Однако, в отличие от «Gmapping», он обладает более богатым функционалом. Например, «Cartographer» имеет более сложную градацию точек (cells), из которых состоят карты [7]. В результате, «Cartographer» имеет меньшую вероятность пропустить какиелибо объекты на карте.

Помимо этого, «Cartographer» работает с 3D картами, что является несомненным преимуществом для работы с БЛА. Также, в отличие от более

простого «Gmapping», «Cartographer» может работать с несколькими лидарами одновременно (к примеру, на разной высоте для создания 3D карты), а также с RGBD и стереокамерами, благодаря которым возможно получить гораздо больше информации об окружающем пространстве.

Входные данные для «Cartographer» - это информация, получаемая с разнородных датчиков, например, с камеры глубины, IMU, лидара, GPS и т.д. Также немаловажным преимуществом «Cartographer» является возможность использовать его в групповых системах [8] «Cartographer» может выполнять SLAM навигацию за счёт нескольких роботов, передающих данные параллельно. По этим причинам «Cartographer» был выбран в данной работе для построения карты местности при обследовании ЛЭП.

Далее рассмотрим разработанный метод автономного движения БЛА вблизи ЛЭП, включающий динамическое построение траекторий для обследования ключевых элементов ЛЭП.

При обследовании элементов и участков ЛЭП посредством БЛА предполагается, что БЛА должен обеспечивать свое точное позиционирование и определение местоположения на открытой местности. Рассмотрим действия БЛА в виде модели состояний для проведения мониторинга элементов ЛЭП (рисунок 1).



Рисунок 1 – Модель состояний БЛА при обследовании ЛЭП, где цифрами обозначены переходы между состояниями: 0 – Взлёт завершен; 1 – Получение команды на обследование траверсов; 2 – Получение команды на обследование верхней части опоры; 3 – Получение команды на обследование проводов; 4 – Получение команды на дополнительное обследование; 5 – Обследование завершено

Каждое состояние – это определенное полетное задание для БЛА. заданий называется полетной миссией. Для Совокупность полетных обеспечения автоматизированной работы системы оператор задает миссию обследования на предварительном этапе и не может корректировать её по ходу работы БЛА. Самая короткая миссия обследования состоит из взлета, обследования опоры ЛЭП и посадки. Самая длинная миссия будет состоять из взлета, обследования опоры, обследования верхней части опоры, обследования траверсов, обследование проводов и посадки. Порядок обследования ключевых объектов может меняться. Однако, обследование опоры присутствует всегда и всегда имеет самый высокий приоритет выполнения, т.е. выполняется первым. Оператор выбирает из списка заданий, те задания, из которых будет состоять миссия обследования. Все задания имеют свой приоритет выполнения. Самый высокий приоритет у задания на обследование опоры, далее по порядку обследование верхней части, обследование траверсов и в конце обследование проводов.

Система компьютерного зрения, установленная на БЛА, непрерывно функционирует при обследовании опоры. Данная система состоит из камеры, закрепленной на стабилизаторе, и обработчика изображений в виде глубокой сверточной нейронной сети для распознавания ключевых элементов ЛЭП и их дефектов. В момент, когда система обнаруживает ключевой элемент (траверс, верхняя часть, провода и пр.), текущая GPS-координата БЛА и снимок этого ключевого элемента записывается в базу данных координат ключевых элементов. Записанные координаты отвечают за местоположение БЛА в момент обнаружения и съемки ключевого элемента. Координаты, связанные с этими изображениями, будут опорными точками, соединяющие траектории полетных заданий. Процесс создания базы данных С координатами опорной точки И типом обнаруженного элемента проиллюстрирован на рисунке 2.



Рисунок 2 – Процесс создания базы данных с опорными точками

В результате обследования опоры имеется ряд фотографий опоры и база данных с опорными точками. Движение между опорными точками реализует переход между состояниями БЛА (рисунок 1). Траектории, соединяющие две опорные точки, динамически строятся на воссозданной трехмерной карте местности. Для построения траектории от одной опорной точки до другой в среде со статическими препятствиями используется улучшенный RRT- алгоритм [9]. RRT-алгоритм выбран, поскольку он не требует больших расчете траекторий вычислительных ресурсов при В трёхмерном пространстве, гибко настраивается под любые задачи и прост в реализации. Для построения трехмерной карты местности для последующей навигации на ней используется «Google Cartographer». Чтобы предотвратить столкновения с динамическими препятствиями, спланированная траектория между опорными точками постоянно корректируется при движении БЛА за счёт имеющейся системы технического зрения и заданных маневров уклонения от препятствий.

Для каждого полётного задания необходимы отдельные алгоритмы обследования опоры, траверсов, проводов и верхней части опоры. В основе данных алгоритмов лежит информация о паттернах траектории БЛА в зависимости от обследуемого ключевого объекта. В контексте данной работы паттерн траектории понимается как множество логически допустимых путей обследования ключевых элементов ЛЭП [10].

Рассмотрим два паттерна траекторий, названные «обходной путь» («circumvolant path», CIRP) и «вертикальный путь взлета и посадки» («take off and land vertically path», TOLP). Этих двух траекторий достаточно для полного обследования опоры при помощи БЛА [11]. На рисунке 3, данные траектории обозначены красной и зеленой линиями. Данные маршруты позволяют избежать столкновения с опорами ЛЭП и упрощают обзор БЛА для большинства видов ЛЭП. Траектория TOLP в основном затрагивает движение БЛА вдоль оси ОZ, траектория CIRP – движение по осям ОХ и ОҮ.



Рисунок 3 – Паттерны траектории БЛА при обследовании опоры ЛЭП

На рисунке 3 красной линией обозначен паттерн траектории «обходной путь», зеленой – «вертикальный путь взлета и посадки». Для использования данных паттернов траекторий, необходимо располагать данными о безопасном расстоянии от опоры ЛЭП, где на БЛА не будет действовать электромагнитное излучение ЛЭП [12], при котором будет возможно осуществить беспрепятственное движение БЛА относительно элементов ЛЭП при сильном ветре.

Однако паттернов траекторий TOLP и CIRP недостаточно, чтобы провести обследование проводов на наличие таких дефектов, как: обрыв проводов, дефекты несущего троса, смещение виброгасителей, отсутствие или неправильное расположение соединительных проводов, изломы распорок и наличие внешних угроз (деревья, мусор и ветки на проводах). Для обнаружения таких неисправностей необходимо разработать дополнительный паттерн траектории в целях обследования проводов.

Паттерн траектории для обследования проводов показан на рисунке 4 и называется WIT («wire inspection trajectory»).



Рисунок 4 – Паттерн траектории обследования проводов

Сориентируем опору ЛЭП и связанные с ней провода так, чтобы направление движения вдоль проводов совпадало с направление одной из осей (ОХ или ОҮ). Начало движение БЛА для обследования проводов начинается в опорной точке №1, где была обнаружена верхняя часть опоры. Тогда для обследования проводов БЛА необходимо двигаться от опорной

точки №1 вдоль одной из осей сверху проводов, соблюдая минимально допустимое расстояние. Во время движения из точки №1 в точку №3 БЛА производит фотосъемку проводов. При обнаружении второй опоры БЛА зависает в воздухе в точке №3 и производит расчет второй опорной точки №2 для обследования проводов. Расположение опорной точки №2 напрямую зависит от длины проводов и расстояния между опорами. После расчета точки №2, БЛА движется к ней и далее продолжает движение по предлагаемому паттерну траектории обследования проводов. В процессе движения БЛА отправляет управляющие сигналы на стабилизатор с установленной камерой. Это необходимо для постоянного наведение камеры на объект обследования.

Данный паттерн траектории обследования проводов обеспечивает получение данных о ЛЭП в плоскости 0ХҮ и изображение участка ЛЭП (две опоры и провода между ними) в одной из плоскостей (0ХZ или 0ҮZ). Этого достаточно, чтобы можно было обнаружить дефекты проводов, провести анализ фотоматериалов на наличие провеса проводов и воссоздать трехмерную визуализацию участка ЛЭП на основе полученных снимков. Пример трехмерной визуализации обследуемого участка ЛЭП представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 - Трехмерная визуализация обследуемого участка ЛЭП

Во время движения по паттернам траекторий БЛА выполняет фотосъемку с заданным параметром перекрытия кадров. Это необходимо для создания 3D модели обследуемого участка ЛЭП. Для того, чтобы рассчитать расположение следующей путевой точки, где будет сделан фотоснимок, необходимо вычислить расстояние между предыдущим и текущим положениями БЛА, т.е. размер шага. Размер шага зависит от требуемого расстояния выборки до объекта исследования (GSD [см/пиксель]) и параметра перекрытия (overlap) (рисунок 6). У кадра есть ширина ImW и высота ImL изображения в пикселях. Зная данные величины можно произвести расчет по формулам (1) и (2) длины шага в метрах вдоль ширины кадра p1 и вдоль высоты кадра p2:

$$p1 = \frac{ImW \times GSD}{100} \times (1 - overlap), \tag{1}$$

$$p2 = \frac{ImL \times GSD}{100} \times (1 - overlap), \tag{2}$$

где GSD вычисляется по формуле (3):

$$GSD = \frac{h \times Sw \times 100}{F \times ImW},\tag{3}$$

где h – высота полета БЛА, Sw – ширина матрицы (сенсора камеры), F – фокусное расстояние.



Рисунок 6 – Демонстрация перекрытия кадров по ширине и по длине

Продольный шаг (p1) и поперечный шаг (p2) обеспечивают заданное значение перекрытия. На рисунке 6 выше выделены три области, представленные зеленым, желтым и красным цветом, соответствующие различным полученным изображениям и зоне их перекрытия, определяемой длиной и шириной кадра и заданным значением перекрытия. Цветные точки представляют собой последующие положения БЛА, с которого были получены три изображения.

При движении БЛА по эллиптической траектории, описывающей объект интереса, вращение подвеса *θ* рассчитывается по следующей формуле(4):

$$\vartheta = \tan^{-1} \frac{\rho}{h - h_{obj}} \tag{4}$$

где  $\vartheta$  – это расстояние до объекта,  $h_{obj}$  – высота объекта исследования.



Рисунок 7 – Иллюстрация, связывающая параметры, используемые в формулах расчета вращения стабилизатора

При движении БЛА вдоль ОХ, над объектом интереса (рисунок 7), вращение подвеса  $\vartheta$  вокруг оси ОҮ, синхронизировано с движением БЛА на расстояние *x* (м) по оси ОХ и рассчитывается по формуле (5):

$$\vartheta = \tan^{-1} \frac{x - \frac{w}{2}}{h - h_{obj}}$$
(5)

где *х* – это смещение БЛА, а *w* – ширина объекта.

Новизна разрабатываемого метода заключается в использовании особых паттернов движения БЛА при обследовании элементов ЛЭП. Расчет каждой путевой точки при полете БЛА по заданному паттерну траектории происходит динамически в зависимости от параметров камеры и заданного перекрытия кадров. Во время выполнения полетного задания «обследование опоры ЛЭП» БЛА пополняет базу данных типом обнаруженных ключевых элементов и координатами опорных точек, которые необходимы для связи полётных заданий между собой.

Рассмотрим подробнее алгоритмы обследования опоры, траверсов, проводов и верхней части опоры. Для перехода между алгоритмами обследования необходимы координаты опорных точек, которые определяются в первом полетном задании – обследование опоры ЛЭП (рисунок 8). В качестве входных данных алгоритма для обследования ЛЭП используются стартовая точка БЛА и координата точки посадки, минимально допустимое расстояние до опоры, размер кадра камеры и процент перекрытия кадров для расчета единичного перемещения *p1* или *p2*. Все данные задаются вручную сотрудниками оперативно-выездной бригады или заранее в системе.



Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма обследования опоры

В модуле планирования имеется паттерн траектории обследования TOLP с учетом введенных данных. БЛА взлетает, начинает движение вдоль TOLP вверх на p2 и за счет данных с камеры, установленной на борту, выполняет поиск опоры. В случае если опора не была обнаружена на изображении, оператор получит уведомление об этом для того, чтобы он мог принимать дальнейшие решения. Во время движения БЛА на единичное перемещение p2 по TOLP происходит фотографирование опоры с заданным процентом перекрытия. После фотографирования опоры, БЛА необходимо облететь вокруг опоры, используя паттерн траектории CIRP. Во время

движения вдоль CIRP также происходит постоянная фотофиксация всей опоры. Единичное перемещение *p1* рассчитывается, исходя из введенных входных данных. Так как траектория CIRP – это круговая траектория, то координата точки старта и координата конечной точки совпадают.

После полета вдоль CIRP, БЛА возвращается к паттерну траектории TOLP, продолжает движение вверх на расстояние *p*2, учитывая заданный процент перекрытия. Далее CIRP снова повторяется. И так до тех пор, пока не будет обнаружена верхняя часть опоры. Если после обследования опоры на очереди есть другое задание, то БЛА переходит к его выполнению. Если больше полетных заданий нет, то БЛА движется к точке посадки. Примерная траектории обследования будет выглядеть следующим образом (рисунок 9).



Рисунок 9 – Пример траектории обследования опоры ЛЭП

Красными точками отмечены рассчитанные положения БЛА по формулам (1) и (2), относительно введенных параметров: ширины и длины кадра в пикселях и процента перекрытия. В каждом рассчитанном положении БЛА, рассчитывается угол поворота стабилизатора по формулам (4) и (5), чтобы обеспечить перекрытие кадров по всем осям.

Если в полетной миссии обследования есть задание на обследования верхней части опоры, то БЛА действует по алгоритму на рисунке 10. Поиск верхней части опоры в кадре основан на НС по поиску ключевых объектов ЛЭП в кадре в режиме реального времени. Когда верхняя часть обнаружена, БЛА фиксирует своё местоположение и производит снимок верхней части опоры на камеры, работающие в ИК и УФ диапазонах.



Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма обследования верхней части опоры

Ha траверсе находятся изоляторы, арматура другие И важные составляющие ЛЭП, которые необходимо обследовать. Задание на обследование траверсов реализует алгоритм обследования траверсов опоры ЛЭП (рисунок 11).



Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма обследования траверсов опоры

По определенному заранее приоритету, задание на обследование траверсов следует после обследования опоры и обследования верхней части опоры. Процесс обследования аналогичен процессу обследования верхней части опоры. Из базы БЛА получает координату опорной точки для обследования траверсов. БЛА двигается к отправленной координате по наикратчайшему пути, учитывая препятствия. При помощи камеры БЛА детектирует траверс. Обнаружение траверса в кадре основано на HC по поиску ключевых объектов ЛЭП в кадре в режиме реального времени. Когда траверс обнаружен, БЛА фиксирует своё местоположение и производит дополнительный фотоснимок траверса на обычную камеру ИЛИ на специальное оборудование.

Пример обнаружения изоляторов (основных элементов на траверсах) на фотоснимке показан на рисунке 12.



Рисунок 12 – Пример работы НС по обнаружению ключевых элементов опоры

Пример работы HC (рисунок 12), отвечающей за обнаружение ключевых элементов по фотоснимкам, иллюстрирует обнаружение изоляторов опоры ЛЭП. Обнаруженные изоляторы выделены красным прямоугольником.

На рисунке 13 представлен алгоритм обследования проводов с целью выявления дефектов. Задание реализующее обследование проводов следует после обследования траверсов. Опорная координата, откуда следует проводить обследование, отправляется из базы данных на БЛА. Как только БЛА прибыл в назначенную координату происходит поиск проводов. За поиск проводов в кадре отвечает НС, детектирующая ключевые объекты ЛЭП в кадре. Когда провода обнаружены, БЛА начинает двигаться вдоль проводов с заданным шагом, фиксирует свое местоположение и связывает их с фотоснимками проводов [13].



Рисунок 13 – Блок-схема алгоритма обследования проводов

Пример обнаружения проводов на фотоснимке показан на рисунке 14.



Рисунок 14 – Пример работы НС по обнаружению проводов ЛЭП

Для работы HC, отвечающей за обнаружение проводов (рисунок 14), необходимы фотоснимки с обычной камеры.

Во время любого перемещения БЛА на борту функционирует ПО для SLAM навигации «Google Cartographer», которое за счет получаемой информации с камеры глубины удерживает летательный аппарат на безопасном расстоянии от опоры и других её элементов, а также строит трёхмерную карту исследуемой области для дальнейшей навигации БЛА на ней. В ходе выполнения обследования происходит фото- и видеосъемка данных на всем протяжении маршрута. Одновременно с этим происходит корректировка положения БЛА в пространстве, которая обеспечивает не только стабилизацию аппарата от порывов ветра, но и удержание в поле обзора исследуемых объектов.

апробации разработанного Для первичной метода автономного движения БЛА вблизи ЛЭП была выбран фреймворк ROS и симулятор Gazebo. Фреймворк ROS [14] является наиболее удобной платформой, имеющий различные математические инструменты и пакеты программного обеспечения. Кроме того, многие реальные навигационные комплексы имеют свой пакет версий в ROS и очень удобны в интеграции и использовании. Gazebo [15] Gazebo – это симулятор с открытым исходным кодом, является наиболее часто используемым симулятором в ROS. Также мы использовали готовый стек автопилотов БЛА с открытым исходным кодом РХ4 [16]. Разработанная платформа моделирования основана на инструментальной цепочке ROS-Gazebo-PX4 (рисунок 15).



Рисунок 15 – Общая архитектура Gazebo-ROS-PX4

Все компоненты в представленной архитектуре согласованы через разные топики в ROS. В частности, связь между навигационной системой и MAVROS. PX4 осуществляется через Симулятор автопилота PX4 обменивается данными с Gazebo моделью БЛА, чтобы получать данные датчиков из моделируемого мира и отправлять обратно команды двигателям и исполнительным механизмам. В РХ4 функционируют модуль оценки состояния и модуль управления движением на основе расширенного фильтра Калмана (EKF). В Gazebo есть карта окружающей среды, называемая миром или рабочей областью, и модель БЛА. Модель БЛА поддерживает моделирование. Серийные динамическое номера бортовых датчиков, GPS, IMU, барометр И настраиваемую глубины, включая камеру прикрепляются к модели БЛА через плагины Gazebo. Рассмотрим разработанной платформы компоненты моделирования ДЛЯ методов мониторинга ЛЭП.

Динамическая модель в симуляторе соответствует традиционной динамической модели квадрокоптера, которую можно найти в общих работах о динамике и управлении, таких как [17]. БЛА моделируется как твердое тело с 6 степенями свободы (3 степени свободы в положении, 3 степени свободы при вращении).

На модель БЛА была добавлена камера глубины Intel Realsense и настроен датчик IMU для поддержки визуально-инерционной оценки положения. Далее описаны модели камеры и IMU. Визуальный датчик основан на плагине librealsense gazebo. Визуальный датчик в симуляторе состоит из двух камер шкалы серого, цветной камеры и камеры глубины. Выходной сигнал датчика включает в себя два изображения в градациях серого, цветное изображение, изображение глубины, и облако точек. Цветная камера, камера глубины и левая камера установлены в одном и том же звене, что означает, что цветное изображение, изображение глубины, левое изображение в градациях серого и облако точек выровнены. В симуляторе, IMU состоит из 3-осевого акселерометра и 3-осевого гироскопа. Измеренные угловая скорость и ускорение подробно описаны в [18]. Медленные изменения смещения датчика моделируются шумом случайного блуждания или случайным блужданием в дискретное время. То есть производные смещений по времени следуют Гауссовскому распределению. Кроме того, в БЛА. PX4, обновления предоставляемой скорость IMU модели ограничивается MAVROS. Чтобы пересечь ограничение скорости, мы добавляем еще один плагин IMU, который публикует информацию IMU с частотой 200 Гц.

Рабочая область в симуляции состоит из участка ЛЭП. Высота каждой опоры 25 м. Расстояние между опорами 100 м. Рабочая среда изображена на рисунке 16.



Рисунок 16 – Рабочая область с участком ЛЭП и модель БЛА в симуляторе Gazebo. На модели БЛА снизу расположена обычная монокулярная камера, сверху – камера глубины Intel Realsense

Глобальный модуль планирования работает с трехмерной картой рабочей области, чтобы найти кратчайший путь в трехмерном пространстве и вывести целевую точку для локального планировщика. Локальный планировщик работает непосредственно с облаком точек, чтобы избежать потенциального столкновения с препятствиями и спланировать возможную траекторию к локальной цели.

Основным компонентом локального планировщика является метод выборки, поиска путевой точки на основе называемый методом эвристического углового поиска (HAS). Наличие глобального планировщика предотвращает столкновение с известными препятствиями. Глобальный планировщик использует алгоритм RRT для вывода серии путевых точек, которые представляют кратчайший путь. Далее найденный путь сглаживается методом Безье. Цель локального планировщика пути - найти касательную в первой путевой точке кривой Безье [19]. Два планировщика Хотя частота внешнего контура глобального работают параллельно. планировщика низкая, внутренний контур локального планировщика поддерживает высокую частоту обновления и может непрерывно управлять БЛА [18].

В процессе моделирования были созданы модели участка ЛЭП и БЛА с монокулярной камерой и камерой глубины Intel Realsense (рисунок 17).



Рисунок 17 – Полученное изображение с камеры Intel RealSense

Все модули навигации: глобальное планирование, локальное планирование, «Google Cartographer», реализованы в виде пакетов ROS. Все основные темы (topics) ROS вынесены в таблицу 1.

Темы в ROS - это особые шины, по которым узлы (nodes) обмениваются сообщениями (messages). Темы имеют семантику анонимной публикации/подписки, которая отделяет производителя информации от ее потребителя.

В задаче планирования пути для БЛА цель состоит в том, чтобы найти надежный и оптимальный относительно выбранных критериев путь в заданных условиях от стартового воздушного положения до конечной точки. Критериями надежности и оптимальности пути являются: непрерывность найденного пути; отсутствие излишней извилистости пути; длина пути; время, затраченное на поиск пути. Для разработки алгоритма для обследования ЛЭП при помощи БЛА был реализован RRT-алгоритм планирования пути.

Для первичного тестирования алгоритма планирования пути использовался симулятор Gazebo со смоделированным участком ЛЭП. Для первичного тестирования карта обследуемого участка ЛЭП представляет из себя стандартную двумерную карту с указанными препятствиями на ней. В моделировании использовалась стандартная модель БЛА «iris».

Тестирование алгоритма планирования на основе RRT проводилось на ЭВМ с параметрами: процессор Intel Core i5-8250U (1.6 ГГц), память(ОЗУ) 8 Гб DDR4- 2400МГц, видеокарта nVidia GeForce MX 150 2 Гб GDDR5, основной жесткий диск SSD M.2 256 Гб (3300 МБ/с — чтение с диска; 1200 МБ/с запись на диск).

Таблица 1 - Основные темы ROS для обмена сообщениями между модулями

Название темы	Тип сообщения	Комментарий	
		Серое изображение	
/camera/inira1/image raw	sensor msgs/image	левой камеры	
	/ <b>I</b>	Серое изображение	
/camera/infra2/image raw	sensor msgs/image	правой камеры	
//1/	/ <b>I</b>	Изображение цветной	
/camera/color/image raw	sensor msgs/image	камеры	
/camera/depth aligned to		Изображение глубины	
color and infra1/image	sensor msgs/Image		
raw			
/camera/depth/color/points	sensor msgs/PointCloud2	Облако точек	
/iris/imu	sensor msgs/Imu	Данные IMU	
lating has link in	nou maga/Odomotry	Истинные значения	
/gt ins base mik miu	nav msgs/Odometry	IMU	
/imu path	nav msgs/Path	Путь по скорости IMU	
/vision noth	nav mege/Path	Путь со скоростью	
	nav msgs/1 am	видимости	
		Выходное изображение	
/vo img0	sensor msgs/Image	с цветными	
		ориентирами	
/vo imal	sensor mags/Image	Цветное изображение с	
/ vo migi	sensor msgs/mage	камеры глубины	
/globalman	visualization	Визуализация	
/giobannap	msgs/Marker	глобальной карты	
/localmap	visualization	Визуализация	
	msgs/Marker	локальной карты	
/jps path	nav mege/Path	Глобальный путь на	
	nav msgs/1 am	карте сетки	
/local wp	visualization	Путевая точка	
	wisualization mege/Marker	локального модуля	
	iiisgs/iviaikei	планирования	
		Временная цель для	
/global goal	geometry msgs/Point	локального	
		планирования	
/mavros/setpoint	geometry	Команда скорости для	
velocity/cmd vel	msgs/PoseStamped	контроллера РХ4	

На рисунке 18,а представлена карта обследуемого участка ЛЭП. Данный участок состоит из двух опор и воздушных линий электропередач между ними. На карте участок ЛЭП включает два квадрата соединенные между собой прямыми линиями, что соответствует опорам участка ЛЭП и проводам. Расстояние между опорами составляет 100 м. Стартовая воздушная точка имеет координаты (-7; -7), конечная точка – (7; 107).



Рисунок 18 – Карта обследуемого участка ЛЭП: а) карта с подписанными элементами участка ЛЭП, б) карта с построенной траекторией для БЛА при помощи RRT-алгоритма

Используя RRT-алгоритм, планируется траектория полета для БЛА из стартовой точки в конечную (рисунок 18, б). Траектория строится таким образом, чтобы БЛА двигался на безопасном расстоянии вдоль ЛЭП. Зеленые линии на рисунке 18,6 показывают древо генерации пути. Красными линиями на рисунке 18,6 изображен путь, приводящий к столкновениям с опорами или проводами ЛЭП. Розовая линия на рисунке 18,6 является найденной спланированной траекторией. Далее полученная траектория сглаживается при помощи метода Безье и отправляется на полетный контроллер БЛА для использования в среде моделирования Gazebo.

На рисунке 19 показан смоделированный мир, состоящий из обследуемого участка ЛЭП и БЛА «iris» с камерой Intel Realsense в Gazebo. После получения спланированной траектории, БЛА начинает свое движения из начальной точки. Полетная миссия спланирована так, что после вертикального взлета, двигаясь вдоль спланированной траектории, БЛА пролетает рядом с ключевыми объектами ЛЭП (изоляторы, стойки, провода).



Рисунок 19 – Тестовый стенд в среде моделирования Gazebo

Закончив обследование по заданной траектории, БЛА совершает вертикальную посадку в конечной точке.

На рисунке 20 показаны эксперименты, проведенные в Gazebo.



Рисунок 20 – Траектория полета в симуляторе Gazebo

Средняя скорость БЛА задается оператором заранее и составляет 5,1 км/ч (~1,4 м/с). На графиках (рисунок 20) изображены траектории полета БЛА. Зеленая линия – это траектория, найденная при помощи RRT-алгоритма. Красная линия – это скорректированная траектория, основанная на показаниях датчиков внешней среды БЛА и его полетного контроллера.

Эта траектория рассчитывается на борту БЛА после получения найденной траектории с поправкой на внешние условия. Синей линией показана фактическая траектория, по которой двигался БЛА. На рисунке 20,а показаны результаты эксперимента без использования в симуляции ветра. Отклонения траекторий от найденной минимальны и это обусловлено техническими характеристиками используемого БЛА. На рисунке 20,6 показана траектория полета при подключении в симуляции ветра. Ветер моделируется со случайной стороны в случайные моменты времени и его скорость составляет 15 м/с. В случае изображенном на рисунке 20,а продолжительность полета составляет 1 минута 40 секунд и длина пути равна 214,2 м. В случае изображенном на рисунке 20,6 продолжительность полета составляет 2 минуты 41 секунду и длина пути равна 224,4 м. Ветер создает трудности при но полетный контроллер позволяет компенсировать полете, данные возмущения и придерживаться спланированной траектории. Максимальное отклонение фактической траектории составляет 5 метров, что является допустимым, т.к. опоры на карте представлены квадратом с площадью равной площади основания опоры ЛЭП. Т.е. размер препятствий на карте представлен с запасом. Результаты экспериментов показывают, что заранее найденная траектория полета БЛА с использованием алгоритма RRT пригодна для обследования участка ЛЭП даже при наличии ветра.

Спланированная траектория для двух участков ЛЭП с одной угловой опорой показана на рисунке 21.



Рисунок 21 – Спланированная траектория для двух участков ЛЭП с одной угловой опорой

Время вычисления и поиска траектории для БЛА напрямую зависит от количества исследованных узлов, шага алгоритма и площади рабочего

участка. Среднее время работы RRT-алгоритма для одного и двух участков ЛЭП (рисунок 21) составляет не более 1 с. Для поиска траектории движения ЛЭП необходимы БЛА вдоль минимальные временные ресурсы. Разработанный алгоритм планирования траектории между опорными точками может работать с минимальными задержками по времени на больших расстояниях при обследовании ЛЭП в реальных условиях.

# 2. Разработка подхода к определению состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах

В ходе выполнения проекта был разработан подход к определению состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений, снятых с БЛА в различных спектрах. Для решения этой задачи был проведен обзор современных исследований и тестирование подхода к определению состояния элементов на наборе данных [20] при помощи НС.

На первом этапе выполнения проекта был проведен обзор современных методов мониторинга состояния элементов конструкции ЛЭП посредством обработки изображений в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах [21]. Методы, предназначенные для обработки изображений в видимом спектре, основываются на алгоритмах глубокого и машинного обучения. Наибольшую эффективность для выявления дефектов в видимом спектре показали GVN, HOG и SVM, SSD, Grab cut, cascading CNN, LBP-HF+SVM, DMNN, VGG-19, LBP и ULBP, YOLO v3, DELM и LRF, SVM, Faster R-CNN, CNN, стереозрение и PLAMEC. Методом детектирования с наибольшей эффективностью для ИК-спектра является Оцу и пороговая обработка, а для УФ-спектра – метод SVR.

С развитием технологий управления БЛА и обработки изображений, проверка состояния элементов ЛЭП становится все проще и сводится к разработке подходов анализа аэрофотоснимков в различных спектрах. В этой области наиболее перспективными являются методы извлечения и анализа отличительных признаков объектов (feature-based methods), в особенности, методы, основанные на технологиях машинного обучения. В свою очередь, наиболее перспективными методами машинного обучения для решения задач являются методы глубокого обучения компьютерного зрения [22], основанные на применении сложных нейросетевых архитектур. Наиболее распространенными решениями задачи детекции визуальных объектов являются методы, основанные на применении СНС, к которым относятся R-CNN [23], Fast R-CNN [24], Faster R-CNN [25], YOLO [26], R-FCN [27], SSD [28]. Применяются также методы для классификации неисправностей на ЛЭП вейвлет-подход [29] и подход нечеткой логики [30]. Все эти методы направлены на решение задачи детекции визуальных объектов на

изображении, а, следовательно, имеют перспективу для применения в задаче обнаружения дефектов ЛЭП на аэрофотоснимках.

На рисунке 22 проиллюстрирован разработанный подход к определению состояния элементов ЛЭП. Как было описано ранее для анализа изображений в различных спектрах были выбраны следующие элементы: опоры, траверс с изолятором, провода и верхняя часть опоры.



Рисунок 22 - Основные этапы подхода к определению состояния элементов ЛЭП

В основе подхода к определению состояния ЛЭП лежит разработанный метод планирования движения БЛА для проведения обследования ЛЭП. Первым этапом метода планирования движения БЛА является создание полетной миссии оператором. Миссия состоит из полетных заданий по обследованию ключевых элементов. Все возможные полетные задания описаны в модели состояний на рисунке 1. После получения полетной миссии от оператора, БЛА начинает движение. Сперва БЛА обследует опоры ЛЭП. БЛА двигается вдоль оригинальных паттернов траекторий (рисунки 3 и 4) и одновременно с этим обновляет БД об опоре. В БД записывается координата опорной точки, где был обнаружен ключевой элемент ЛЭП. Помимо координаты опорной точки в БД заносится информация о типе обнаруженного элемента и снимок в видимом, ИК- и УФ- спектрах. Для переключения между полетными заданиями БЛА необходимо двигаться от одной опорной точки к другой. Поэтому необходимо спланировать траектории, связывающие эти опорные точки. Расчет данных траекторий

основан на RRT алгоритме (рисунок 18). Далее БЛА двигается от одной опорной точки до другой вдоль рассчитанных траекторий в заданном порядке обследования элементов. Все собранные данные (фотографии в видимом, ИК- и УФ спектрах) анализируются на определение состояния элементов ЛЭП посредством поиска дефектов на всех изображениях. В таблице 2 представлены возможные дефекты на различных элементах.

Таблица 2 - Дефекты ЛЭП

Спектр	Тип элемента и дефекты	Диапазон	Метод		
	Провода и тросы (обрыв, нарушение целостности, наличие посторонних объектов)			GVN, HOG и SVM, SSD, YOLO, Mask R-CNN Grab cut, cascading CNN, LBP-	
В	Изоляторы (отсутствие тарелки, сколы, обледенение)		НС	HF и SVM, DMNN, VGG-19, LBP и ULBP, YOLO, FPN, MTCNN, Viola-Jones	
	Опоры (наклон, смещение в грунте, падение, коррозия металла, посторонние объекты)	400 -760 нм		YOLO, DELM и LRF	
	Арматура (трещины, перетирания и деформация отдельных частей, отсутствие деталей)			Faster R-CNN	
	Трасса (наличие посторонних объектов: строений, стогов сена, деревьев и т.п.)			Стереозрение и PLAMEC, YOLO	
	Провода и тросы (оплавление проволок, нарушение целостности)		Оцу и пороговая обработка		
ИК	Арматура (трещины, перетирания и деформация отдельных частей)	760 – 2500 нм			
	Изоляторы (загрязнение поверхности изоляторов)				
УФ -	Коронный разряд на изоляторах	240 – 280 нм	SVR		
	Загрязнение поверхности	230 - 400			
	изоляторов	HM			

В таблице 2 указаны спектральные диапазоны, в которых они находятся дефекты и рассмотрены методы обработки, которые можно применить для детектирования неисправностей.

Анализ собранных данных (изображений элементов ЛЭП) в видимом, ИК- и УФ-спектрах осуществляется с помощью методов нейронных сетей, вейвлет-подхода и нечеткой логики (НЛ) [31]. Вейвлет-подход может использоваться для обнаружения неисправностей и оценки векторов сигналов тока и напряжения в проводах, которые необходимы для защиты ЛЭП. Преимущество подхода заключается в возможности классификации разломов. Нечеткая логика позволяет выявлять предаварийные ситуации, Однако, применение HC например короткое замыкание. позволяет определить большее количество дефектов. Кроме того, метод обнаружения дефектов посредством НС можно адаптировать к разным спектрам (нахождение горячих точек по цвету, и поиск коронного заряда на изображении). В дальнейшем разработанный подход может быть расширен, дополнен и скомбинирован с приведенными методами при необходимости.

дефектов Тестирование метода поиска посредством обработки изображений, снятых с БЛА, проводилось при помощи НС YOLO. Далее представлен эксперимент по детектированию дефектов изолятора на наборе данных [20] в видимом спектре, где сравниваются алгоритмы YOLOv3, YOLOv4 и их упрощенных версий. На рисунке 23 проиллюстрированы детекции поврежденных изоляторов нейронными результаты сетями YOLOv3 и YOLOv4.







(3)
(4)
Рисунок 23 – Результаты детекции YOLOv3 (1), YOLOv3-tiny (2), YOLOv4
(3) YOLOv4-tiny (4)

	2	1	, ,	
	Precision	Recall	mAP@.50	mAP@.75
YOLOv3	0,96±0,03	0,95±0,02	0,97±0,02	0,78±0,03
YOLOv3-tinv	0,97±0,02	0,96±0,03	0,97±0,03	0,78±0,04
YOLOv4	$0,74{\pm}0,05$	0,68±0,04	0,74±0,03	0,71±0,04
YOLOv4-tiny	0,61±0,04	0,79±0,03	0,86±0,04	0,74±0,03

Результаты экспериментов приведены в Таблице 3.

Детекторами были показаны результаты точности детекции a также

Таблица 3 – Результаты экспериментального исследования HC YOLO

 $(mAP@0,50=0,97\pm0,03; mAP@0,75=0,78\pm0,04),$ статистически значимые различия в этих результатах. На следующем этапе выполнения проекта планируется провести сравнительное исследование с другими методами детекции и разработать комплексный подход, который включает детектирование и анализ дефектов для всех типов элементов ЛЭП в различных спектрах.

#### 3. Создание базы данных снимков ЛЭП в различных спектрах

В рамках реализации проекта была поставлена задача создания БД снимков ЛЭП. База данных снимков нужна для анализа и тестирования разработанного подхода к определению на изображениях необходимых элементов и детектировании дефектов на них.

Создание набора данных является трудозатратным и длительным процессом, так как требует кропотливого ручного выделения дефектов на изображении. Однако существует и другое решение данной проблемы – аугментация (искусственная генерация данных). Метод генерации синтетических изображений для обучения нейросетей активно развивается в настоящее время. Он позволяет получить как труднодоступные данные, так и размножить существующие. Наиболее простым и часто используемым способом создания синтетических данных является применение случайных преобразований к исходным изображениям: обрезка, сдвиг, поворот, масштабирование, гауссово размытие, изменение контраста и цветности.

Особенно остро встает вопрос о сборе и разметке новых выборок данных, содержащих большое количество различных классов дефектов ЛЭП, а также широкую вариативность экземпляров этих классов. В следующем подразделе описан процесс создания БД.

Главной залачей создания релевантной БД является разметка изображений. Аннотированные изображения нужны в качестве вводных данных для обучения нейронных сетей и распознавание объектов на изображениях.

Создание БД для анализа системой компьютерного зрения включает в себя несколько этапов: получение снимков с БЛА в различных спектрах; создание датасета для каждого спектра; разметка полученных снимков; поиск и интеграция существующих в открытом доступе наборов данных (рисунок 24).

БД для решения поставленной задачи, должна характеризоваться следующими особенностями: большое количество образцов; высокое качество изображений; разнообразие на изображении анализируемых объектов (положение, поворот, масштаб, освещение, затемнение), разный фон.

Процесс создания БД представлен на рисунке 24.



Рисунок 24 - Основные этапы создания БД

Основное внимание в процессе создания набора обучающих данных для СНС направлено на уменьшение количества обучающих кадров. Улучшение качества обучающего набора данных значительно сокращает время предварительной обработки и обучения архитектур нейронных сетей. Для решения задачи тестирования подхода из раздела 2 было решено использовать существующие открытые БД для получения результатов.

В открытом доступе на данный момент существует пять наборов данных с элементами ЛЭП (Таблица 4).

Набор данных CPLID, на котором проходило тестирование описанного выше подхода [32],[20] состоит из 848 изображений, снятых на БЛА. Этот набор данных разделен на две части. Первая часть Normal\_Insulators содержит нормальные изоляторы захвата БпЛА. Количество изображений нормального изолятора – 600. Вторая Defective\_Insulators содержит изоляторы с дефектом. Количество образов дефектных изоляторов – 248. Для

решения задачи детектирования дефектов ЛЭП была взята именно эта выборка.

таолица 4 – наооры данных для детектирования дефектов л.этт			
Тип элемента ЛЭП	Ссылка		
Изолятор (изображения с дефектом (без крышки))	Insulator Data Set - Chinese Power Line Insulator Dataset (CPLID). Доступно по: <u>https://github.com/InsulatorData/InsulatorDataSet</u> (дата обращения: 16.12.2021).		
Башня (различные типы башен и фонов)	Transmission Tower DataSet in VOC data format. Доступно по: <u>https://drive.google.com/drive/folders/1UyP0fBNUqF</u> eoW5nmPVGzvFG5IOZcqlc5 (дата обрашения:		

Набор данных (инфракрасный и видимый

свет), провода

Набор данных для

обнаружения повреждений

изолятора

Набор данных для

обнаружения объектов

линий электропередач

16.12.2021).

Ömer Emre Yetgin, Ömer Nezih GEREK. Powerline Image Dataset (Infrared-IR and Visible Light-VL).

2019. Доступно по: https://data.mendeley.com/datasets/n6wrv4ry6v/8

(дата обращения: 16.12.2021).

Dataset for insulator fault detection Доступно по:

https://figshare.com/articles/dataset/66KVimage\_zip/ 14992944 (дата обращения: 16.12.2021).

STN PLAD: A Dataset for Multi-Size Power Line

Assets Detection in High-Resolution UAV Images.

Доступно по: <u>https://github.com/andreluizbvs/PLAD</u>

(дата обращения: 16.12.2021).

ΠΩΠ

Набор данных CPLID - это набор данных изоляторов ЛЭП Китая, снятый в 2016 году. В данной выборке представлен один класс повреждений ЛЭП, а именно, отсутствующий изолятор. Поскольку аэрофотоснимки повреждений изолятора редки для получения как можно большего количества таких изображений на основе набора образцы смоделированных данных повреждений изолятора были созданы синтетически. Помимо этого, набор данных содержит в себе всего один класс дефектов ЛЭП, а также малый объем выборки размеченных изображений.

Набор данных [33] содержит всего 8400 изображений, собранных с видимых и инфракрасных камер в равном количестве.

Набор данных [34] включает 1300 изображений, основным объектом является опора (башня) ЛЭП. Большинство изображений собрано из видео инспекций и интернета. Включены различные виды башен с разным фоном.

Набор данных для обнаружения повреждений изолятора [35] содержит 212 размеченных изображений и 204 обычных фотоснимков изоляторов.

В работе [36] предлагается набор данных STN Power Line Assets Dataset [37], содержащий реальные изображения с высоким разрешением нескольких компонентов ЛЭП. Он содержит 2409 аннотированных объектов, разделенных на пять классов: опора ЛЭП, изолятор, распорка, пластина опоры и демпфер Стокбриджа, которые различаются по размеру, ориентации, освещению, углу наклона и фону.

В рамках реализации проекта упомянутые выше наборы данных были собраны в одну БД. К данной БД были размечены и добавлены собственные снимки с БЛА: в видимом спектре - 1000 фотографий, в ИК спектре - 550 фотографий и в УФ спектре - 1498 фотографий.

В итоге, в собранной БД для анализа снимков ЛЭП в различных спектрах содержится: в видимом спектре - 7566 фотографий (собственные и из открытого доступа), в ИК спектре 2550 фотографий (собственные и из открытого доступа), в УФ спектре 1498 собственных фотографий.

## Заключение

В результате за 2021 год по проекту были выполнены следующие задачи: разработка метода планирования движения БЛА для проведения фотосъемки ЛЭП; разработка подхода к определению состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах; создание базы данных снимков ЛЭП в различных спектрах.

В основе предлагаемого метода автоматизированного обследования ЛЭП лежит оригинальный процесс детектирования ключевых элементов. Ключевыми элементами являются сама опора, траверсы, провода и верхняя часть опоры. Для движения с целью обследования ключевого элемента ЛЭП, определенного полетным заданием, БЛА использует паттерн траектории. В контексте данной работы паттерн траектории понимается как множество логически допустимых путей обследования ключевых элементов ЛЭП. Для того, чтобы двигаться, основываясь на этих паттернах, необходимо рассчитывать путевые точки. Расчет каждой путевой точки происходит динамически в зависимости от параметров камеры и заданного перекрытия кадров. Во время выполнения полетного задания «обследование опоры ЛЭП» БЛА пополняет базу данных типом обнаруженных ключевых элементов и координатами опорных точек, которые необходимы для связи полетных

заданий между собой. Кроме того, во время движения БЛА посредством SLAM алгоритма "Google Cartographer" строит трехмерную карту обследуемой местности для навигации на ней. Для движения между опорными точками был выбран RRT алгоритм.

В работе описана платформа моделирования БЛА для исследования вопрос навигации. Также были продемонстрированы результаты первичной апробации автономной навигации и тестовые полёты в симуляторе.

Был разработан подход к определению состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах. Данный подход обеспечивает детектирование определенных дефектов опор, траверсов, изоляторов, проводов и креплений в опорных ключевых точках пространства при их достижении. Подход состоит из следующих этапов: создание полетной миссии оператором, движение БЛА по имеющимся паттернам траекторий, создание базы данных снимков элементов ЛЭП в видимом, ИКи УФ-спектрах, переход между полетными заданиями в опорных точках и анализ собранных изображений на наличие дефектов элементов ЛЭП.

На основе полученных результатов, в 2022 году необходимо решить следующие задачи: разработка подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП при помощи БЛА (комплексный подход, который включает автономное движение БЛА, детектирование ключевых элементов ЛЭП и анализ дефектов); разработка ПО для реализации автоматизированного подхода к мониторингу ЛЭП; анализ полученных данных по результатам тестирования подхода автоматизированного мониторинга ЛЭП; подготовка серии статей для публикации в высокорейтинговых российских и зарубежных изданиях, индексируемых в РИНЦ и SCOPUS/WoS.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Салтыков А. А. Использование БПЛА для оценки состояния ВЛЭП //Энергетика и энергосбережение: теория и практика. – 2020. – С. 252-1-252-3

2. Gmapping [Электронный ресурс] URL: http://wiki.ros.org/gmapping, свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 14.08.2020 г.

3. Google Cartographer ROS [Электронный ресурс] URL: https://google-cartographer-ros.readthedocs.io/en/latest/#, свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 04.11.2020 г.

4. RTAB-Map, Real-Time Appearance-Based Mapping [Электронный pecypc] URL: http://introlab.github.io/rtabmap/, свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 22.06.2020 г.

5. Quigley M. et al. ROS: an open-source Robot Operating System //ICRA workshop on open source software.  $-2009. - T. 3. - N_{\odot}. 3.2. - C. 5.$ 

6. da Silva B. M. F., Xavier R. S., Gonçalves L. M. G. Mapping and Navigation for Indoor Robots under ROS: An Experimental Analysis. – 2019

7. Google Cartographer ROS [Электронный ресурс] URL: https://google-cartographer-ros.readthedocs.io/en/latest/#, свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 04.11.2020 г.

8. Yagfarov R., Ivanou M., Afanasyev I. Map comparison of lidar-based 2d slam algorithms using precise ground truth //2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). – IEEE, 2018. – C. 1979-1983

9. Noreen I., Khan A.A Comparison of RRT, RRT\* and RRT\*-Smart Path Planning Algorithms // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. - Volume.16 (10). – 2018. – C. 20-27

10. Кренев А. А. О вопросах семантической сегментации на облаках точек во времени через поиск поведенческих паттернов движения для целей трекинга объектов, регистрируемых лидаром. – 2021

11. Bian J. et al. A point-line-based SLAM framework for UAV close proximity transmission tower inspection //2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – IEEE, 2018. – C. 1016-1021

12. Гизатуллин Рифнур Марселевич, Дроздиков Валерий Андреевич, Константинов Эдуард Сергеевич Моделирование функционирования элементов электронных систем БПЛА при воздействии излучаемых электромагнитных помех высоковольтной линии электропередачи // Вестник КГЭУ. 2019. №4(44)

13. Шабанова А. Р., Толстой И. М., Лебедев И. В. Способ построения безопасных траекторий движения беспилотного летательного аппарата при мониторинге линий электропередач в условиях влияния электромагнитных полей //Проблемы региональной энергетики. – 2019. – №. 3 (44)

14. M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng. ROS: an open-source Robot Operating System //ICRA workshop on open source software.  $-2009. - T. 3. - N_{\odot}. 3.2. - C. 5.$ 

15. Koenig N., Howard A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator //2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566). – IEEE, 2004. – T. 3. – C. 2149-2154

16. Meier L., Honegger D., Pollefeys M. PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms //2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). – IEEE, 2015. – C. 6235-6240

17. Mahony R., Kumar V., Corke P. Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor //IEEE Robotics and Automation magazine. –  $2012. - T. 19. - N_{\odot}. 3. - C. 20-32$ 

18. Chen S. et al. End-to-end UAV simulation for visual SLAM and navigation //arXiv preprint arXiv:2012.00298. – 2020

19. Choi J., Curry R., Elkaim G. Path planning based on bézier curve for autonomous ground vehicles //Advances in Electrical and Electronics Engineering-IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008. – IEEE, 2008. – C. 158-166

20.Insulator Data Set - Chinese Power Line Insulator Dataset (CPLID).Доступнопо:https://github.com/InsulatorData/InsulatorDataSet(датаобращения:16.12.2021).

21. Астапова М.А., Лебедев И.В. Обзор подходов к детектированию дефектов элементов ЛЭП на изображениях в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020;8(4):38-39

22. Bian J., Hui X., Zhao X., Tan M. A monocular vision-based perception approach for unmanned aerial vehicle close proximity transmission tower inspection. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2019;16(1):1729881418820227

23. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2017:2961–2969

24. Girshick R. Fast R-CNN. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015:1440–1448.

25. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2016;39(6):1137–1149

26. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016:779-788.

27. Pál D., Póczos B., Szepesvári C. Estimation of Rényi Entropy and Mutual Information Based on Generalized Nearest-Neighbor Graphs. Advances in neural information processing systems. 2010:1849-1857

28. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.-Y., Berg A.C. SSD: Single shot multibox detector. European conference on computer vision. Springer, Cham. 2016:21-37.

29. Nayak B. L. Classification of transmission line faults using wavelet transformer //Int. J. Eng. Sci. Res. Technol. – 2014. – №. February. – C. 568-574.

30. Prasad A. et al. Classification of faults in power transmission lines using fuzzy-logic technique //Indian Journal of Science and Technology.  $-2015. - T. 8. - N_{\odot}. 30. - C. 1-6.$ 

31. Prasad A., Edward J. B., Ravi K. A review on fault classification methodologies in power transmission systems: Part—I //Journal of electrical systems and information technology.  $-2018. - T. 5. - N_{\odot}. 1. - C. 48-60.$ 

32. Tao X., Zhang D., Wang Z., Liu X., Zhang H., Xu D. Detection of Power Line Insulator Defects Using Aerial Images Analyzed With Convolutional Neural Networks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2020;50(4):1486–98 33. Ömer Emre Yetgin, Ömer Nezih GEREK. Powerline Image Dataset (Infrared-IR and Visible Light-VL). 2019. Доступно по: https://data.mendeley.com/datasets/n6wrv4ry6v/8 (дата обращения: 16.12.2021)

34. Transmission Tower DataSet in VOC data format. Доступно по: https://drive.google.com/drive/folders/1UyP0fBNUqFeoW5nmPVGzyFG5IQZcql c5 (дата обращения: 16.12.2021)

35. Dataset for insulator fault detection Доступно по: https://figshare.com/articles/dataset/66KVimage\_zip/14992944 (дата обращения: 16.12.2021)

36. Vieira-e-Silva A. L. B. et al. STN PLAD: A Dataset for Multi-Size Power Line Assets Detection in High-Resolution UAV Images //2021 34th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI). – IEEE, 2021. – C. 215-222.

37. STN PLAD: A Dataset for Multi-Size Power Line Assets Detection in<br/>High-ResolutionHigh-ResolutionUAVImages.Доступнопо:https://github.com/andreluizbvs/PLAD (дата обращения: 16.12.2021)