

# **Отчет о выполнении проекта РФФИ № 20-08-01056 А «Разработка подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП при помощи БпЛА, включающего планирование движения БпЛА и определение состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах» за 2022 г.**

## **Аннотация**

Использование автономных беспилотных летательных аппаратов (БпЛА), оборудованных специализированными средствами съемки, позволяет автоматизировать процесс инспекции линий электропередач (ЛЭП). В рамках данной работы предлагается новая методика построения траекторий движения БпЛА, отличающаяся формированием параметров траектории с учётом конструкционных особенностей ЛЭП (пространственное расположение и геометрические характеристики башен ЛЭП, и ключевых элементов (КЭ) ЛЭП), и требований к собираемым данным (наличие повреждений в кадре, репрезентативность объектов, унифицированность представленных объектов). Предлагаемая методика состоит из следующих шагов: предварительный анализ предметной области и определение основных ее составляющих (описание конструкционных особенностей ЛЭП; описание рассматриваемых повреждений ЛЭП), определение требований к собираемым данным, формирование траектории для каждой задачи, моделирование сцен в имитационной среде и определение конструкционных особенностей опор ЛЭП, выполнение полета, сбор и постобработка данных, выполнение разметки полученных данных и анализ выполненной разметки.

В ходе создания методики был разработан подход к автоматизированному мониторингу состояния ЛЭП в основе которого лежит принцип динамического планирования движения БпЛА относительно элементов ЛЭП. Первым этапом при планировании движения БпЛА является создание полетной миссии оператором. Миссия состоит из полетных заданий по обследованию ключевых элементов, после получения полетной миссии от оператора БпЛА начинает движение относительно ЛЭП. На первом этапе БпЛА обследует опоры ЛЭП. БпЛА двигается вдоль заданных паттернов траекторий и одновременно с этим обновляет базу данных (БД), содержащую сведения 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, инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) спектрах. Для переключения между полетными заданиями БпЛА необходимо перемещаться от одной

ключевой точки к другой. БпЛА двигается от одной опорной точки до другой в заданном порядке обследования элементов на основе разработанного алгоритма динамического планирования путевых точек, учитывающего минимально допустимое расстояние до ЛЭП, параметры камеры и динамику перемещения БпЛА. Все собранные данные (фотографии в видимом, ИК- и УФ спектрах) анализируются системой поиска дефектов элементов ЛЭП на изображениях для определения состояния элементов ЛЭП с использованием методов машинного обучения.

Для проверки работоспособности методики съемки ключевых элементов (траверс с изолятором, верхняя часть опоры, провода, опора) ЛЭП для выявления повреждений ЛЭП в имитационной среде моделирования была выполнена симуляция автономной инспекции повреждений элементов для трех видов ЛЭП посредством автономного БпЛА. В результате была собрана выборка изображений в видимом, ИК и УФ спектрах, состоящая из 1300 изображений, на которых представлено 1376 уникальных ракурсов 17 симулированных повреждений, унифицированных для каждого типа ЛЭП, что свидетельствует о перспективе данной методики для построения траекторий автономного полета БпЛА с целью сбора репрезентативных выборок данных о повреждениях ЛЭП в видимом, УФ и ИК спектрах. 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 проводов. Наличие данной информации позволяет выявить такие дефекты, как пробой изолятора, нагрев проводов. Снимки ЛЭП в УФ спектре позволяют зафиксировать наличие коронного разряда на проводах линий электропередач, который вызывает значительные потери передаваемой энергии.

На первом этапе выполнения проекта был проведен обзор современных методов мониторинга состояния элементов конструкции ЛЭП посредством обработки изображений в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах. 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, LBPHF+SVM, DMNN, VGG-19, LBP и ULBP, YOLO v3, DELM и LRF, SVM, Faster R-CNN, CNN, стереозрение и PLAMEC. В ходе работы была собрана база данных, которая включает в себя 7566 снимков в видимом спектре. В итоге было проведено исследование метода детекции в видимом спектре конкретного дефекта ЛЭП – отсутствие изолятора. Детекция выполнялась на основании обработки изображений в видимом спектре, снятых с БпЛА и составляющих размеченную выборку. Обработка изображения проводилась посредством

нейронных сетей семейства YOLO. Сравнительный анализ YOLOv3, YOLOv4 и их упрощенных версий показал хорошие результаты точности выявления дефекта (отсутствие изолятора) при помощи YOLOv3-tiny ( $mAP@0,50=0,97\pm 0,03$ ;  $mAP@0,75=0,78\pm 0,04$ ).

Полученные при моделировании снимки в ходе апробации были подвергнуты обработке для детектирования и анализа дефектов элементов ЛЭП в видимом, ИК и УФ-спектрах, полученные при обследовании посредством БПЛА. Рассматриваемые дефекты в различных спектрах имеют значительную контрастность на изображениях, поэтому для выявления дефектов ЛЭП перспективными выглядят методы сегментации, основанные на анализе распределения яркостей пикселей изображения. Приоритетным способом локализации повреждений является семантическая сегментация, т.к. позволяет выделять геометрическую форму и место на изображении в условиях съемки объектов с различных ракурсов. Задача локализации повреждений ЛЭП в различных спектрах была решена посредством сегментации элементов объекта – формирования маски, повторяющей форму объекта определённого класса на изображении. Для общей оценки эффективности семантической сегментации в данной работе использовался индекс Джаккара. В общей задаче семантической сегментации наилучшие результаты показывают глубокие сверточные нейронные сети. В рамках данного проекта были рассмотрены две распространенных нейросетевых архитектуры: сверточный автокодировщик (САК) и U-Net и метод пороговой фильтрации для выявления нагрева проводов в ИК-спектре и коронного разряда в УФ-спектре. Каждая модель обучалась 200 эпох при помощи модифицированного алгоритма стохастического пакетного (mini-batch) градиентного спуска Adam со стандартными параметрами из библиотеки pytorch. Полученные результаты на основе метрики IoU для отдельных классов: нагрев проводов в ИК спектре (САК - 0.551, U-Net - 0.554, пороговая фильтрация - 0.535), коронный разряд в УФ спектре (САК - 0.759, U-Net - 0.767, пороговая фильтрация - 0.752). Метод пороговой фильтрации, выполняющийся на CPU значительно превосходит рассматриваемые нейронные сети, выполняющиеся на GPU, по времени обработки (в 21.6 раза САК и в 26.4 раза U-Net). В совокупности делает рассмотренный метод пороговой фильтрации наиболее перспективным для реализации на бортовом вычислительном устройстве БПЛА или мобильной наземной станции.

В рамках данной работы была разработана методика построения траектории автономного движения БПЛА в ходе инспекции ЛЭП в видимом, ИК и УФ спектрах, которая отличается новым принципом динамического формирования траекторий, основанном на анализе конструкционных

особенностей инспектируемых ЛЭП, а также учитывающая требования репрезентативности и унификации собираемых данных. Данный подход глобального планирования значительно ускоряет процесс создания миссии (в 1,5 раза), а время полета БПЛА в автономном режиме по расчетной траектории уменьшилось на 11% по сравнению с временем полета в ручном режиме и позволяет значительно упростить работу оператора при использовании БПЛА. В результате экспериментов было получено среднее отклонение фактической траектории движения БПЛА от сгенерированной глобальным планировщиком траектории обследования ЛЭП. Для расчета были использованы две метрики: расстояние Хаусдорфа и OWD. В результате сравнения удалось установить, что максимальное отклонение не превышает 0.4 м, что допустимо при движении рядом с трассой ЛЭП. Научная новизна методики заключается в планировании траектории полета малого БПЛА мультироторного типа с учетом конструкционной особенности конкретных ЛЭП, а также с учетом требований к собираемым визуальным данным в видимом, ультрафиолетовом и инфракрасном спектрах.

Автономность полета приводит к снижению трудозатрат, а единообразие траектории автономного полета для ЛЭП и инспектируемого повреждения определенных типов обеспечивает унификацию получаемых данных для соответствующих типов ЛЭП. Кроме того, сокращается время поиска дефектов (повреждений) на изображениях, по сравнению с ручным обследованием.

Опубликовано 5 статей в научных журналах, индексируемых в базах Scopus/WoS, RSCI и РИНЦ. Результаты проведенных исследований представлены на 4 международных конференциях, с последующим опубликованием материалов в сборниках трудов данных научных мероприятий.

### **Abstract**

The use of autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with specialized means of shooting makes it possible to automate the process of inspection of power lines (PLs). As part of this work, a new method of constructing UAV trajectories is proposed, characterized by the formation of trajectory parameters taking into account the structural features of PLs (spatial location and geometric characteristics of power transmission towers, and key elements (KE) of PLs), and the requirements for the collected data (the presence of damage in the frame, the representativeness of objects, the uniformity of the objects presented). The proposed methodology consists of the following steps: a preliminary analysis of the subject area and the definition of its main components (description of the structural features of PLs; description of the considered PLs damages), definition of requirements for the collected data, formation of a

trajectory for each task, modeling of scenes in a simulation environment and determination of structural features of PLs supports, flight performance, data collection and post-processing, marking of the received data and analysis of the performed marking.

During the creation of the methodology, an approach to automated monitoring of the state of the PLs was developed, which is based on the principle of dynamic planning of the movement of the UAV relative to the elements of the PLs. The first stage in the planning of the UAV movement is the creation of a flight mission by the operator. The mission consists of flight tasks to examination KE. After receiving the flight mission from the operator, the UAV begins to move relative to the PL. At the first stage, the UAV examines the PL poles. The UAV moves along the specified trajectory patterns and simultaneously updates the database (DB) containing information about the support. The coordinate of the reference point where the KE of the PL was detected is recorded in the database. In addition to the coordinate of the reference point, information about the type of detected element and a snapshot in the visible, infrared (IR) and ultraviolet (UV) spectra are entered in the DB. To switch between UAV flight tasks, it is necessary to move from one key point to another. The UAV moves from one reference point to another in a given order of inspection of elements based on the developed algorithm for dynamic planning of waypoints, taking into account the minimum allowable distance to the transmission line, camera parameters and the dynamics of the movement of the UAV. All the collected data (shots in the visible, IR and UV spectra) are analyzed by the system for searching for defects of PL elements in images to determine the state of PL elements using machine learning methods.

To check the operability of the methodology for shooting KEs (traverse with an insulator, the upper part of the pole, wires, and pole) of PLs to detect damage to it in a simulation environment, simulation of autonomous inspection of damage to elements for three types of PLs using an autonomous UAV was performed. As a result, a sample of images in the visible, IR and UV spectra was collected, consisting of 1,300 images, which presented 1,376 unique angles of 17 simulated damages, unified for each type of PL, which indicates the prospect of this technique for constructing autonomous flight trajectories of UAVs in order to collect representative samples of data on PL damage in visible, UV and IR spectra. The images in the visible spectrum contain images of supports of various shapes and on different backgrounds, images of traverses with insulators and fasteners. Shots of PLs in the IR spectrum contain information about the temperature of the wires. The presence of this information makes it possible to identify defects such as breakdown of the insulator, heating of wires. Shots of PLs in the UV spectrum

allow us to record the presence of a corona discharge on the wires of PLs, which causes significant losses of transmitted energy.

At the first stage of the project, a review of modern methods for monitoring the condition of PL structural elements through image processing in the infrared, ultraviolet and visible spectra was carried out. Methods designed for image processing in the visible spectrum are based on deep and machine learning algorithms. GVN, HOG and SVM, SSD, Grab cut, cascading CNN, LBPHF+SVM, DMNN, VGG-19, LBP and ULBP, YOLO v3, DELM and LRF, SVM, Faster R-CNN, CNN, stereovision and PLAMEC showed the greatest efficiency for detecting defects in the visible spectrum. In the course of the work, a DB was collected, which includes 7566 images in the visible spectrum. As a result, a study was conducted of the detection method in the visible spectrum of a specific defect of a PL – the absence of an insulator. The detection was performed based on the processing of images in the visible spectrum taken from the UAV and constituting a marked sample. Image processing was carried out using neural networks of the YOLO family. Comparative analysis of YOLOv3, YOLOv4 and their simplified versions showed good results in the accuracy of defect detection (absence of an insulator) using YOLOv3-tiny ( $mAP@0.50=0.97\pm0.03$ ;  $mAP@0.75=0.78\pm0.04$ ).

During the testing, the images obtained during the simulation were processed to detect and analyze defects in the transmission line elements in the visible, IR and UV spectra obtained during the examination by means of UAVs. The considered defects in various spectra have a significant contrast in the images, therefore, segmentation methods based on the analysis of the brightness distribution of image pixels look promising for detecting PL defects. Semantic segmentation is a priority method of damage localization, since allows one to highlight the geometric shape and place on the image in the conditions of shooting objects from different angles. The problem of localization of PL damage in various spectra was solved by segmentation of the object elements – the formation of a mask that repeats the shape of an object of a certain class in the image. For a general assessment of the effectiveness of semantic segmentation, the Jaccara index was used in this work. In the general task of semantic segmentation, deep convolutional neural networks show the best results. As part of this project, two common neural network architectures were considered: convolutional auto-encoder (CAE) and U-Net and a threshold filtering method for detecting wire heating in the IR spectrum and corona discharge in the UV spectrum. Each model was trained for 200 epochs using a modified algorithm of stochastic batch (mini-batch) gradient descent Adam with standard parameters from the PyTorch library. The results obtained are based on the IoU metric for individual classes: heating of wires in the

IR spectrum (CAE – 0.551, U-Net – 0.554, threshold filtration – 0.535), corona discharge in the UV spectrum (SAC – 0.759, U-Net – 0.767, threshold filtration – 0.752). The threshold filtering method running on the CPU significantly exceeds the considered neural networks running on the GPU in processing time (21.6 times CAE and 26.4 times U-Net). Together, it makes the considered threshold filtering method the most promising for implementation on an on-board computing device of a UAV or a mobile ground station.

Within the framework of this work, a methodology was developed for constructing the trajectory of autonomous UAV movement during the inspection of PLs in the visible, IR and UV spectra, which is characterized by a new principle of dynamic trajectory formation based on the analysis of the design features of the inspected PLs, as well as considering the requirements of representativeness and unification of the collected data. This approach of global planning significantly accelerates the process of creating a mission (by 1.5 times), and the flight time of the UAV in autonomous mode along the calculated trajectory has decreased by 11% compared to the flight time in manual mode and makes it possible to significantly simplify the operator's work when using the UAV. As a result of the experiments, the average deviation of the actual trajectory of the UAV movement from the trajectory of the transmission line survey generated by the global planner was obtained. Two metrics were used for the calculation: Hausdorff distance and OWD. As a result of the comparison, it was possible to establish that the maximum deviation does not exceed 0.4 m, which is permissible when driving near the power line route. The scientific novelty of the technique consists in planning the flight path of a small multirotor-type UAV, taking into account the design features of specific PLs, as well as and the requirements for the collected visual data in the visible, ultraviolet and infrared spectra.

Flight autonomy leads to a reduction in labor costs, and the uniformity of the trajectory of autonomous flight for PLs and inspected damage of certain types ensures the unification of the data obtained for the corresponding types of PLs. In addition, the search time for defects (damages) in the images is reduced, compared with manual examination.

Published 5 papers in scientific journals indexed in the Scopus/WoS, RSCI and RSCI databases. The results of the research were presented at 4 international conferences, with subsequent publication of materials in the collections of works of these scientific events.

### **Заявленные цели проекта**

На 2022 год выполнения проекта были запланированы следующие задачи:

1. Разработка подхода к автоматизированному мониторингу линий электропередач (ЛЭП) при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Подход основан на разработанном ранее методе автономного движения БПЛА и методах обнаружения дефектов элементов ЛЭП во время движения БПЛА. Такое комплексное решение позволяет осуществлять полноценный автоматизированный мониторинг и осуществлять анализ полученных данных для поиска дефектов ЛЭП. Также данный подход за счет разработанных ранее решений обеспечит высокую точность позиционирования дефектов на построенной после обследования модели объекта.

2. Разработка программного обеспечения для реализации автоматизированного подхода к мониторингу ЛЭП. На основе разработанного подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП при помощи БПЛА предлагается разработать набор программного обеспечения для решения задачи автоматизированного мониторинга ЛЭП. Программное обеспечение будет включать ROS модули навигации и движения БПЛА, протокол передачи данных MAVROS, контроллер автопилота БПЛА PX4, программный модуль системы компьютерного зрения для обнаружения ключевых элементов ЛЭП. Данное программное обеспечение позволит автономно управлять перемещением БПЛА в пространстве, производить съемку объекта в различных спектрах и обследовать заранее выбранные части ЛЭП.

3. Анализ полученных данных по результатам тестирования автоматизированного подхода мониторинга ЛЭП. Планируется провести дополнительные исследования и сбор данных в симуляторе ROS-Gazebo, а также исследование методов и подходов обработки изображений на основе базы данных, полученной на предыдущих этапах проекта. Будет проведена оценка корректности построенных траекторий для движения БПЛА, точность определения элементов ЛЭП во время движения БПЛА при обследовании ЛЭП, точность обнаружения дефектов на элементах ЛЭП.; Данный анализ позволит судить о применимости разработанных решений с целью их использования в реальных условиях для проведения автоматизированного мониторинга ЛЭП.

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

## **Введение**

Мониторинг состояния элементов линий электропередач (ЛЭП) является важной и актуальной задачей для сфер энергетики и промышленности. Своевременное выявление и оперативный ремонт поврежденных элементов является важной составляющей энергетической безопасности. Однако, выполнение этой процедуры требует значительных временных трудовых и финансовых затрат: традиционные методики мониторинга ЛЭП подразумевают оценку состояния элементов ЛЭП бригадами хорошо подготовленных промышленных альпинистов, которые должны взобраться на каждую опору ЛЭП и непосредственно оценить состояние того или иного элемента.

Одним из вариантов ускорения и удешевления мониторинга состояния элементов ЛЭП является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые могут выполнять облёт и дистанционную съемку элементов многокилометровых ЛЭП. При этом БПЛА обычно управляется оператором дистанционно. В ходе облета выполняется сбор фото- или видеоданных, анализ которых в дальнейшем позволит определить повреждения элементов ЛЭП. С целью дальнейшего сокращения временных и трудовых затрат, процессы облета ЛЭП и анализа собранных данных также нуждаются в автоматизации.

## **1. Разработка подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП при помощи БПЛА**

В настоящее время из-за большого количества возможных дефектов ЛЭП существует острая необходимость в разработке инновационного подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП, который позволяет за короткое время собрать данные о труднодоступных местах опор ЛЭП и произвести обследование трассы ЛЭП в нескольких спектрах за использованием БПЛА мультироторного типа (МТ).

В основном для мониторинга трасс ЛЭП используются БПЛА самолетного типа. При обследовании трасс ЛЭП посредством БПЛА самолетного типа с высоты 50–100 м можно выявить следующие дефекты: наклон, деформация или поломка опор, обрыв проводов, наличие деревьев или кустарников в зоне приближенной к ЛЭП, подтопления, пожары. Применение для обследования элементов ЛЭП БПЛА МТ, обусловлено необходимостью выполнения съемки с небольшого расстояния (менее 50 м; в некоторых случаях менее 5 м) под определенными углами, недоступными для съемки с БПЛА самолетного типа или, когда для выполнения съемки скорость аппарата относительно объекта съемки должна быть минимальной или стремиться к нулю. БПЛА МТ применим для выполнения обследования в пределах ближайшей к точке старта элементов ЛЭП. Мониторинг такого

типа гарантирует обследование труднодоступных мест опоры и определение дефектов ЛЭП, которые невозможно установить посредством БПЛА самолетного типа.

Система позиционирования БПЛА, выполняющего работы по осмотру труднодоступных участков ЛЭП должна быть помехоустойчивой, поскольку традиционно используемые для стабилизации магнитометры выходят из строя при наличии мощных радиопомех, вызываемых разрядной активностью (дальность, относительная влажность и температура воздуха, скорость ветра). [1]. Поэтому необходимо использовать защищённый канал радиосвязи для передачи данных с наземной станции управления (НСУ) и RTK GPS модуль, которые гарантируют высокую точность позиционирования БПЛА, что необходимо учитывать при нахождении дрона вблизи опоры и проводов ЛЭП.

В качестве полезной нагрузки на борту БПЛА могут использоваться: RGB камеры, инфракрасные (ИК) камеры и камеры, фиксирующие ультрафиолетовый (УФ) спектр. Применение данной аппаратуры для фотосъемки в составе БПЛА для обследования состояния элементов ЛЭП обусловлено тем, что съемка в видимом спектре позволяет получить изображения элементов конструкции с высоким пространственным разрешением. Высокое пространственное разрешение фотоснимков позволяет обнаружить при анализе изображений большинство дефектов элементов ЛЭП (кроме повреждений изоляторов и грозозащитного троса). Анализ данных УФ и ИК съемки невозможен без сопоставления с данными съемки в видимой части спектра. На снимках в УФ и ИК спектре система детектирования дефектов обнаруживает сами дефекты, а на снимках видимого спектра эта же система идентифицирует ключевые элементы (КЭ), у которых присутствует обнаруженный дефект.

Аэрофотосъемка с высоким пространственным разрешением кадра является основным источником данных для выявления дефектов элементов ЛЭП при помощи БПЛА. При помощи камер, например типа Sony ALPHA 6000, с безопасной высоты полета для БПЛА (250 м), можно получить пространственное разрешение кадра на уровне 2.0–2.5 см/пиксель. При использовании среднеформатных камер, например типа Phase One iXA 160/180, с этой же высоты, будет получено пространственное разрешение кадра на уровне 0.5–1.0 см/пиксель. В большинстве случаев можно обойтись без точной привязки аэрофотоснимка к пространственным координатам. Если для каких-то целей требуется сантиметровая точность привязки аэрофотоснимка к пространственным координатам, в составе БПЛА должна быть предусмотрена GNSS приемник. А для высокоточного

позиционирования используется RTK модуль, подключенный к НСУ. RTK модуль корректирует положение БПЛА в глобальной системе координат (СК) посредством получения поправок с базовой станции.

При ИК съемке с безопасной высоты полета для БПЛА (250 м) будут хорошо видны опоры ЛЭП, крупные металлические конструкции, грунтовые и асфальтовые дороги, водоемы, деревья и кустарники.

Некоторые дефекты элементов ЛЭП могут быть обнаружены только при помощи УФ камер. Выявляемая УФ камерами разрядная активность позволяет обнаружить нарушения в работе стеклянных, фарфоровых и полимерных изоляторов (загрязнение, трещины, сколы, разрушение армирующей заделки), а также других изоляционных конструкций и ошиновок. В предлагаемом подходе предлагается использовать БПЛА МТ в комбинации с УФ камерой, т.к. данный тип БПЛА может зависать в определенной точке пространства и производить съёмку с экспозицией обследуемого участка в течение 5 – 10 секунд.

Для достижения наибольшей эффективности применения БПЛА в качестве средства выявления дефектов ЛЭП, был разработан подход, который использует перечень ключевых элементов, труднодоступных участков ЛЭП и предъявляемых к ним требованиям к съемке, в пределах которых возможно применение БПЛА в качестве средства выявления дефектов. Кроме того, более того разрабатываемый подход должен гарантировать безопасные маршруты БПЛА МТ для облета каждого из ключевого элемента и труднодоступного участка, учитывать заранее заданные точки взлета и посадки БПЛА и прогнозирование обеспечения качества связи для каждого из маршрутов.

В контексте описания разработанного подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП методом фотофиксации элементов ЛЭП в различных спектрах на камеры, установленные на борту БПЛА введем несколько базовых определений, которые далее позволят раскрыть суть подхода.

*Ключевой элемент* – это элемент, обладающий определенными характеристиками местоположения и являющийся частью исследуемого объекта. В частности, к ключевым элементом ЛЭП относятся: траверсы с изоляторами, верхняя часть опоры ЛЭП, сама опора ЛЭП и провода, прилегающие к опоре. В целях обнаружения дефектов и повреждений ключевых объектов, которые могут вызвать аварийную ситуацию на ЛЭП, предлагается подход к автоматизированному обследованию ЛЭП, в основе которого, кроме использования БПЛА функционирующего в автономном режиме полета, как один из этапов используется анализ изображений элементов ЛЭП в различных спектрах.

Для реализации автономного режима полета БПЛА МТ вблизи ЛЭП необходимо ввести следующие понятия: *паттерн* – это математическая функция, описывающая форму траектории обследования, зависящая от введенных параметров полетной миссии и обследуемого ключевого элемента. *Опорная точка* – это точка, в которой происходит смена паттерна обследования; *путевая точка* – это точка, характеризующая положение и ориентацию БПЛА в некоторый момент времени; путевая точка рассчитывается динамически в зависимости от текущего состояния и положения БПЛА, заданного паттерна и управляющего воздействия. *Траектория* – это последовательность путевых точек, по которым движется БПЛА. *Внешние воздействия* – это внешние факторы природного или технического характера, влияющие на функционирование БПЛА. *Допустимое расстояние* – это некоторая переменная величина, которая характеризует минимальное расстояние между БПЛА и обследуемым объектом в текущий момент времени. Оно обусловлено электромагнитным излучением или особенностями геометрии объекта, влияющим на бортовые системы БПЛА и его функционирование в процессе обследования. *Полётное задание* – это задача, которую необходимо выполнить БПЛА для осуществления мониторинга одного из элементов. Полётное задание всегда содержит один ключевой элемент, который необходимо обследовать, в каком спектре необходимо осуществить обследование и паттерн. Например, осмотр траверса с изолятором в видимом спектре с использованием паттерна CIRP или осмотр проводов в ИК спектре с использованием паттерна WIT. В таблице 1 представлен перечень полётных заданий, выполнение которых гарантирует обследование ЛЭП. Также в таблице 1 представлены все возможные паттерны, хранящиеся на борту БПЛА, которые выбираются в зависимости от обследуемого КЭ.

Таблица 1 – Соотношение ключевых элементов, полетных заданий и паттернов

Ключевой элемент	Полетное задание	Тип полезной нагрузки	Паттерн
Траверс с изолятором	Осмотр траверса в видимом спектре	RGB камера	CIRP
	Осмотр траверса в ИК спектре	ИК камера	
	Осмотр траверса в УФ спектре	УФ камера	
Верхняя часть опоры	Осмотр верхней части опоры в видимом спектре	RGB камера	CIRP
	Осмотр верхней части опоры в УФ спектре	УФ камера	
Провода	Осмотр проводов в видимом спектре	RGB камера	WIT
	Осмотр проводов в ИК спектре	ИК камера	

Опора	Осмотр опоры в видимом спектре	RGB камера	TOLP
	Осмотр опоры в ИК спектре	ИК камера	
	Осмотр опоры в УФ спектре	УФ камера	

Паттерны траекторий, названные CIRP («circumvolant path», «обходной путь») и TOLP («take off and land vertically path», «вертикальный путь взлета и посадки») изображенные на рисунке 1 позволяют избежать столкновения с опорами ЛЭП и упрощают обследование для большинства видов ЛЭП. Траектория TOLP в основном затрагивает движение БПЛА вдоль оси OZ, траектория CIRP – движение по осям OX и OY.

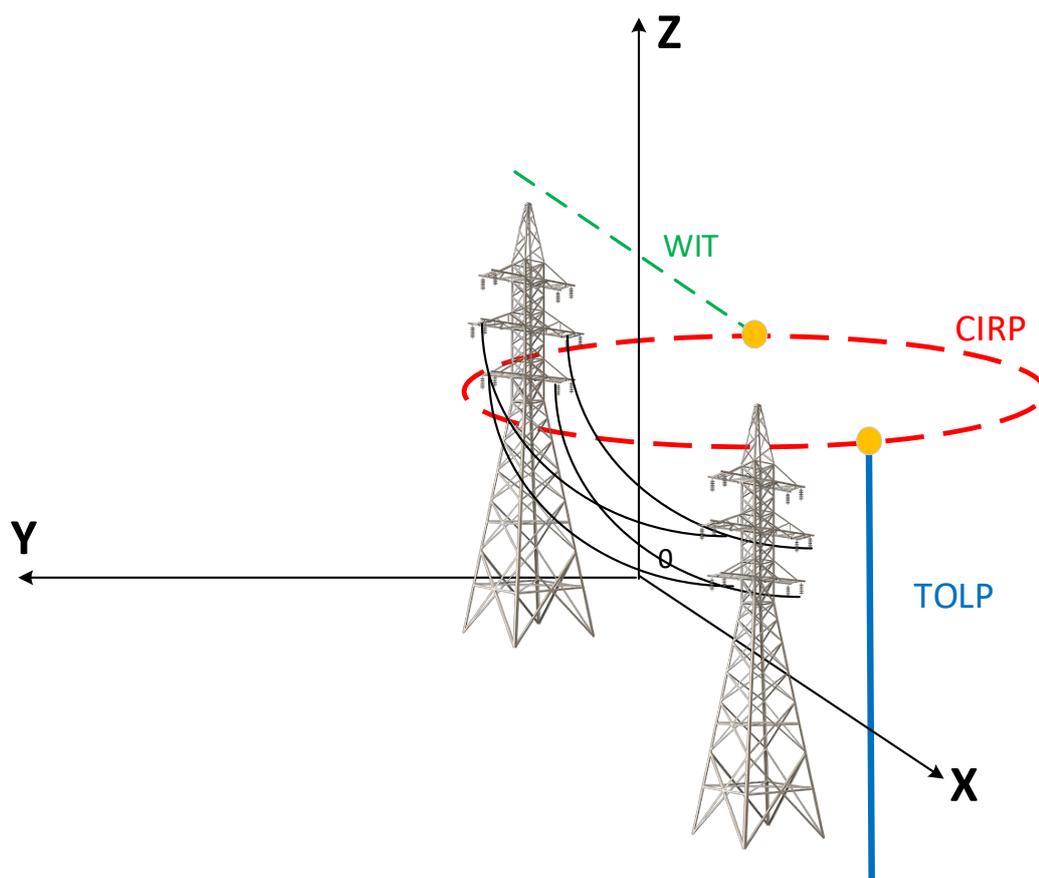


Рисунок 1 – Разработанные паттерны движения БПЛА вблизи ЛЭП

Паттерн траектории для обследования проводов называется WIT («Wire Inspection Trajectory»). Данный паттерн траектории обследования проводов обеспечивает получение данных о ЛЭП в плоскости OXY и изображение участка ЛЭП (две опоры и провода между ними) в одной из плоскостей (OXZ или OYZ). Для использования данных паттернов траекторий необходимо располагать данными о безопасном расстоянии от опоры ЛЭП, где на БПЛА не будет действовать электромагнитное излучение ЛЭП [2] или геометрические особенности объектов, при котором будет возможно осуществить беспрепятственное движение БПЛА относительно элементов конструкции при сильном ветре. Данных паттернов достаточно, чтобы

обеспечить обнаружение дефектов элементов ЛЭП, провести анализ фотоматериалов на наличие провеса проводов и воссоздать трехмерную визуализацию участка ЛЭП на основе полученных снимков с использованием методов фотограмметрии.

*Полетная миссия* – это последовательность полётных заданий, формируемая оператором для комплексного обследования ЛЭП. Все полетные задания связаны через опорные точки.

Основываясь на Отчёте 2021 года и дополнив его актуальной информацией, была собрана таблица, где соотносятся возможные полетные миссии, состоящие из полетных заданий, и требования к полезной нагрузке для выявления дефектов ЛЭП. В таблице 2 представлен перечень дефектов, которые возможно зафиксировать, применяя разработанный в данном Отчете подход к автоматизированному мониторингу ЛЭП.

Таблица 2 – Дефекты, выявляемые разработанным подходом

<b>Полетная миссия</b>	<b>Полетное задание</b>	<b>Дефект</b>
Плановый осмотр труднодоступных участков ЛЭП, протяженностью до 5 км	Осмотр проводов в видимом спектре; Осмотр опоры в видимом спектре; Осмотр траверса в видимом спектре; Тип полезной нагрузки: RGB камера	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Наличие в охранной зоне ЛЭП складированных материалов;</li> <li>• Пожары;</li> <li>• Наличие растительности на земле, отведенной под опору;</li> <li>• Выполнение на трассе в охранных зонах несогласованных работ;</li> <li>• Несогласованное строительство и обустройство различных объектов;</li> <li>• Отсутствие или неисправное состояние защиты оснований опор от ледохода, размывания, песковыдувания;</li> <li>• Неисправное состояние дорог, мостков и т.п.;</li> <li>• Отсутствие или неисправность заградительных огней в местах пересечения с автомобильными дорогами;</li> <li>• Отсутствие или неисправность отбойных тумб для защиты опор от наездов транспорта, габаритных ворот на пересечениях с ж/д путями;</li> <li>• Отсутствие лестниц для подъема на фундамент переходных опор ЛЭП, через водные преграды;</li> <li>• Подтопление в охранной зоне по трассе ЛЭП;</li> <li>• Наличие на опорах птичьих гнезд и других посторонних предметов;</li> <li>• Наличие обрывов, набросов фазных проводов или грозозащитного троса;</li> <li>• Отсутствие гасителей вибрации, гасителей пляски, предусмотренных проектом ВЛ, или их смещение от места установки;</li> <li>• Отсутствие деталей на металлических опорах;</li> <li>• Приближение петли к элементам анкерных и угловых опор, значительная изогнутость</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>петли;</li> <li>• Полное разрушение фарфора или стекла изоляторов;</li> </ul>
Плановый осмотр ближайшей к точке старта БПЛА опоры ЛЭП	<p>Осмотр опоры в видимом спектре;  Осмотр траверса в видимом спектре;  Осмотр верхней части опоры в видимом спектре;  Тип полезной нагрузки: RGB камера</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сколы части тарелок изоляторов;</li> <li>• Отсутствие деталей на верхних частях металлических опор ЛЭП;</li> <li>• Следы оплавлений и перекрытий на верхних поверхностях, недоступных для обзора с земли;</li> </ul>
Тепловизионный контроль труднодоступных участков ЛЭП, протяженностью до 5 км.	<p>Осмотр траверса в ИК спектре;  Осмотр проводов в ИК спектре;  Осмотр опоры в ИК спектре;  Тип полезной нагрузки: ИК камера</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Подтопление в охранной зоне по трассе ЛЭП;</li> <li>• Наличие оборванных (лопнувших) или перегоревших проволок, следов, перекрытия, оплавления или вспучивания верхнего повива («фонари»);</li> <li>• Наличие коррозии проводов и тросов;</li> <li>• Повреждения проводов и тросов у зажимов, дистанционных распорок, гасителей пляски и под защитными муфтами в роликовых подвесах;</li> <li>• Неправильный монтаж зажимов или соединений, перегрев контакта зажима;</li> </ul>
Тепловизионный осмотр ближайшей к точке старта БПЛА опоры ЛЭП	<p>Осмотр опоры в ИК спектре;  Осмотр траверса в ИК спектре;  Тип полезной нагрузки: ИК камера</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Наличие коррозии проводов и тросов;</li> <li>• Повреждения проводов и тросов у зажимов, дистанционных распорок, гасителей пляски и под защитными муфтами в роликовых подвесах;</li> <li>• Перегрев элементов опоры ЛЭП, конструкции опоры ЛЭП</li> <li>• Перегрев проводов и изоляторов</li> </ul>
Осмотр в УФ спектре ближайшей к точке старта БПЛА опоры ЛЭП	<p>Осмотр траверса в УФ спектре;  Осмотр верхней части опоры в УФ спектре;  Осмотр опоры в УФ спектре;  Тип полезной нагрузки: УФ камера</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• полное разрушение фарфора или стекла изоляторов;</li> <li>• скол части тарелок изолятора;</li> <li>• трещины тарелок изолятора;</li> <li>• наличие дефектных (негодных) изоляторов;</li> <li>• загрязненность изоляторов, вызывающая при сырой погоде коронирование;</li> <li>• неудовлетворительный контакт в болтовых соединениях грозозащитного троса с заземляющими спусками или телом опоры,</li> <li>• выявления частичных поверхностных разрядов и коронных разрядов на элементах ЛЭП</li> </ul>

В результате анализа перечня дефектов удалось установить, что для реализации автоматизированного мониторинга трассы ЛЭП и сбора данных о её состоянии, необходимо спроектировать модули управления движением БПЛА по круговой и прямолинейной траекториям с использованием видимого, ИК и УФ спектра. Всего было выделено 5 основных полетных

миссий, которые позволяют обнаружить обширный класс дефектов опоры, участка или трассы ЛЭП.

### **1.1 Алгоритм расчета путевых точек для динамического генерирования траектории обследования КЭ**

Изначально необходимо определить типы движения БПЛА вблизи трассы ЛЭП. Выделим два основных типа движения: полет от КЭ к следующему КЭ и полет относительно КЭ. Кардинальное различие данных типов движения заключается в алгоритме расчета путевых точек, по которым движется БПЛА и наличие параллельного процесса: фотосъемки в выбранном спектре или поиска КЭ. Рассмотрим данные вопросы более подробно.

При полёте от одного КЭ к другому алгоритм построения путевых точек получает на вход точку, из которой должен переместиться БПЛА. Стоит отметить, что КЭ может быть представлен не только физическим объектом, например, траверс, но и определенной координатой в пространстве. При полёте от одного КЭ к другому БПЛА постоянно производит процесс поиска следующего КЭ на изображении, поступающем с камеры, или в виде итеративного сравнения текущей координаты с заданной в случае, если КЭ представлен некоторой координатой. При полёте от одного КЭ к другому функция фотосъемки в заданном спектре отключена, а задача движения БПЛА сводится к задаче перемещения из точки в точку на основе данных с камеры или GNSS приёмника, учитывая препятствия и дальность действия системы связи с наземной станцией управления. Учет последнего позволяет избежать таких критических ситуаций, как потеря связи с БПЛА при поиске КЭ, столкновение БПЛА с препятствием или элементом ЛЭП.

Полёт БПЛА относительно КЭ отличается алгоритмом расчета путевых точек, на основе паттернов, процента перекрытия кадров, данных с датчиков и данных о КЭ. Кроме того, параллельным процессом при движении относительно КЭ обязательно является фотосъемка. БПЛА фотографирует КЭ с заданным перекрытием кадров и в заданных спектрах в каждой рассчитанной путевой точке – такая совокупность полученных данных позволяет точно определить местонахождение дефекта элемента ЛЭП, а также его природу.

Рассмотрим подробнее второй тип движения – полет БПЛА относительно КЭ. Блок-схема алгоритма расчета путевых точек представлена на рисунке 2.

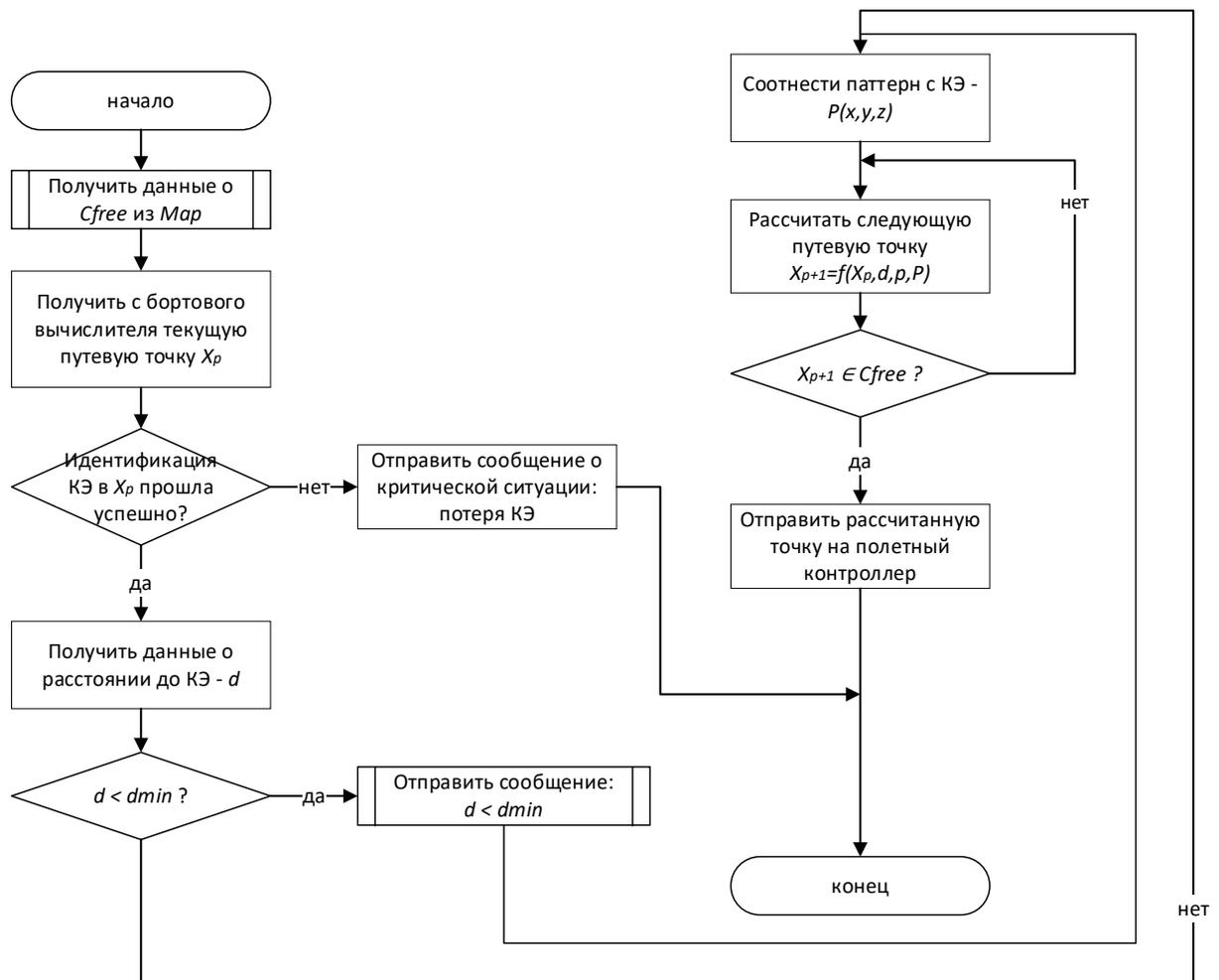


Рисунок 2 - Блок-схема алгоритма расчета следующей путьевую точку

На первом шаге алгоритма происходит анализ локальной карты на наличие свободного от препятствий пространства. Необходимо проанализировать полученные данные с сенсоров БПЛА (лидары, камеры, ультразвуковые сенсоры и др.), воссоздать локальную карту и определить свободное пространство на этой карте, где может безопасно находиться БПЛА. Локальная карта *Map* – карта, которую строит БПЛА во время движения вокруг ЛЭП. Карта постоянно обновляется новыми данными с сенсоров. *Map* представлена как *Occupancy Grid*, где есть свободные и занятые ячейки пространства. *Map* состоит из свободного от препятствий пространства  $C_{free}$ , где может находиться БПЛА, и занятого препятствиями пространства –  $C_{busy}$ . Блок-схема алгоритма построения локальной карты представлена на рисунке 3. Данные, получаемые сенсорами БПЛА, включают данные о положении препятствия в системе координат сенсора и, если используется лидар, данные отраженной интенсивности лазерного луча. Исходные данные сенсора сперва преобразуются в облако точек, а затем переводятся из системы координат (СК) сенсора (O-xу) в систему координат

изображения (O'-uv) путем построения модели преобразования координат по следующему уравнению:

$$\begin{cases} x = (u - 0.5m) \frac{l}{m} \\ y = (0.5n - v) \frac{w}{n} \end{cases} \quad (1)$$

где  $m * n$  - разрешение карты сетки, а  $l * w$  - прямоугольная область, где в центре находится БПЛА. Кластеризация облаков точек препятствий обычно использует метод кластеризации на основе плотности облака точек (DBSCAN). В алгоритме используется фиксированный параметр плотности облака точек. Ассоциация препятствий заключается в том, чтобы сопоставить препятствие, наблюдаемое в текущий момент с препятствием, наблюдаемым в предыдущий момент. Для повышения точности ассоциации препятствий можно использовать положение препятствия соотношение сторон класетризованного препятствия, высоту и плотность облака точек.



Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма построения локальной карты на основе данных с сенсоров БПЛА

Обозначим предыдущую путевую точку как  $X_{p-1}$ , текущую путевую точку, где находится БПЛА, как  $X_p$  и следующую, как  $X_{p+1}$ . Путевые точки описываются координатами  $(x, y, z)$  в глобальной СК.

Следующий шаг алгоритма на рисунке 4 – это получение текущей путевой точки БПЛА  $X_p$  относительно глобальной СК. В каждой путевой точке положение БПЛА описывается вектором  $X(t)$ . Положение БПЛА в глобальной СК задаётся вектором смещения с компонентами  $(x, y, z)$  и углами  $(\theta, \psi, \varphi)$ . Угловые скорости вокруг осей –  $p, q$  и  $r$ . А поступательные скорости вдоль осей –  $j, v$  и  $w$ . Предполагаем, что время  $t$  изменяется дискретно и принимает целочисленные значения  $0, 1, \dots, k$ . Все компоненты описанные выше представлены на рисунке 4.

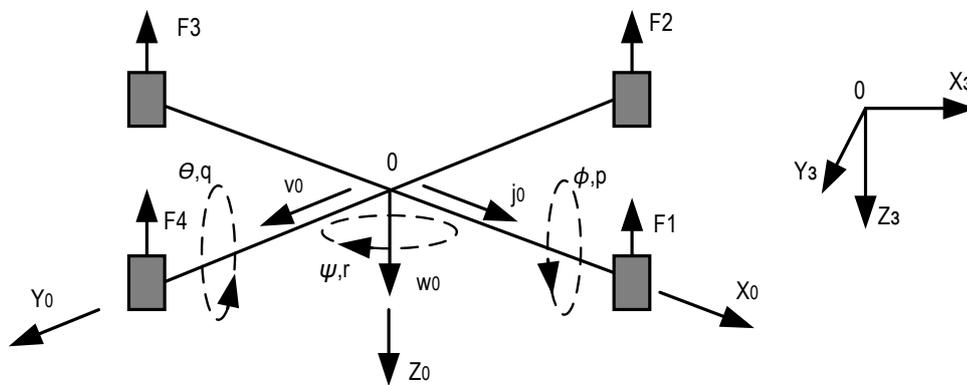


Рисунок 4 – Кинематическая схема БПЛА

Обозначим  $X(t)$ , текущее положение БПЛА, описываемое вектором, компонентами которого являются координаты текущей позиции в глобальной СК и углы поворота:

$$X(t) = \langle x(t), y(t), z(t), \theta(t), \psi(t), \varphi(t) \rangle. \quad (2)$$

Стоит отметить, что координаты текущей путевой точки  $X_p$  не равны компонентам вектора текущего положения  $X(t)$ , так как текущее положение  $X(t)$  определяется на основе данных с датчиков и зависит от времени  $t$ , а путевая точка является рассчитанной пространственной координатой, не зависящей от времени  $t$ .

Идентификация КЭ происходит в режиме реального времени на вычислителе БПЛА. Как было отмечено ранее, КЭ может быть представлен в виде объекта, который необходимо обнаружить на изображении или в виде координаты пространства. Блок идентификации КЭ алгоритма расчета следующей путевой точки (рисунок 5) отвечает за поиск КЭ в кадре с использованием методов машинного обучения, если КЭ задан в виде объекта, или за итеративное сравнение текущей GPS координаты БПЛА с GPS координатой КЭ.

Блок сравнения расстояния БПЛА до КЭ в алгоритме расчета следующей путевой точки (рисунок 5) необходим для предотвращения столкновения БПЛА с КЭ. Переменная  $d_{min}$  – минимальное допустимое расстояние до объекта относительно которого движется БПЛА. Каждому типу КЭ назначается свое минимальное допустимое расстояние.

Если  $d < d_{min}$ , то необходимо произвести расчет новой точки  $B$ , которая будет удовлетворять условию безопасного расстояния до препятствия или КЭ. Расчет точки  $B$  происходит в плоскости ОХУ. Блок-схема данного алгоритма расчета новой точки  $B$  представлен на рисунке 5.

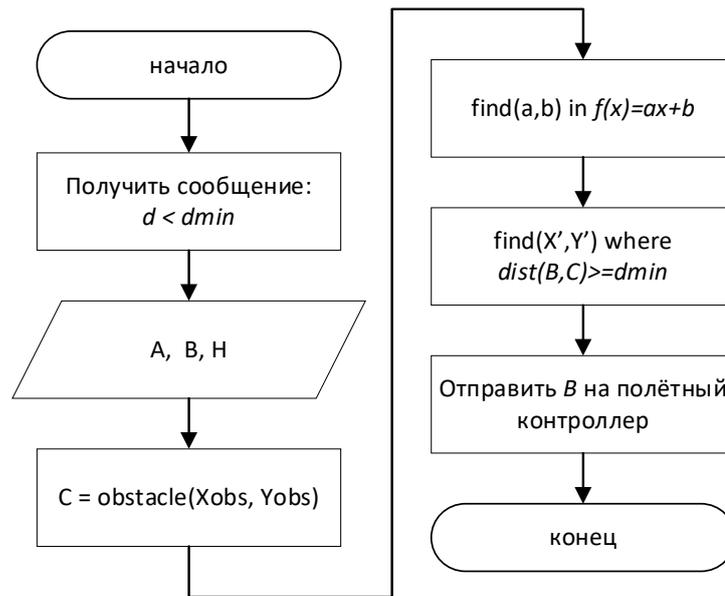


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма расчета новой точки, которая удовлетворяет условию минимально допустимого расстояния до объекта или КЭ

Все используемые переменные в блок-схеме на рисунке 5 показаны на рисунке 6. На первом этапе введем новые обозначения: текущую точку, где находится БПЛА и где  $d < d_{min}$  обозначим как  $A$  с координатами  $(X, Y)$ , точка, в которую необходимо переместиться –  $B$  с координатами  $(X', Y')$ , Высота полета БПЛА –  $H$ ; высота БПЛА может изменяться во время выполнения полетного задания. Далее определяется ближайшая точка препятствия  $C$  и её координаты  $(X_{obs}, Y_{obs})$ . Координаты двух точек известны, поэтому можно найти параметры  $a, b$  линейной функции  $f(x) = ax + b$ , которая содержит точку  $A$  и  $C$ . Зная функцию  $f(x) = ax + b$  находим  $B$  с координатами  $(X', Y')$ . Точка  $B \in f(x)$  и должна удовлетворять условию  $dist(B, C) \geq d_{min}$ , где  $dist(B, C)$  – это евклидово расстояние от  $B$  до  $C$ . Найденные координаты точки  $B$  отправляются на полетный контроллер, чтобы БПЛА обеспечил корректировку своего положения относительно препятствия или КЭ.

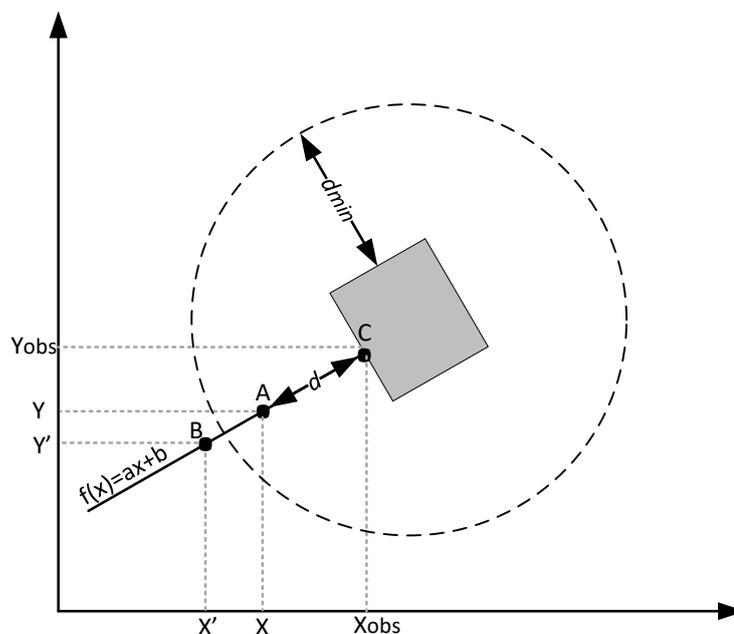


Рисунок 6 – Условные обозначения переменных

Для каждого КЭ назначается свой паттерн движения, который выражен определенной непрерывной математической функцией. Паттерн прямолинейного движения в плоскости ОХУ задаётся как функция  $P_{WIT} = y(x) = ax + b$ ; паттерн движения вверх или вниз задаётся как  $P_{TOLP} = h(z) = az + b$ ; паттерн круговой траектории в плоскости ОХУ задаётся как:

$$P_{CIRP} = r(x, y) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}. \quad (3)$$

Расчет следующей путевой точки  $X_{p+1}$ , куда должен переместиться БПЛА происходит на основе функции, учитывающей текущую путевую точку, где находится БПЛА; расстояние до КЭ  $d_{min}$ ; шаг смещения относительно КЭ  $p$ , рассчитанный заранее на основе данных о перекрытии кадров (*overlap*); паттерн движения  $P$  найденного КЭ:

$$X_{p+1} = f(X_p, d_{min}, p, P). \quad (4)$$

Во время движения относительно КЭ БПЛА выполняет фотосъемку с заданным параметром перекрытия кадров с изображением одного и того же участка ЛЭП, сфотографированного с разных точек –  $S_{overlap}$  (задаётся в процентах). Для того, чтобы рассчитать координату следующей путевой точки, где будет сделан фотоснимок, необходимо рассчитать длину шага смещения  $p$ . Длина шага смещения зависит от размера пикселя на местности ( $GSD$  – ground sample distance) и заданного параметра перекрытия  $S_{overlap}$ .  $GSD$  влияет на распознаваемость объектов на изображении: чем он меньше, тем более мелкие объекты можно распознать. Для уменьшения значения  $GSD$  есть два способа – применение камеры с большим размером матрицы и

высокой плотностью светочувствительных элементов или уменьшение расстояния до КЭ. Второй способ уменьшения значения  $GSD$  не подходит для обследования КЭ ЛЭП из-за электромагнитного излучения, влияющего на работу БПЛА. Поэтому, для обследования КЭ необходимо использовать камеры видимого спектра с высоким разрешением.

У каждого кадра изображения есть ширина  $W_{image}$  и высота  $L_{image}$  в пикселях. Зная данные величины, можно произвести расчет по формулам (5) и (6) длины шага смещения в сантиметрах вдоль ширины кадра  $p_W$  и вдоль высоты кадра  $p_L$ :

$$p_W = \frac{W_{image} \times GSD}{100} \times \left(1 - \frac{S_{overlap}}{100}\right), \quad (5)$$

$$p_L = \frac{L_{image} \times GSD}{100} \times \left(1 - \frac{S_{overlap}}{100}\right), \quad (6)$$

где  $GSD$  вычисляется по формуле (7):

$$GSD = \frac{d \times S_w \times 100}{F \times W_{image}}, \quad (7)$$

где  $d$  – текущее расстояние от БПЛА до снимаемого КЭ,  $S_w$  – ширина матрицы (сенсора камеры),  $F$  – фокусное расстояние.

При движении БПЛА по эллиптической траектории вокруг КЭ (рисунок 7), вращение подвеса  $\vartheta$  рассчитывается по следующей формуле (8):

$$\vartheta = \tan^{-1} \frac{d}{d - R}, \quad (8)$$

где  $d$  – это расстояние до объекта,  $R$  – радиус круговой траектории. На рисунке 3 круговая траектория обозначена красной пунктирной линией.

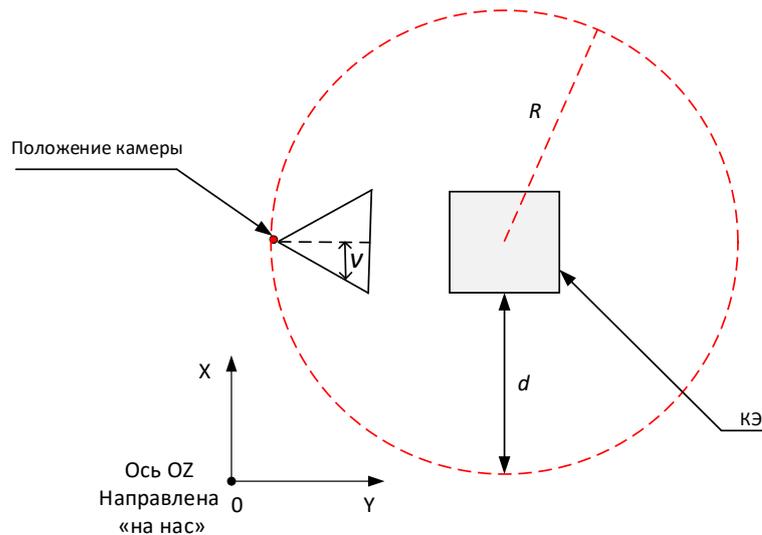


Рисунок 7 – Иллюстрация, связывающая параметры, используемые в формулах расчета вращения стабилизатора

При движении БПЛА вдоль  $OX$  (рисунок 7), вращение подвеса  $\vartheta$  вокруг оси  $OY$ , синхронизировано с движением БПЛА на расстояние  $x$  в сантиметрах по оси  $OX$  и рассчитывается по формуле (9):

$$\vartheta = \tan^{-1} \frac{x}{h - h_{obj}}, \quad (9)$$

где  $h$  – текущая высота БПЛА,  $h_{obj}$  – высота, на которой находится КЭ (провода),  $x$  – это смещение БПЛА по оси  $OX$ . На рисунке 8 траектория полета БПЛА обозначена красной пунктирной линией.

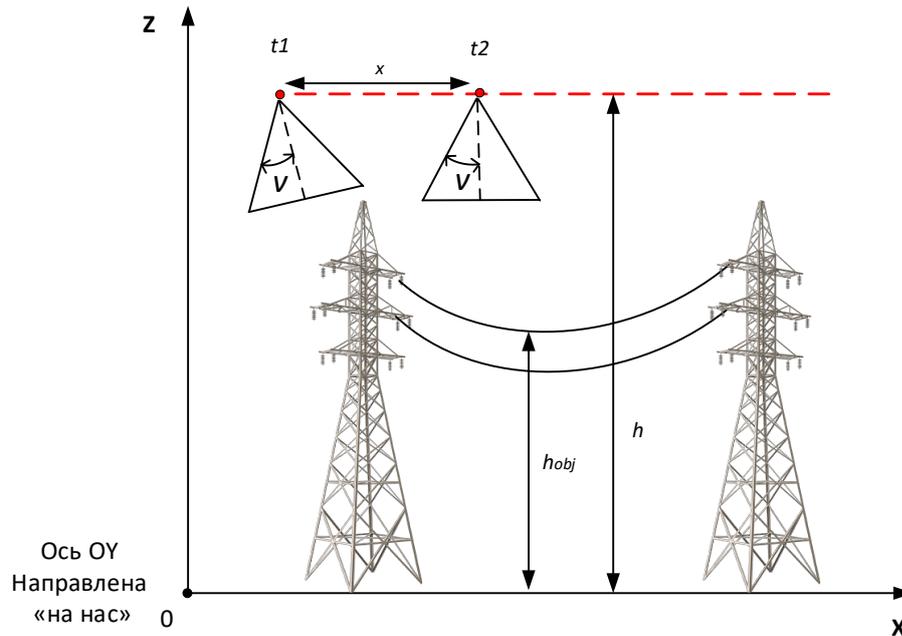


Рисунок 8 – Иллюстрация, связывающая параметры, используемые в формулах расчета вращения стабилизатора при движении БПЛА вдоль  $OX$

Проверка нахождения рассчитанного положения  $X_{P+1}$  в пространстве  $S_{free}$  позволяет избежать столкновения БПЛА с известными препятствиями, обозначенными на карте.

Блок-схема алгоритма движения БПЛА до рассчитанной путевой точки  $X_{P+1}$  показана на рисунке 9.

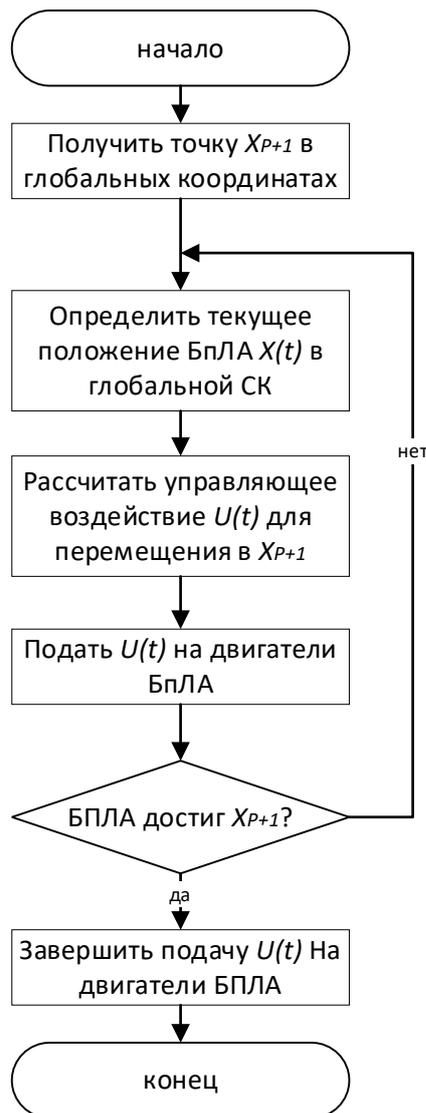


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма движения БПЛА к рассчитанной путевой точке

Перемещение БПЛА вблизи ЛЭП происходит в глобальной СК. На основе данных, полученных с GNSS приемника, определяется текущее положение БПЛА в глобальной СК  $X(t)$ . В каждый момент времени  $t$  на БПЛА оказывается управляющее воздействие посредством вектора управления, компонентами которого являются линейная и угловая скорости БПЛА:  $U(t) = \langle p(t), q(t), r(t), u(t), v(t), w(t) \rangle$ . Для перехода БПЛА в следующую путевую точку  $X_{P+1}$  необходимо рассчитать требуемое управляющее воздействие  $U(t)$ , которое обеспечит перемещение БПЛА в  $X_{P+1}$  с высокой точностью. Расчёт управляющего воздействия происходит на основе функции:

$$U(t) = f(X(t), X_{P+1}, W), \quad (10)$$

которая зависит от текущего положения БПЛА в глобальной СК  $X(t)$ , рассчитанной следующей путевой точки  $X_{p+1}$  в глобальной СК, где должен оказаться БПЛА и внешних воздействий  $W$ , включающих наличие ветра, его скорость и направление. Если компоненты вектора текущего положения БПЛА в глобальной СК равны  $X_{p+1}$ , то на БПЛА перестаёт подаваться управляющее воздействие  $U(t)$ ; иначе происходит перерасчет управляющего воздействия  $U(t)$  для перемещения БПЛА в рассчитанную путевую точку  $X_{p+1}$ . Стоит отметить, что для оценки точности попадания БПЛА в рассчитанную точку используется вероятностная модель, учитывающее текущее положение БПЛА  $X(t)$ , измерения с датчиков БПЛА  $Z_{1:t}$  и вектор управляющих сигналов  $U_{1:t}$ :

$$\hat{x}(t) = \operatorname{argmax} p(X(t) | \operatorname{Map}, Z_{1:t}, U_{1:t}). \quad (11)$$

Отличие разработанного подхода к автоматизированному обследованию ЛЭП заключается в использовании особых паттернов движения БПЛА при обследовании элементов ЛЭП. Расчет каждой путевой точки при полете БПЛА по заданному паттерну траектории происходит динамически в зависимости от параметров камеры, заданного перекрытия кадров и полетного задания.

## 1.2 Компоненты комплекса, реализующего разработанный подход

Определим главные компоненты разработанного комплекса для реализации предлагаемого подхода к автоматизированному обследованию ЛЭП и поиску дефектов на КЭ (рисунок 10).

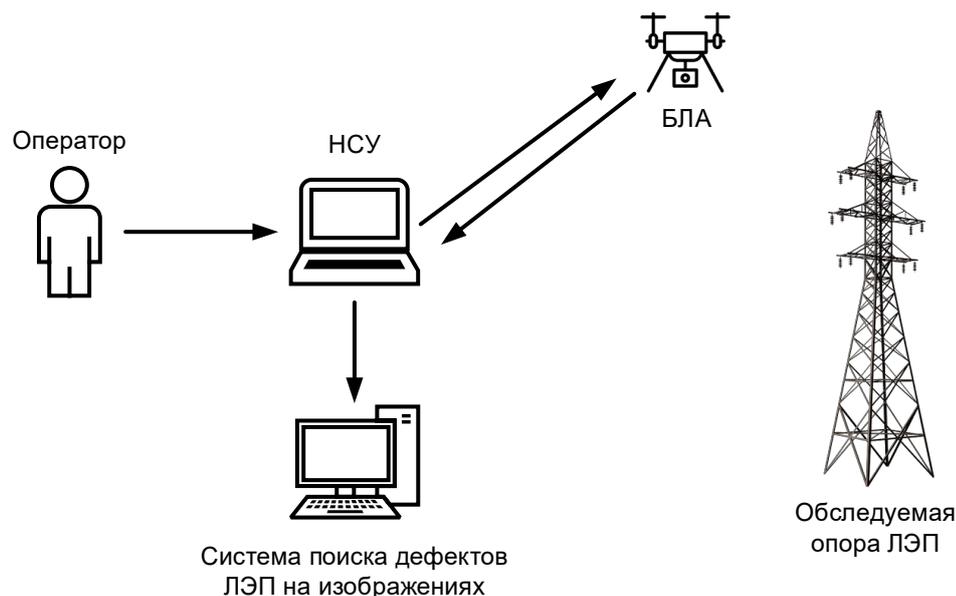


Рисунок 10 – Компоненты комплекса обследования ЛЭП

К основным составляющим комплекса по автоматизированному обследованию ЛЭП относятся: НСУ, система поиска дефектов ЛЭП на изображениях и БпЛА МТ. За работой комплекса следит лицо, принимающее решения – оператор. Определим основные возможности/функционал каждого из них.

Оператор:

- задаёт параметры полётной миссии: выбирает из перечня полетных заданий те, что необходимо реализовать, включая автономный взлёт и посадку; задаёт параметры ЛЭП (высота, координата центра опоры, расстояние между опорами), если они известны; задаёт процент перекрытия между кадрами; задает точку взлета и посадки;
- контролирует процесс выполнения миссии, основываясь на данных, отображающихся на мониторе НСУ;
- обеспечивает техническое обслуживание БпЛА;
- обеспечивает принятие решение при кризисных ситуациях;

НСУ:

- осуществляет связь с БпЛА по радиоканалу в целях передачи полетной миссии или других указаний оператора; отправка команд автономного взлёта, обследования, посадки;
- хранит данные с БпЛА: фотографии в видимом, ИК и УФ спектрах, траектории движения, координаты, время выполнения задач;
- визуализирует процесс выполнения полётной миссии БпЛА, его текущее состояние, параметры, траекторию движения;
- хранит параметры прошедших полетных миссий, а также позволяет создавать миссии заранее (т. е. до выезда бригады операторов);

БпЛА МТ:

- обеспечивает фотофиксацию ключевых элементов ЛЭП в заданных спектрах;
- отправляет по радиоканалу данные о состоянии системы, изменениях от внешних воздействий на НСУ;
- определяет ключевые элементы ЛЭП;
- хранит паттерны движения и осуществляет их выбор в опорных точках;
- производит расчёт путевых точек в зависимости от заданных параметров миссии, текущего паттерна, внешних воздействий и управляющего воздействия

Система поиска дефектов:

- обеспечивает анализ полученных данных в трёх спектрах: видимый, ИК и УФ;
- позволяет предобработать изображения классическими методами (при необходимости);
- позволяет производить ручную разметку полученных изображений;
- обеспечивает поиск/сегментацию дефектов на изображениях методом машинного обучения;
- обеспечивает формирования соотношения оценки площади сегментированных объектов к площади сегментированных повреждений;
- автоматически формирует отчет о состоянии элементов.

На рисунке 11 представлена блок-схема алгоритма, поясняющая функционирование БПЛА в комплексе, который реализует подход к автоматизированному обследованию ключевых элементов ЛЭП. Согласно данному алгоритму БПЛА рассчитывает путевые и опорные точки только после получения данных, которые необходимы для обследования ключевых элементов ЛЭП. Расчет точек происходит в зависимости от полученных данных и данных поступающих от датчиков БПЛА: камера, IMU, RTK GPS. Для движения используются заранее predetermined паттерны: TOLP, CIRP, WIT. Каждому полетному заданию соответствует свой паттерн. В момент смены полетного задания в ключевой точке БПЛА изменяет свой паттерн движения. За расчет путевых и ключевых точек отвечает бортовой вычислитель БПЛА. Движение БПЛА обеспечивается полётным контроллером, который рассчитывает и отправляет управляющие воздействия на двигатели БПЛА МТ. В качестве надстройки на полетный контролер для повышения точности позиционирования БПЛА МТ используется управление с прогнозирующими моделями (model predictive control). Данное управление учитывает ограничения окружающей среды и БПЛА, а также может учитывать события в будущем, потому как оптимизация позиции БПЛА происходит на каждом шаге управления. Обнаружение ключевых объектов в кадре происходит на бортовом вычислителе на основе данных, получаемых с камеры, и методов машинного обучения. Блок-схема на рисунке 11 отражает только высокоуровневое взаимодействие БПЛА с НСУ.

### **1.3 Моделирование движения квадрокоптера по траектории с минимальной ошибкой отклонения в условиях с возмущающими воздействиями**

Движением БПЛА с четырьмя электродвигателями можно управлять, изменяя скорости вращения винтов. Аппарат движется относительно неподвижной глобальной СК, связанной с Землей. Угловое положение аппарата задаем тремя углами Крылова: углами крена  $\varphi$ , тангажа  $\theta$  и рыскания  $\psi$ , определяющими вращение вокруг осей соответственно. Второй закон Ньютона для квадрокоптера будет иметь вид [3]:

$$m \frac{dv}{dt} = f, \quad (12)$$

$f$  – вектор суммарной силы, приложенной к БПЛА. При переходе системы из неподвижной системы координат в подвижную уравнение движение принимает вид:

$$m \frac{dv}{dt} = m \left( \frac{d_A v}{dt} + w \times v \right) = f. \quad (13)$$

Связь между линейными скоростями и инерциальной и подвижной системой отчета задается соотношением:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = R v_A, \quad (14)$$

$R$  – матрица поворота:

$$R = \begin{pmatrix} c\theta c\psi & s\varphi s\theta c\psi - c\varphi s\psi & c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi \\ c\theta s\psi & s\theta s\varphi s\psi + c\varphi c\psi & c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi \\ -s\theta & s\varphi c\theta & c\varphi c\theta \end{pmatrix}, \quad (15)$$

Где  $c\varphi$  и  $s\varphi$  обозначают  $\cos\varphi$  и  $\sin\varphi$ . На квадрокоптер действует сила тяжести. В подвижной системе координат сила тяжести принимает вид:

$$F_g = \begin{bmatrix} mg \sin\theta \\ -mg \sin\varphi \cos\theta \\ -mg \cos\varphi \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Также на квадрокоптер действует подъемная сила:

$$F = k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2). \quad (17)$$

где  $k$  - экспериментально определяемая постоянная, а  $\omega_i^2$  - квадрат скорости вращения  $i$ -ого винта.

Описание движения квадрокоптера задает следующая совокупность уравнений:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi \\ c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi \\ c\varphi c\theta \end{bmatrix} \frac{F}{m}. \quad (18)$$

Эту систему необходимо дополнить силой сопротивления набегающего потока воздуха:

$$F_{\text{сопрот}} = c_d \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (19)$$

Допустим далее, что тело квадрокоптера является симметричным, представляет собой шар радиусом  $R_s$  и массой  $M_s$ , на расстоянии от которого находятся моторы, представленные в виде материальных точек массой  $M_m$  на расстоянии длины лучей  $l$  от центра.

Тензор инерции такого тела имеет вид:

$$J = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где компоненты тензора выглядят следующим образом:

$$J_x = J_y = \frac{2M_s R_s^2}{5} + 2l^2 M_m. \quad (21)$$

$$J_z = \frac{2M_s R_s^2}{5} + 4l^2 M_m. \quad (22)$$

Угловые ускорения определяются уравнениями Эйлера:

$$I \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(F_2 - F_4) \\ L(F_3 - F_1) \\ M_1 - M_2 + M_3 - M_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times I \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Линеаризованная с учетом малых углов тангажа и крена математическая модель квадрокоптера в подвижной системе отсчета имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = -g\theta - \text{sign}(\dot{x})c_d \frac{\rho \dot{x}^2}{2} S_x \\ \ddot{y} = g\varphi - \text{sign}(\dot{y})c_d \frac{\rho \dot{y}^2}{2} S_y \\ \ddot{z} = g - \frac{F}{m} - \text{sign}(\dot{z})c_d \frac{\rho \dot{z}^2}{2} S_z \\ \ddot{\varphi} = \frac{2}{J_x} lk\omega_0(\omega_4 - \omega_2) \\ \ddot{\theta} = \frac{2}{J_y} lk\omega_0(\omega_3 - \omega_1) \\ \ddot{\psi} = \frac{2}{J_z} b\omega_0(-\omega_1 - \omega_3 + \omega_2 + \omega_4) \end{array} \right. \quad (24)$$

Задача движения БПЛА в данной работе может быть интерпретирована, как задача проектирования движения БПЛА по траектории, задаваемой путевыми точками [4]. Для построения гладких кривых, проходящих через заданный набор точек, используется вариационный метод минимизации четвертой производной по времени от координаты [5], т. е. для нахождения кривой, соединяющей две соседние контрольные точки траектории, решается математическая задача:

$$p^*(t) = \text{agr min} \int_0^T (p^{(4)})^2 dt. \quad (25)$$

Здесь  $p^*(t)$  – искомая траектория,  $T$  – время, затрачиваемое на ее прохождение до следующей контрольной точки. Решение подобной вариационной задачи эквивалентно решению дифференциального уравнения 8-ого порядка Эйлера-Лагранжа. Поэтому искомую траекторию нужно задать как полином 7-ой степени времени, например:

$$p_i(t) = \alpha_{i0} + \alpha_{i1} \frac{t-S_{i-1}}{T_i} + \dots + \alpha_{i7} \left(\frac{t-S_{i-1}}{T_i}\right)^7. \quad (26)$$

Здесь введены обозначения:  $S_0 = 0, S_i = \sum_{k=1}^i T_k$  время достижения  $i$ -ой контрольной точки при движении из начальной. Все описанные таким образом полиномы  $p_i, i = 1..n$ , должны удовлетворять  $8n$  условиям для нахождения всех констант  $\alpha_{ij}, i = 1..n, j = 0..7$ , а именно:

$$\begin{cases} p_i(S_{i-1}) = w_{i-1}, p_i(S_i) = w_i, i = \overline{1, n} \\ p_1^{(k)}(S_0) = p_n^{(k)}(S_n) = 0, k = \overline{1, 3} \\ p_i^{(k)}(S_i) = p_{i+1}^{(k)}(S_i), k = \overline{1, 6} \end{cases} \quad (27)$$

Такая система уравнений относительно неизвестных  $\alpha_{ij}$  далее записывается в матричном виде:  $A\alpha = b$ .

Здесь  $A$  – матрица, размером  $8n * 8n$ ,  $\alpha$  – столбец искомых коэффициентов,  $b$  – матрица  $8n * 3$ . Решая систему уравнений отдельно для каждого из столбцов матрицы  $b$ , получаем коэффициенты, задающие траектории  $x(t), y(t), z(t)$  соответственно.

На рисунке 11 проиллюстрирован разработанный подход к автоматизированному обследованию ЛЭП. Как было описано ранее для анализа изображений в различных спектрах были выбраны следующие ключевые элементы ЛЭП: опоры, траверс с изолятором, провода и верхняя часть опоры.



Рисунок 11 - Основные этапы подхода к определению состояния элементов ЛЭП

В основе подхода к определению состояния ЛЭП лежит разработанный метод динамического планирования движения БПЛА для проведения обследования ЛЭП. Первым этапом метода планирования движения БПЛА является создание полетной миссии оператором. Миссия состоит из полетных заданий по обследованию ключевых элементов. Все возможные полетные задания описаны в модели состояний на рисунке 6. После получения полетной миссии от оператора БПЛА начинает движение, сперва обследуя опоры ЛЭП. БПЛА двигается вдоль заданных паттернов траекторий 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 БПЛА необходимо двигаться от одной ключевой точки к другой. БПЛА двигается от одной опорной точки до другой в заданном порядке обследования элементов за счет алгоритма динамического планирования путевых точек, учитывающий минимально допустимое расстояние до ЛЭП, параметры камеры и динамики дрона. Все собранные данные (фотографии в видимом, ИК и УФ спектрах) анализируются системой поиска дефектов элементов ЛЭП на изображениях на определение состояния элементов ЛЭП методом машинного обучения.

2. Разработка программного обеспечения для реализации автоматизированного подхода к мониторингу ЛЭП. На основе разработанного подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП при помощи БПЛА предлагается разработать набор программного обеспечения для решения задачи автоматизированного мониторинга ЛЭП. Программное обеспечение будет включать ROS модули навигации и движения БПЛА, протокол передачи данных MAVROS, контроллер автопилота БПЛА PX4, программный модуль системы компьютерного зрения для обнаружения ключевых элементов ЛЭП. Данное программное обеспечение позволит автономно управлять перемещением БПЛА в пространстве, производить съемку объекта в различных спектрах и обследовать заранее выбранные части ЛЭП.

## 2.1 Программное обеспечение БПЛА

При обследовании элементов и участков ЛЭП посредством БПЛА предполагается, что БПЛА должен обеспечивать свое точное позиционирование и определение местоположения на открытой местности. Рассмотрим действия БПЛА в виде модели состояний для проведения мониторинга элементов ЛЭП (рисунок 12).

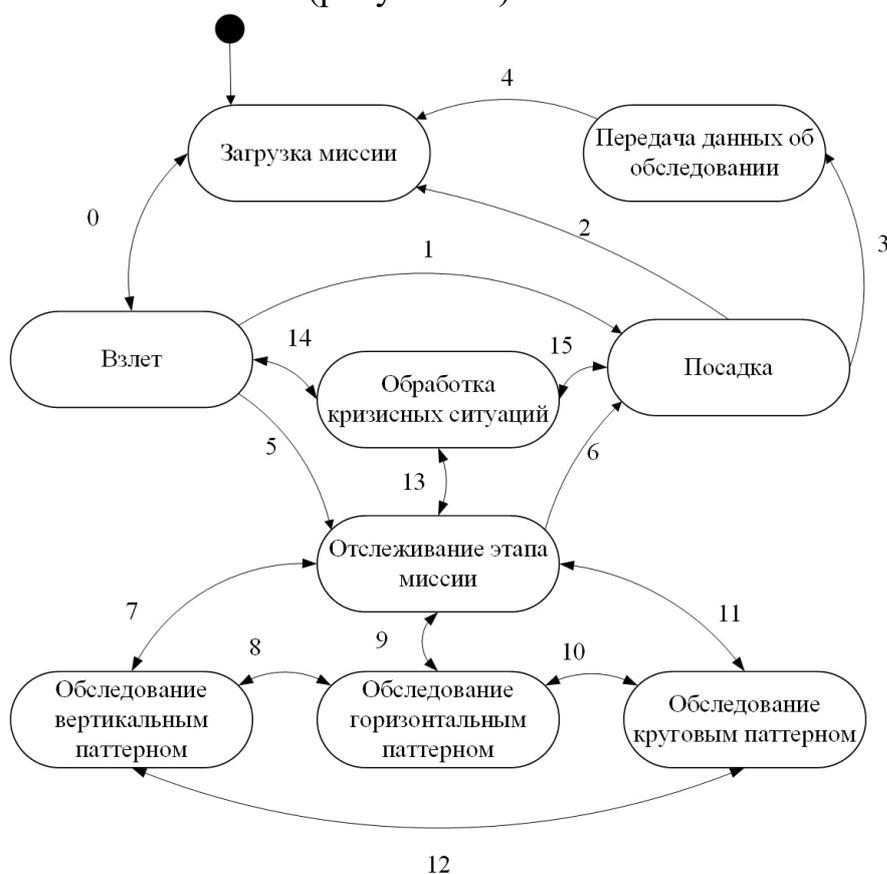


Рисунок 12 – Модель состояний БПЛА при обследовании ЛЭП, где цифрами обозначены переходы между состояниями

Каждое состояние – это определенное полетное задание для БПЛА. Совокупность полетных заданий называется полетной миссией. Для обеспечения автоматизированной работы системы оператор задает миссию обследования на подготовительном этапе и не может корректировать её по ходу работы БПЛА. Самая короткая миссия обследования состоит из взлета и посадки. Самая длинная миссия будет состоять из взлета, обследование вертикальным паттерном, обследование горизонтальным паттерном, обследование круговым паттерном и посадки. Порядок обследования ключевых объектов может меняться. Однако, обследование вертикальным паттерном 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 вертикальным паттерном, далее по порядку обследование круговым паттерном и в конце обследование вертикальным паттерном. Переходы между состояниями обследования элементов ЛЭП происходят через состояние «Отслеживание миссии», данное состояние проверяет корректность выполнения полетной миссии. После взлета система анализа видеопотока детектирует объект интереса, например, башню ЛЭП, траверс или сам провод. В зависимости какой объект удалось обнаружить - модель состояний перейдет в один из трех состояний («Обследование вертикальным паттерном», «Обследование горизонтальным паттерном», «Обследование круговым паттерном»). Состояние «Отслеживание миссии» переводит систему в состояние «Посадка». Во время полета БПЛА могут возникать различные ошибки, такие как низкий заряд аккумулятора, низкий уровень сигнала до наземной станции или ошибка определения объекта через систему анализа видеопотока. В таком случае система переходит в состояние «Обработка кризисных ситуаций», где система решает совершать посадку или продолжать миссию. БПЛА отправляет полученные данные об обследовании после завершения посадки и переходит в ожидание новой полетной миссии. Миссия закончена в момент посадки БПЛА. После успешной посадки БПЛА отправляет результаты обследования на НСУ и переходит в состояние ожидания новой миссии.

На основе представленной выше модели состояний (рисунок 12), была предложена следующая структура ROS для её реализации на БПЛА. На рисунке 13 изображена структура «ROS RQT graph», плагина для визуализации модулей, которые отвечают за функционирование системы мониторинга ЛЭП.



Рисунок 13 – Структура функционирования модели в ROS

Модуль внешней связи обеспечивает соединение с наземной станцией и позволяет отправлять различные данные с устройства на БПЛА и в обратную сторону. На схеме показано, что модуль внешней связи принимает сообщение «/mission/loading» – это означает что полетная миссия готова и требуется её загрузка на БПЛА. В этом случае БПЛА меняет состояние «Ожидание» на «Загрузка миссии», для этого модуль «Локализации и Навигации» отправляет управляющие сигналы на все двигатели о переходе в полетный режим для отправления миссии. В зависимости от нахождения БПЛА в воздухе или на земле полетный режим будет следующего типа: либо удержание точки в воздухе или режим загрузки миссии на земле. Затем на полетный контроллер загружаются ключевые точки, по которым будет проводиться обследование ЛЭП.

При выборе состояния «Обследование вертикальным паттерном» из предыдущего пункта, на модуль навигации и локализации БПЛА

отправляется необходимая информация с датчиков для того, чтобы управляющие воздействия на двигатели обеспечивали полет строго в необходимом направлении учитывая расстояние до объекта.

В случае экстренных ситуаций модель состояний БПЛА переводит систему в состояние «Экстренной ситуации» и по заранее заданному алгоритму действий принимается решение удержания позиции или совершения посадки.

Структура системы автоматического слежения за траекторией строится по схеме, в которой, как показано на рисунок 14, регулятор, представленный блоком 1, на основе текущих отклонений каждой координаты положения центра масс от заданного, формирует управляющие воздействия  $u_i(t), i = \overline{1,4}$  на четыре электропривода пропеллеров. Блоком 2 представлены четыре электропривода, которые вырабатывают вращающие моменты на винты, заставляя их вращаться с частотой  $\Omega_i(t), i = \overline{1,4}$ . Блоки 3,4 моделируют уравнения 5 и 6 формируя подъемные силы  $F_i(t), i = \overline{1,4}$  и осевые моменты  $M_i(t), i = \overline{1,4}$  пропеллеров.

$$F_i(t) = c_F p(t) r^2 S \Omega_i(t)^2, i = \overline{1,4}. \quad (28)$$

$$M_i(t) = c_M p(t) r^3 S \Omega_i(t)^2, i = \overline{1,4}. \quad (29)$$

где  $c_F$ - коэффициент тяги,  $p(t)$ - изменяемая плотность воздуха,  $r$ ,  $S$ – радиус ротора и площадь диска, который образует винт соответственно,  $c_M$  – конструктивная постоянная.

В блоке 5 формируются управляющие функции:  $U1(t)$  – результирующая нормированная тяга;  $U2(t), U3(t), U4(t)$  – управляющие функции для крена, тангажа и рысканья соответственно. В блоке 6 выполняется переход от подвижной системы координат к неподвижной, формируя текущие значения углов крена, тангажа и рысканья. В блоке 7 моделируются процессы (6), выходными сигналами блока являются текущие координаты положения центра масс квадрокоптера в неподвижной системе координат. Эти сигналы формируют отрицательную обратную связь в системе траекторного управления.

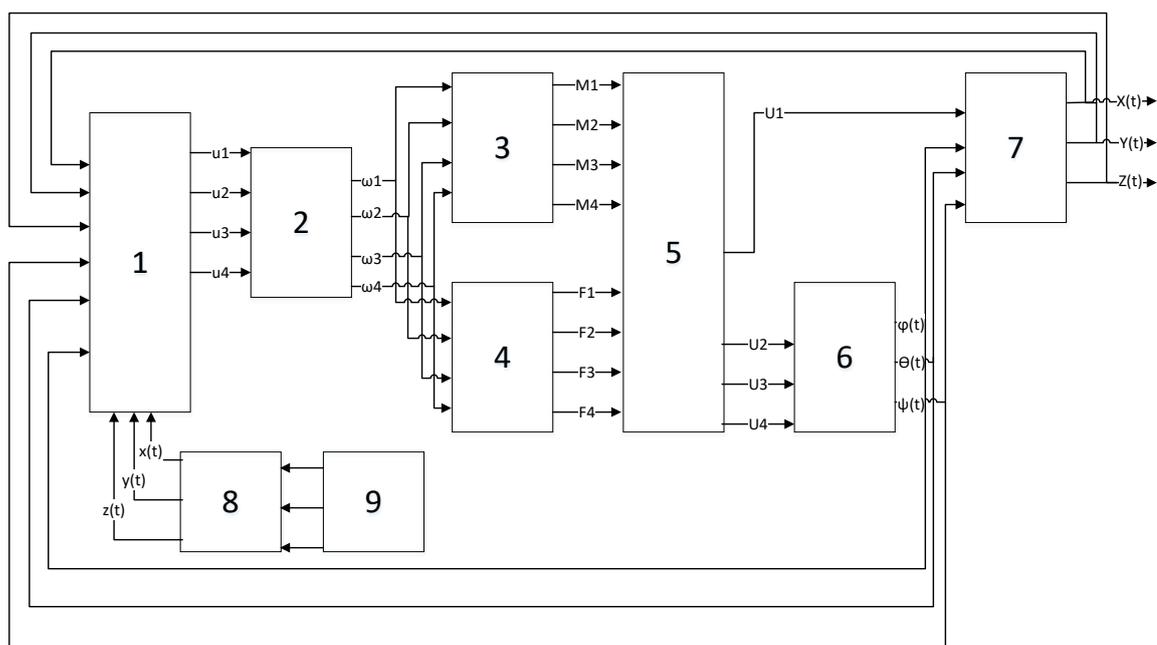


Рисунок 14 - Структура автоматической системы отслеживания траектории

Задача управления траекторным полетом квадрокоптера представляется как последовательность задач перелета из точки в точку маршрута на основе прямолинейных траекторий. Система управления полетом является следящей и предназначена для воспроизведения задаваемой траектории полета.

Для моделирования БПЛА и взаимодействия с ЛЭП в ROS и Gazebo были разработаны динамическая и 3D-модель БПЛА мультироторного типа, а также набор 3D-моделей трасс ЛЭП.

Динамическая модель нелинейной системы была реализована на языке программирования C++ для удобства интеграции в ROS. Для моделирования в Gazebo была построена 3D-модель БПЛА для визуализации процесса функционирования и моделирования столкновений (рисунок 15).



Рисунок 15 – Модель БПЛА и ЛЭП в симуляторе Gazebo

Среди различных возмущений, воздействующих на реальную систему, было выбрано два типа возмущений (помех), как имеющие наибольшее влияние и поэтому они были введены в имитационную модель: ошибка

местоположения GPS и ветер. Информация о местоположении GPS моделировалась как процесс случайного блуждания с дрейфом и гауссовским шумом. Ветер был смоделирован как трехмерный вектор с низкочастотной частью, полученной из типичного распределения Вейбулла, и высокочастотной частью с гауссовским шумом, представляющим порывы ветра. Вектор влияет на скорость БПЛА в каждом направлении поступательного движения.

## 2.2 ПО НСУ

Для того чтобы БПЛА выполнял сформированную миссию, описанную в пункте 2.1, она должна создаваться в пользовательском интерфейсе оператора. Для реализации ПО НСУ была разработана следующая модель состояний (рисунок 16), чтобы реализовать необходимый функционал НСУ.

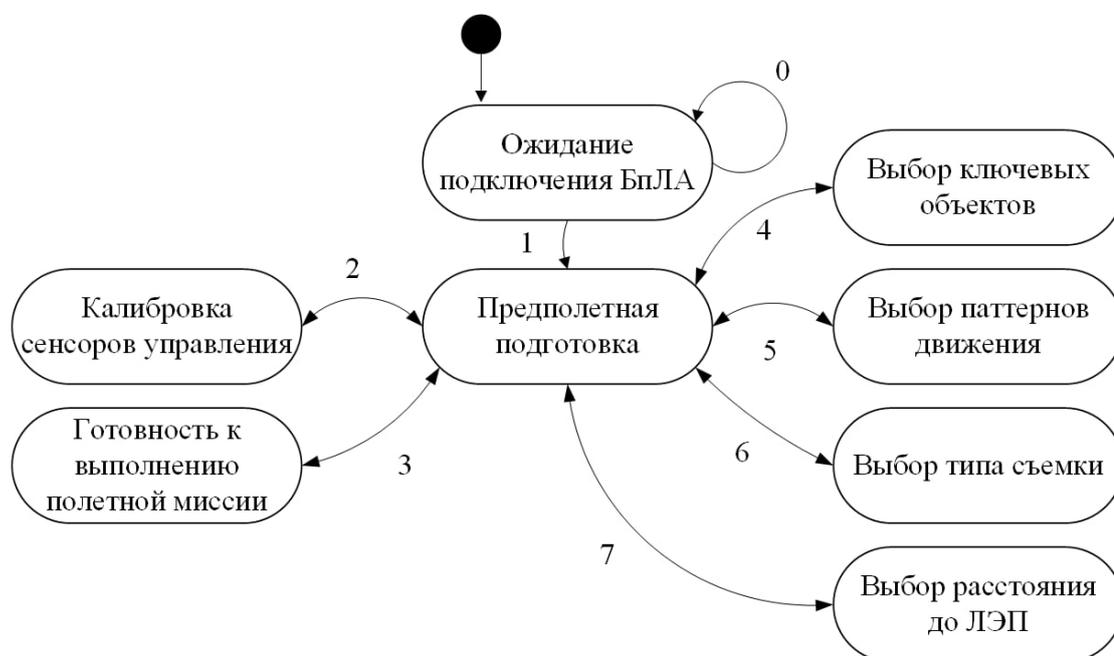


Рисунок 16 – Модель состояний НСУ

Вход в модель состояний происходит в состояние «Ожидание подключения БПЛА». В данном состоянии НСУ ожидает подключения БПЛА неограниченное время без уведомлений о каких-либо ошибках или временных задержках. Из состояния «Ожидание подключения БПЛА» система переходит в состояние «Предполетная подготовка». Где отображаются все характеристики БПЛА и при необходимости производится настройка и калибровка БПЛА. Затем оператор переводит систему в режим формирования полетной миссии, за это отвечают состояния «Выбор ключевых объектов», «Выбор паттернов движения», «Выбор типа съемки», «Выбор расстояния до ЛЭП». Состояние «Выбор ключевых объектов»

позволяет выбрать какие элементы ЛЭП необходимо обследовать: башня ЛЭП, траверсы, провода и т. д. Состояние «Выбор паттернов движения» позволяет выбрать те паттерны, которые необходимы при обследовании определенных элементов ЛЭП. В данном состоянии оператор выбирает какие паттерны движения необходимы для обследования конкретной ЛЭП. В момент, когда полетная миссия сформирована – БПЛА готов к выполнению полетной миссии, а, следовательно, ко взлету. Состояние «Выбор съемки», позволяет настроить навесное оборудование, которое установлено на БПЛА. Состояние «Выбор расстояния до ЛЭП» позволяет установить оператору минимальное расстояние для БПЛА, при котором будет проводиться обследование ЛЭП.

Оператор с помощью пользовательского интерфейса формирует полетную миссию и сохраняет его в стандартный файл с расширением *.plan*. На рисунок 17 показана часть пользовательского интерфейса, где формируется полетная миссия.

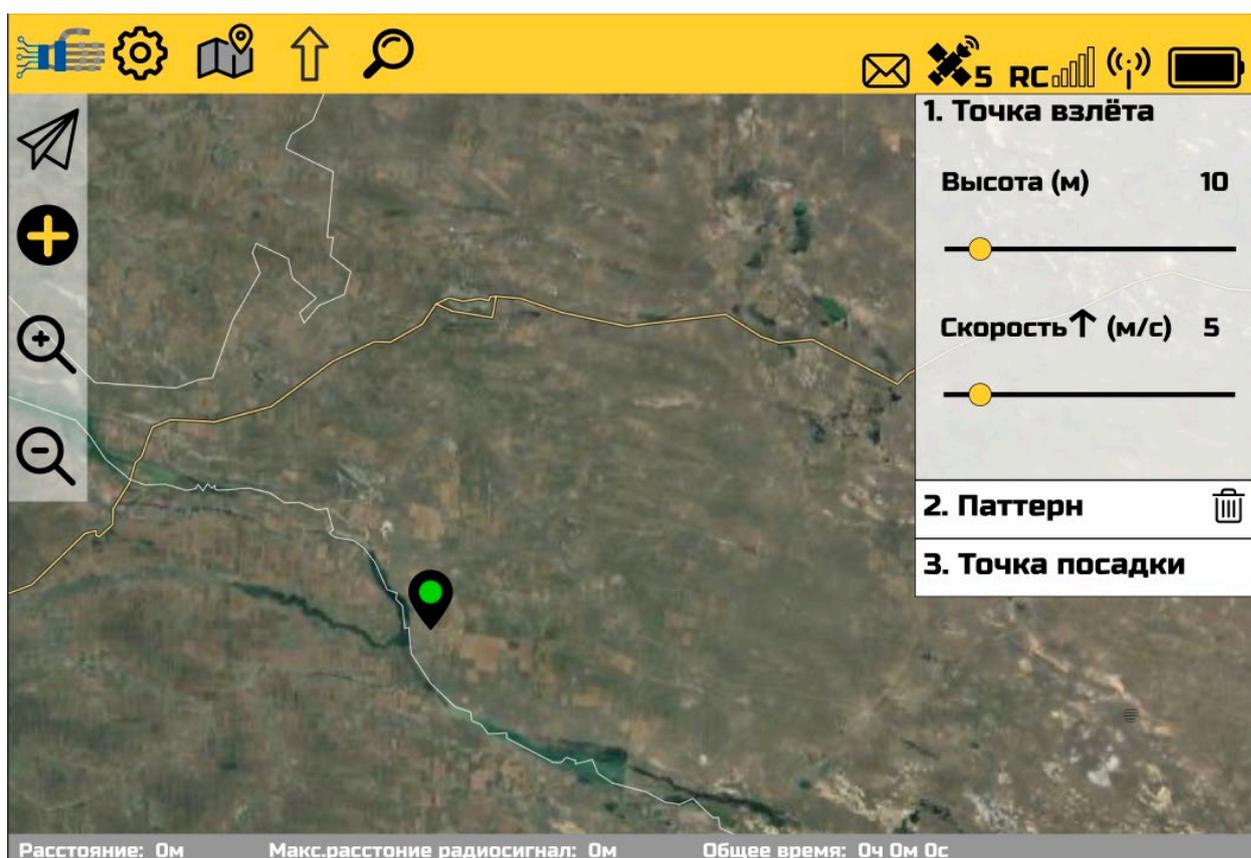


Рисунок 17 – Окно формирования полетной миссии в пользовательском интерфейсе

Элементы пользовательского интерфейса (рисунок 17): в верхней панели с левой стороны располагается кнопки выхода для перехода на стартовое окно, настройки БПЛА, формирование полетной миссии, окно готовности к полету и окно передачи данных после выполнения миссии. В

верхней панели справа стороны располагаются информационные сообщения с БПЛА, количество спутников, уровень сигнала с пульта управления и телеметрии, заряд аккумулятора наземной станции. В левой панели в иконке с «плюсом» добавляются ключевые точки, также справа панели производится настройка высоты и средней скорости полета. Во вкладке паттерн производится выбор паттернов движения.

С помощью разработанного пользовательского интерфейса можно открыть изображение с камеры БПЛА (рисунок 18).

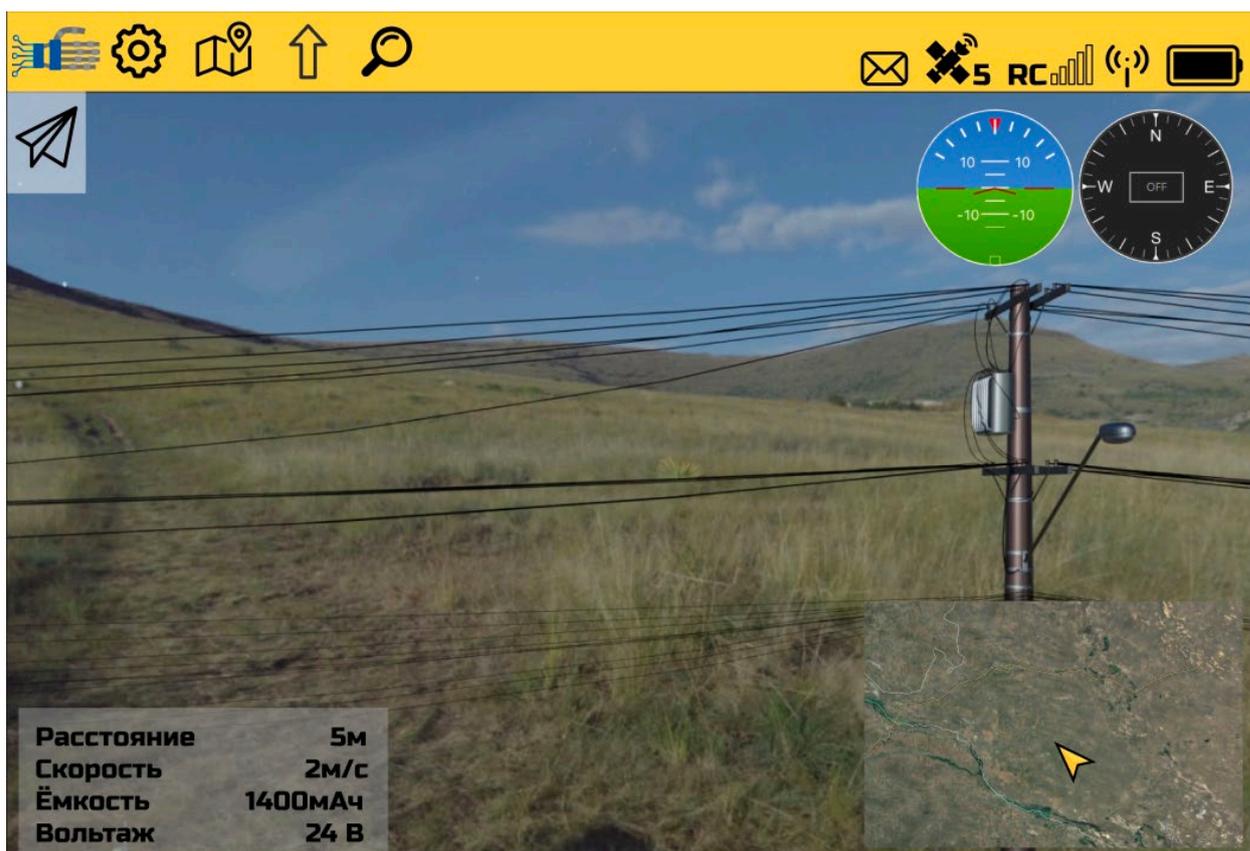


Рисунок 18 – Окно изображения с камеры в пользовательском интерфейсе.

Окно на рисунке 18 открывает на все ширину изображение с камеры, а карта сворачивается в миниокно. Также можно произвести обратное действие открыть карту на всю ширину экрана, а изображение с камеры свернуть в маленькое окно. В данном окне отображаются индикаторы с датчиков гироскопа и GPS. В левом нижнем углу показаны расстояния до объекта, скорость полета БПЛА, потраченная емкость и напряжение аккумулятора.

На рисунке 19 представлена процедура формирования траектории обследования и загрузки её в QGroundControl для дальнейшей отправки на БПЛА по радиоканалу.

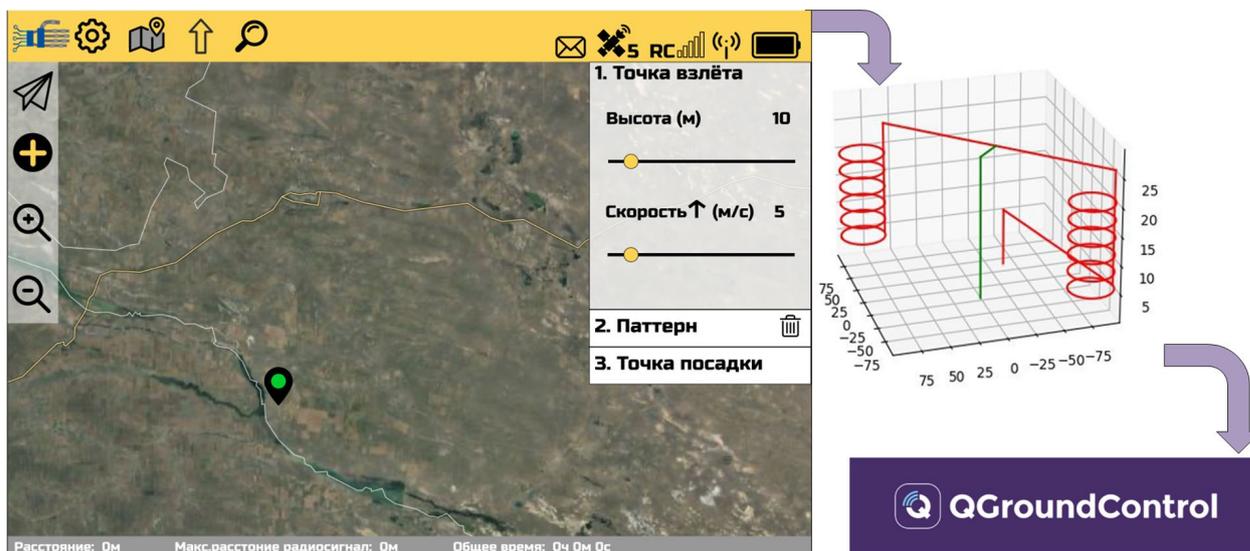


Рисунок 19 – Взаимодействие пользовательского интерфейса с другими системами

Для выполнения полетной миссии требуется наземная станция управления с пользовательским интерфейсом для конфигурации параметров миссии, отображения различных характеристик БПЛА, таких как уровень заряд аккумулятора, количество спутников и качество их сигнала, уровень сигнала с наземной станции и т. д. Так же наземная станция позволяет произвести калибровку всех датчиков на БПЛА. После формирования миссии для обследования ЛЭП её можно отправить в ПО QGroundControl в котором возможно отследить параметры БПЛА во время полета.

3. Анализ полученных данных по результатам тестирования автоматизированного подхода мониторинга ЛЭП. Планируется провести дополнительные исследования и сбор данных в симуляторе ROS-Gazebo, а также исследование методов и подходов обработки изображений на основе базы данных, полученной на предыдущих этапах проекта. Будет проведена оценка корректности построенных траекторий для движения БПЛА, точность определения элементов ЛЭП во время движения БПЛА при обследовании ЛЭП, точность обнаружения дефектов на элементах ЛЭП.; Данный анализ позволит судить о применимости разработанных решений с целью их использования в реальных условиях для проведения автоматизированного мониторинга ЛЭП.

### 3.1 Оценка корректности построенных траекторий для движения БПЛА

Для того, чтобы оценить корректность построенной траектории необходимо оценить разницу между сгенерированной траекторией обследования ЛЭП и фактической траекторией *deltaPath* (рисунок 20),

которая напрямую зависит от динамической модели БПЛА и системы управления БПЛА, включая блок предварительной оценки движения (Model Predictive Control).



Рисунок 20 – Отклонение фактической траектории от сгенерированной

Динамика БПЛА может быть описана как в [6]. Система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_e = (s\psi s\varphi + c\psi s\theta c\varphi) \frac{U1}{m} \\ \ddot{y}_e = (-c\psi s\varphi + s\psi s\theta c\varphi) \frac{U1}{m} \\ \ddot{z}_e = -g + (c\theta c\varphi) \frac{U1}{m} \\ \ddot{\varphi} = \frac{(J_{yy} - J_{zz})\dot{\theta}\dot{\psi}}{J_{xx}} + \frac{U2}{J_{xx}} \\ \ddot{\theta} = \frac{(J_{zz} - J_{xx})\dot{\varphi}\dot{\psi}}{J_{yy}} + \frac{U3}{J_{yy}} \\ \ddot{\psi} = \frac{(J_{xx} - J_{yy})\dot{\theta}\dot{\varphi}}{J_{zz}} + \frac{U4}{J_{zz}} \end{array} \right. \quad (30)$$

описывает нелинейную динамику квадрокоптера в неподвижной СК (системе координат). Абсолютное положение и ориентация БПЛА получаются путем двойного интегрирования углового и линейного ускорений из приведенной выше системы дифференциальных уравнений. Четыре управляющих воздействия системы: это общая сила (или тяга)  $U1$ ; и три момента  $U2$   $U3$   $U4$  относительно трех осей тела.

Как было сказано ранее для оценки корректности построенной траектории разработанного метода автономного движения БПЛА вблизи ЛЭП была выбран ROS и симулятор Gazebo. ROS [7] 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 [8] – это симулятор с открытым исходным кодом, является наиболее часто используемым симулятором в ROS (см. пункт 2 Отчета). Также в работе использовался готовый полетный контроллер БПЛА с открытым исходным кодом PX4 [9]. Разработанная платформа моделирования основана на инструментальной цепочке ROS-Gazebo-PX4 (рисунок 21).

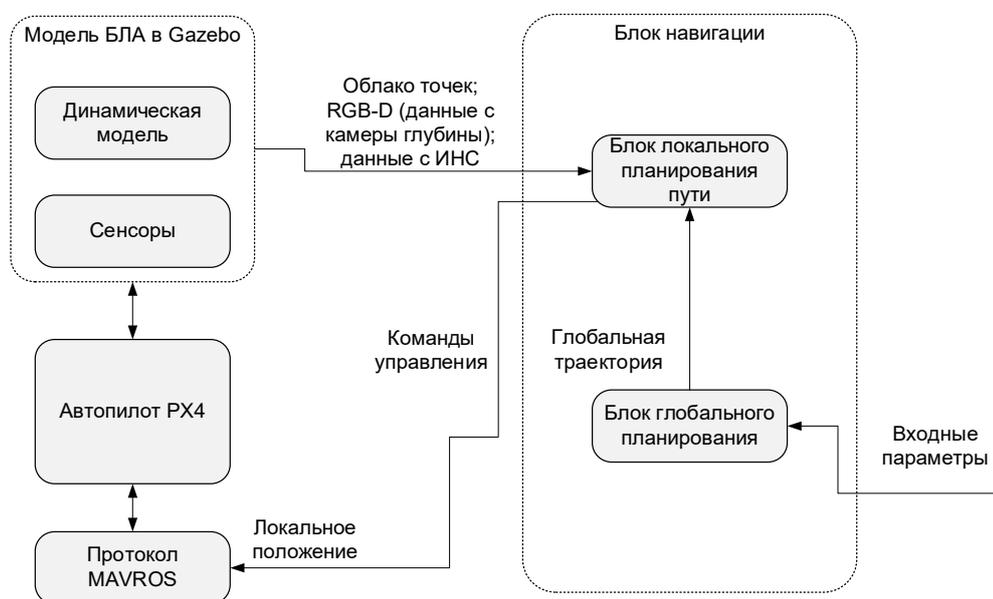


Рисунок 21 – Общая архитектура Gazebo-ROS-PX4

Все компоненты в представленной архитектуре согласованы через разные топики в ROS. В частности, связь между навигационной системой и PX4 осуществляется через MAVROS. Симулятор автопилота PX4 обменивается данными с Gazebo моделью БПЛА, чтобы получать данные датчиков из моделируемого мира и отправлять обратно команды двигателям и исполнительным механизмам.

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 поиска путевой точки на основе выборки, называемый методом эвристического углового поиска (HAS). Наличие глобального планировщика предотвращает столкновение БПЛА с известными препятствиями. Глобальный планировщик использует алгоритм построения траектории обследования для вывода серии путевых точек, далее найденный путь сглаживается методом Безье. Цель локального планировщика пути - найти касательную в первой путевой точке кривой Безье [10]. Два

планировщика работают параллельно. Хотя частота внешнего контура глобального планировщика низкая, внутренний контур локального планировщика поддерживает высокую частоту обновления и может непрерывно управлять БПЛА [11].

Все модули навигации: глобальное планирование, локальное планирование, реализованы в виде пакетов и тем ROS. 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.

Для того, чтобы доказать эффективность использования предложенного метода был реализован блок глобального планирования пути в виде ROS узла. На вход подается файл с параметрами участка ЛЭП. На основе этих параметров строится глобальная траектория для БПЛА. Рассчитанная траектория учитывает допустимое расстояние до ЛЭП и высоту опор ЛЭП. Построенная траектория отправляется на полетный контроллер для дальнейшего движения БПЛА в симуляторе. В качестве экспериментальных данных были замерены время расчета траектории и выполнения миссии в базовом автоматическом режиме и сравнение временных показателей с ручной миссией. Для каждого эксперимента проводилась серия из 25 тестов и в таблице занесены средние показатели времени. Все результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментов

	Миссия в ручном режиме	Миссия в автономном режиме
	Среднее время настройки полетной миссии в ручном режиме, с	Среднее время расчета глобальной траектории, с
	120	0.15
	Среднее время полета в ручном режиме, с	Среднее время автономного полета по рассчитанной траектории обследования, с
	1627	1461
Суммарное время, с	1747	1461.15

На рисунке 22 показаны рассчитанные траектории обследования участка ЛЭП, состоящего из двух опор и проводов между ними. Для расчета траектории были заданы следующие параметры трассы ЛЭП: количество опор – 2, высота опор – 20 м, шаг покрытия (высота кадра), безопасное расстояние до опоры 3 м, расстояние между опорами 226 м.



$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)), \quad (31)$$

$$h(A, B) = \max(\min \text{dist}(a_i, b_j)), a_i \in A, b_j \in B. \quad (32)$$

$$h(B, A) = \max(\min \text{dist}(b_i, a_j)), a_j \in A, b_i \in B. \quad (33)$$

Кроме того, сравнить две траектории можно с помощью метода одностороннего расстояния OWD (One Way Distance), который является простым и эффективным способом вычисления расстояния между траекториями. Сначала задается расстояние между точкой  $p$  и всей траекторией  $A$ .

$$D_{point}(p, A) = \min \text{dist}(p, q), q \in A. \quad (34)$$

Далее находим расстояние между траекториями  $A$  и  $B$  следующим образом:

$$D_{owd}(A, B) = \frac{1}{|A|} \sum D_{point}(p, B), p \in A. \quad (35)$$

$$D(A, B) = 0.5(D_{owd}(A, B) + D_{owd}(B, A)). \quad (36)$$

Пусть  $A$  – сгенерированная траектория БПЛА, а  $B$  – фактическая траектория движения БПЛА, тогда для оценки корректности траектории  $B$  необходимо сравнить среднее значение отклонения  $deltaPath$  по метрике расстояние Хаусдорфа или OWD. Для корректной траектории среднее значение отклонения должно быть минимальным и не превышать в случае данного исследования минимально допустимого расстояния до ЛЭП – 2.5 м.

В таблице 4 представлены результаты 25 экспериментов (т.е. бралось среднее значение отклонения траекторий) пролета БПЛА вдоль сгенерированной траектории рядом с ЛЭП. Более того, для сравнения, в таблицу занесены результаты 25 пролетов в ручном режиме.

Таблица 4 – Сравнение среднего отклонения фактической траектории БПЛА

№	Значение отклонения $deltaPath$ (метрика расстояние Хаусдорфа), м	Значение отклонения $deltaPath$ (метрика OWD), м	Значение отклонения $deltaPath$ (метрика расстояние Хаусдорфа), м	Значение отклонения $deltaPath$ (метрика OWD), м
	Ручной способ пролета БПЛА вблизи ЛЭП		Разработанный (автономный) способ пролета	
1	2,12	2,01	0,11	0,15
2	2,05	1,99	1	0,6
3	1,99	1,87	0,02	0,07
4	2,74	2,08	0,39	0,27
5	2,76	2,17	0,81	0,1
6	2,90	2,05	0,1	0,98
7	2,67	2,37	0,96	0,66

8	2,55	2,29	1,01	0,28
9	2,31	2,32	0,44	0,16
10	2,25	2,12	0,83	0,1
11	2,62	2,13	0,72	0,12
12	2,66	2,63	0,9	0,87
13	2,69	2,19	0,25	0,91
14	2,73	2,01	0,64	0,71
15	2,76	2,39	0,01	1,15
16	1,89	1,88	0,47	0,42
17	1,90	1,89	0,19	0,37
18	2,18	1,99	0,08	0,71
19	2,16	2,10	0,67	0,54
20	2,10	2,09	0,21	1,9
21	2,60	2,25	0,06	1,04
22	2,91	2,23	0,13	0,44
23	2,57	2,39	0,02	0,83
24	2,78	2,01	0,17	0,22
25	2,99	2,17	0,9	1,7
Средние значения				
	2,4756	2,1448	0,4436	0,612

Разработанная модель глобального планирования значительно ускоряет процесс создания миссии, а время полета в автономном режиме по рассчитанной траектории уменьшилось на 11%, по сравнению со временем полета в ручном режиме и позволяет значительно упростить работу оператора при использовании БПЛА. В результате экспериментов было получено среднее отклонение фактической траектории движения БПЛА от сгенерированной глобальным планировщиком траектории обследования ЛЭП. Для расчета были использованы две метрики: расстояние Хаусдорфа и OWD. В результате сравнения удалось установить, что максимальное отклонение не превышает 0.4 м, что допустимо при движении рядом с трассой ЛЭП.

### 3.2 Сбор данных о дефектах ЛЭП

В задаче мониторинга состояния ЛЭП одной из основных проблем является выработка методик для сбора информации о повреждениях элементов ЛЭП. Существует широкий набор повреждений элементов ЛЭП

[12]. Среди данного набора особо следует выделить следующие классы: повреждения изоляторов (сколы, отсутствие частей, коронный разряд), повреждения опор (коррозия, наличие гнезд птиц, падение), повреждения проводов (обрыв, нагрев, наличие посторонних предметов), арматуры (отсутствие деталей, поломка деталей, нагрев). При этом специфика каждого класса повреждений должна определять соответствующую методику сбора данных. Действия, входящие в методику, должны учитывать требования к собираемой выборке данных, чтобы на основе анализа собранных данных можно было с высокой эффективностью определять повреждения того или иного вида. Однако, этим вопросам также уделяется не достаточное внимание в современной научной литературе. Также возникают трудности в сборе репрезентативных выборок достаточного объема для моделей глубокого обучения, что может быть вызвано малой распространенностью повреждений и необходимостью их целенаправленного поиска в реальных ЛЭП.

Часть классов повреждений могут быть определены при помощи непосредственного визуального осмотра элементов ЛЭП, либо изображений элементов ЛЭП, полученных посредством БпЛА. Однако, часть классов повреждений не может быть выявлена на основе непосредственного визуального осмотра. Основными такими классами повреждений являются нагрев элементов ЛЭП и коронный разряд изоляторов ЛЭП. При этом повреждения данных классов легко определяются на основе визуального анализа изображений, полученных в ультрафиолетовом и инфракрасном спектрах для коронного разряда и нагрева элементов ЛЭП соответственно, что не требует задействования интеллектуальных методов распознавания. При этом, вопросам систематизации и унификации процесса сбора данных таких повреждений посредством БпЛА в указанных спектрах также уделяется недостаточно внимания.

Еще одним аспектом общей автоматизации процесса мониторинга является автоматизация частного процесса анализа визуальных данных (изображений) в различных спектрах для определения класса повреждения элементов ЛЭП. Для автоматизации процесса анализа целесообразнее всего применять методы машинного зрения, основанные на подходах глубокого обучения: подходы глубокого обучения показывают лучшие результаты в различных задачах компьютерного зрения: классификации объектов [13], детекции объектов на изображениях [14, 15], сегментации объектов [16-18] и т.д. Это делает подходы глубокого обучения наиболее перспективными в задаче автоматизации анализа изображений с БпЛА, на которых отображены повреждения элементов ЛЭП. Подходы глубокого обучения, в свою очередь,

требуют больших репрезентативных обучающих выборок для обеспечения эффективного решения соответствующей задачи [19]. Одним из путей формирования репрезентативных выборок данных является четкое определение и унификация условий и требований к выборкам: условий получения данных, распределения данных, требований к решаемой задаче, условий конкретных ситуаций получения данных, методик разметки и т.д. Посредством формирования однозначных условий и требований к выборкам определяются инварианты в данных и снижается степень их неопределенности. Репрезентативные выборки изображений обычно собираются посредством унификации ракурсов съемки объектов, что позволяет отразить на двумерном изображении большинство признаков, представленных в пространстве, а также снизить неопределенность в данных [20-22]. Однако, на данный выборки изображений, по большей части, собираются не систематизировано и не унифицировано не только при анализе повреждений ЛЭП, но в более общих задачах анализа изображений. Несистематизированность в требованиях к процедурам сбора и разметки данных ведет к тому, что результаты, достигнутые алгоритмом машинного обучения на одной выборке данных, становится невозможным обобщить на другую сходную выборку данных.

В рамках данной работы предлагается новая методика построения траектории автономного движения БПЛА, выполняющего инспекцию опор ЛЭП посредством сбора визуальных данных о состоянии элементов ЛЭП в ультрафиолетовом и инфракрасном спектрах для выявления коронного разряда и нагрева элементов ЛЭП. Научная новизна методики заключается в планировании траектории полета малого БПЛА мультироторного типа с учетом конструкционной особенности конкретных ЛЭП, а также с учетом требований к собираемым визуальным данным в ультрафиолетовом и инфракрасном спектрах.

Ввиду обозначенных выше сложностей с организацией, проведением полетов БПЛА для сбора реальных данных, необходимостью наличия дорогостоящего оборудования, а также в связи с трудностями в сборе репрезентативных выборок повреждений элементов ЛЭП, в рамках данной работы была выполнена симуляция полета со сбором данных в среде Blender. Помимо отсутствия необходимости согласовывать полеты БПЛА, симуляция также позволяет смоделировать требуемые виды повреждений на элементах ЛЭП и получить выборку требуемого размера и свойств.

Предлагаемая методика состоит из следующих шагов:

1. Предварительный анализ предметной области и определение основных ее составляющих

- а. Описание конструкционных особенностей ЛЭП
  - б. Описание рассматриваемых повреждений ЛЭП
2. Определение требований к собираемым данным
3. Формирование траектории для каждой задачи
4. Моделирование сцен в Blender и определение конструкционных особенностей опор ЛЭП
5. Выполнение полета, сбор и постобработка данных
6. Выполнение разметки полученных данных и анализ выполненной разметки

Далее подробно раскрывается каждый этап предлагаемой методики.

### 3.3 Описание конструкционных особенностей ЛЭП

Современные воздушные ЛЭП состоят из однотипных опор, к которым посредством траверс, кронштейнов и изоляторов подсоединены кабели, по которым выполняется передача электрической энергии. В рамках данной работы были рассмотрены ЛЭП трех типов [23]:

1. Низковольтная ЛЭП с деревянными опорами, штыревыми изоляторами и расчетным напряжением 0,4 кВ;
2. Высоковольтная ЛЭП с металлическими решетчатыми опорами, оборудованными гирляндами из 2-5 подвесных изоляторов, и расчетным напряжением 35 кВ;
3. Высоковольтная ЛЭП с бетонными опорами, штыревыми изоляторами и расчетным напряжением 6 кВ.

Все рассматриваемые типы ЛЭП приведены на рисунке 24.

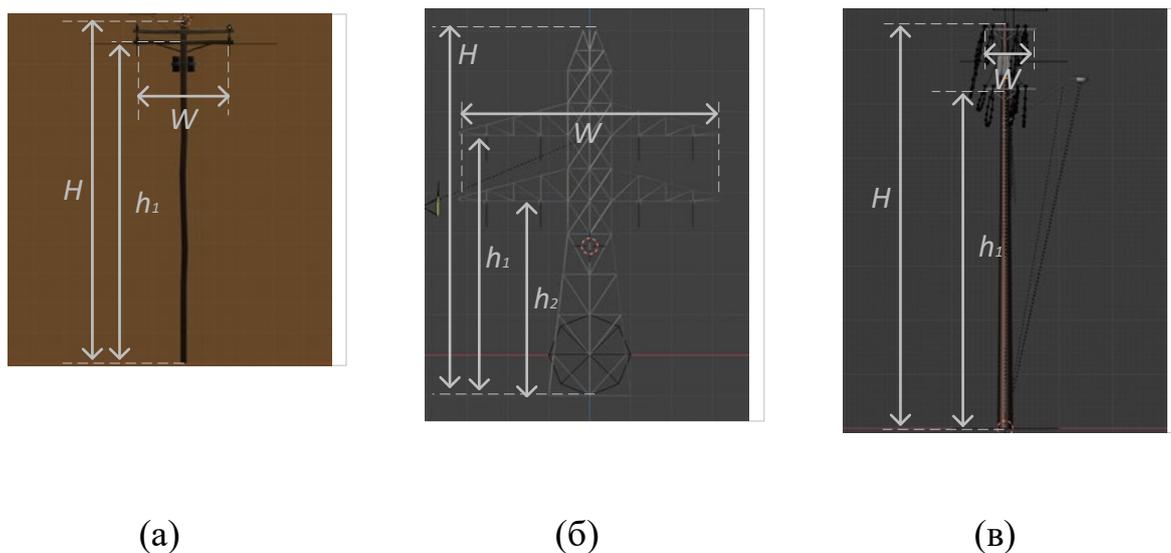


Рисунок 24 – Рассматриваемые типы ЛЭП. (а) – деревянная ЛЭП с одним траверсом; (б) – решетчатая ЛЭП с двумя траверсами; (в) – бетонная опора с

двумя траверсами.  $H$  – высота башни;  $W$  – ширина самого широкого траверса;  $h_i$  – высота  $i$ -го траверса.

В таблице 5 сведены все основные параметры для каждого типа ЛЭП, изображенных на рисунке 24.

Таблица 5 – Параметры опор ЛЭП на моделируемых сценах

Тип башни	Высота башни $H_{tower}$ , м	Ширина траверсов $W$ , м	Минимально допустимое приближение	Количество изоляторов	Длина изолятора, м	Высота до каждого траверса $h_1, h_2$ , м	
						$h_1$ , м	$h_2$ , м
1	12	3,5	3	2	0,25	10,5	—
2	16	6	4	8	1,02	8	12
3	14	2	4	4	0,14	11	13,5

Помимо приведенных на рисунке 24 параметров, для каждого из типов башен приводятся минимальные значения расстояний, на которые БПЛА может безопасно приближаться с учетом возможных электромагнитных воздействий со стороны ЛЭП. Эти данные были взяты на основании работ [24-26].

### 3.4 Анализ рассматриваемых повреждений ЛЭП

Технология съемки изображений в инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра электромагнитного излучения позволяет выявить определённые виды повреждений ЛЭП, используя не сложные с вычислительной и алгоритмической точек зрения методы, которые позволяют однозначно локализовать соответствующее повреждение. В рамках данной работы рассматривался нагрев элементов ЛЭП и коронный разряд.

Такой вид повреждений, как коронный разряд является утечкой тока, возникающей в случае превышения критического уровня ионизации воздуха вокруг токопроводящего элемента. При коронном разряде генерируется видимое и ультрафиолетовое (УФ) электромагнитное излучение [27]. Самый простой способ определить местонахождение точки коронного разряда – это использовать датчики изображения УФ-диапазоне. Он выявляется на таких элементах, как изоляторах, проводах, контактных соединениях. Наиболее опасен коронный разряд на изоляторах ЛЭП ввиду риска утечки тока в саму опору ЛЭП, к которой крепится изолятор. Ввиду этого, в рамках данной работы рассматривались и моделировались коронные разряды на изоляторах ЛЭП.

Нагрев элементов ЛЭП может возникать из-за механических повреждений элементов ЛЭП, вызывающих изменение их сопротивления. При этом, нагрев элементов ЛЭП вообще невозможно определить на изображениях в видимом спектре. Однако, возникающее тепловое излучение сопровождается также заметным инфракрасным излучением, что может быть определено на изображениях в ИК-диапазоне [28]. В рамках данной работы мы рассматриваем и моделируем нагрев участков проводов ввиду того, что данный вид повреждения является одним из наиболее опасных ввиду потенциальной возможности оплавления проводов и их обрыва.

### **3.5 Определение требований к данным**

Как было указано во введении, модели машинного обучения показывают лучшие результаты в строго ограниченных условиях. Несмотря на то, что на данный момент не существует систематизированных требований к формированию обучающих выборок, на основании предварительного анализа предметной области можно выделить основные параметры, которые могут служить в качестве ограничений при съемке. В рамках данной работы в качестве таких ограничений были выбраны следующие:

1. Типы ЛЭП;
2. Нахождение ключевого элемента (КЭ) ЛЭП в кадре;
3. Большое количество экземпляров КЭ;
4. Большое количество самих ракурсов для каждого КЭ (требование репрезентативности);
5. Фиксированные ракурсы съемки (требование унификации условий получения данных).

Раскроем подробнее каждое из требований. ЛЭП обычно состоят из башен одинаковой конструкции. Однородная конструкция ЛЭП, таким образом, определяет однородное расположение элементов, которые могут быть подвергнуты тем или иным повреждениям. В результате построение траекторий движения БПЛА с учетом специфики каждой конкретной ЛЭП позволяет унифицировать и получаемые в ходе инспекции данные, что, в свою очередь, позволяет снизить степень неопределенности данных при их анализе. Требование к нахождению в кадре КЭ является очевидным: без его выполнения будет невозможно обнаружить повреждение элемента ЛЭП на получаемых в ходе инспекции изображениях. Необходимость большого количества отдельных экземпляров КЭ в выборке обусловлено уже особенностями алгоритмов машинного обучения, которые для повышения эффективности своей работы требуют больших выборок. Следующее

требование к большому количеству ракурсов съемки для каждого отдельного КЭ также обусловлено требованиями со стороны алгоритмов машинного обучения, а именно, требованиями к репрезентативности данных. Данное требование реализуется посредством вычисления параметров для соответствующих паттернов траекторий, что будет подробнее раскрыто далее. Последнее ограничение на фиксированные ракурсы съемки обусловлено необходимостью унификации данных и снижения неопределенности при анализе повреждений ЛЭП конкретной конструкционной особенности.

### 3.6 Планирование траектории движения БПЛА с учетом конструкционных особенностей ЛЭП и требований к данным

Паттерны движения БПЛА подчиняются общим принципам, описанным в разделе «Разработка подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП при помощи БПЛА». Здесь будут описаны особенности построения траекторий с учетом обозначенных выше требований.

В рамках данной работы для обеспечения сбора репрезентативности данных о нагреве проводов был использован паттерн WIT, который обеспечивает прямолинейное движение вдоль оси OY. При этом, для обеспечения репрезентативности посредством паттерна WIT были построены три различные траектории, обеспечивающие представленность КЭ (проводов) в трех различных ракурсах: сбоку, с одной стороны, от опоры (рисунок 25 (a)); сверху над опорами (рисунок 25 (b)). При этом способ съемки проводов ЛЭП с другого бока зеркально отражает изображение на рисунке 25 (a).

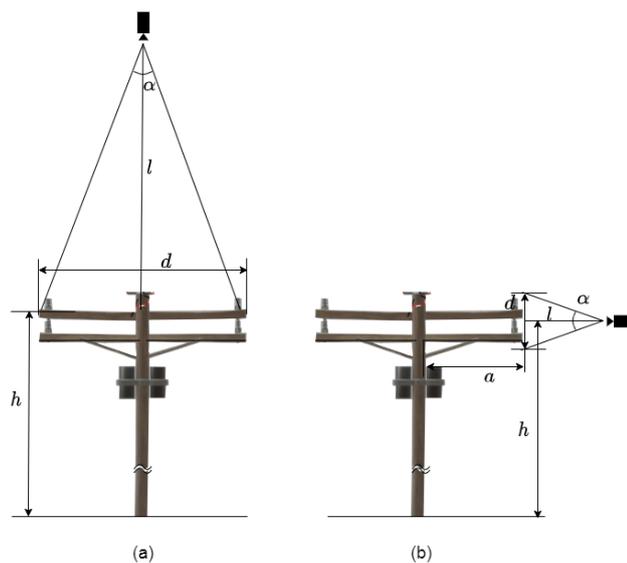


Рисунок 25 - Варианты реализации паттерна WIT: (a) — над опорами; (b) — сбоку параллельно от ЛЭП

На рисунке 25  $h$  – высота КЭ,  $a=W/2$  – расстояние от центра опоры до КЭ. Удаление камеры от КЭ  $l$  определяется линейным размером КЭ,  $d$ ; углом обзора камеры  $\alpha$ :

$$l = \frac{d}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (37)$$

Для вычисления расстояния до КЭ  $l$  параметры  $\alpha$  и  $d$  должны быть заданы изначально. Все эти траектории реализуют паттерн движения WIT, у которого имеется два ключевых параметра  $D$  и  $H_{witWIT}$ , которые определяют путевые точки траектории. Отличительной особенностью паттерна WIT является универсальность для всех рассматриваемых вариантов ЛЭП. Для пролета над опорой (рисунок 25 (a))  $D=0$ , а параметр  $H_{wit}$  рассчитывается как:

$$H_{wit} = h + l. \quad (38)$$

Для пролета слева или справа от опоры (рисунок 25 (b)) а параметр  $H_{wit}=h$ , а параметр  $D$  рассчитывается как:

$$D = a + l. \quad (39)$$

Другим рассматриваемым повреждением является коронный разряд на изоляторах ЛЭП. Требование к необходимости нахождения КЭ в кадре, а также требование репрезентативности данных определяют паттерн движения по круговой траектории в плоскости OXY (*CIRP*), также описанный в разделе «Разработка подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП при помощи БПЛА».

Движение по кругу само по себе обеспечивает репрезентативность данных, поскольку при такой съемке каждый КЭ представляется во множестве ракурсов. Для паттерна *CIRP* ключевыми параметрами, определяющими путевые точки траектории, являются радиус круговой траектории  $R$  и высота от земли  $H_{CIRP}$ . В рамках данной работы для обеспечения репрезентативности данных, при помощи этого паттерна движения, в зависимости от типа ЛЭП и расположения КЭ (изоляторов), был реализован паттерн *CIRP*, параметры которого по-разному вычислялись для различных способов расположения изоляторов: вертикального (рисунок 26 (a)) и горизонтального (рисунок 24 (b)).

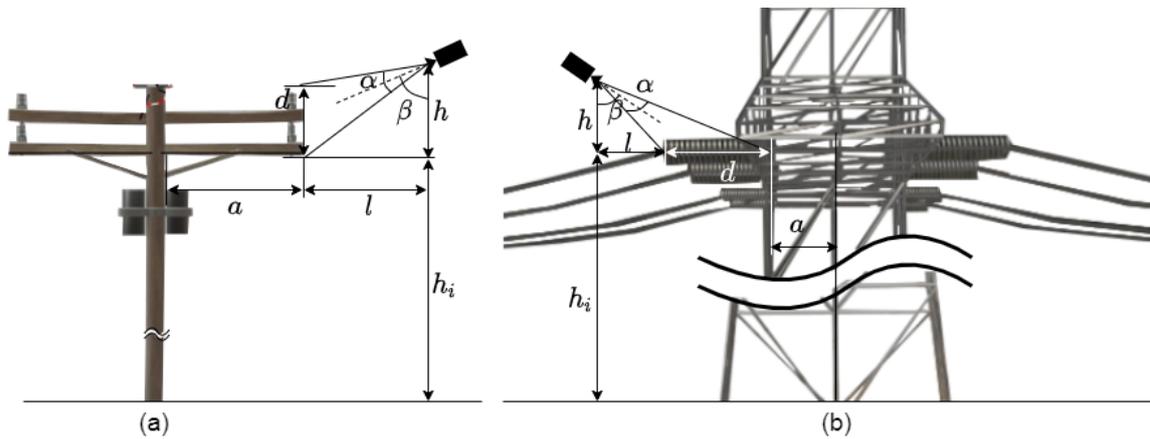


Рисунок 26 – Варианты реализации паттерна CIRP: (а) — облет башен ЛЭП сцен 1 и 3; (б) — облет башен ЛЭП сцены 2

На рисунке 26  $h_i$  – высота  $i$ -го КЭ, совпадающая с высотой соответствующего траверса,  $a$  – расстояние от центра опоры до КЭ. Параметры удаления камеры БПЛА от КЭ  $l$  и  $h$  определяется линейным размером КЭ,  $d$ ; углом обзора камеры  $\alpha$  и углом наклона камеры  $\beta$ , который был введен для того, чтобы БПЛА не сталкивался с проводами ЛЭП.

Для сцен 1 и 3 (рисунок 25 (а), рисунок 24 (с), рисунок 26 (а)) КЭ – это вертикально расположенный изолятор, параметры  $l$  и  $h$  которого вычисляются следующим образом:

$$h = \frac{d \cos\left(\beta - \frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\beta + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin(\alpha)}. \quad (40)$$

$$l = \frac{d \sin\left(\beta - \frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\beta + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin(\alpha)}. \quad (41)$$

Для сцены 2 (рисунок 24 (б), рисунок 26 (б)) КЭ – это горизонтально расположенный изолятор, параметры  $l$  и  $h$  которого вычисляются следующим образом:

$$h = \frac{d \cos\left(\beta - \frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\beta + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin(\alpha)}. \quad (42)$$

$$l = \frac{d \sin\left(\beta - \frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\beta + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin(\alpha)}. \quad (43)$$

Для всех сцен параметр высоты  $H_{CIRP}$  вычисляется следующим образом:

$$H_{CIRP} = h_i + h, \quad (44)$$

где  $h_i$  – высота  $i$ -го траверса, к которому прикреплен инспектируемый КЭ.

Для сцен 1 и 3 параметр радиуса облета  $R$  вычисляется как:

$$R = a + l, \quad (45)$$

где  $a=W/2$  – расстояние от центра опоры до КЭ.

Для сцены 2 параметр радиуса облета  $R$  вычисляется как:

$$R = a + d + l, \quad (46)$$

где  $a$  – расстояние от середины решетчатой опоры до КЭ (рисунок 26 (b)).

Все рассматриваемые паттерны траекторий движения обеспечивают унифицированный способ получения данных, определяемый единообразной для каждого повреждения траекторией, которая строится исходя из конструктивных особенностей каждой конкретной ЛЭП. Эти параметры задаются оператором и на основе их БПЛА рассчитывает путевые точки траектории.

На основании формул (37–39) вычисляются параметры для паттерна WIT, а на основании формул (40–46) вычисляются параметры паттерна CIRP. Все результаты сведены в таблицу 6.

Таблица 6 - Параметры траекторий автономного полета

№ сцены	Снимаемый КЭ	Спектры	Паттерн движения	Фиксированные параметры	Параметры паттерна
1	Провода	ИК	WIT – справа от опоры	$\alpha=12^\circ$ $d=0.5 \text{ м}$ $a=1.75 \text{ м}$	$H_{WIT} = 15 \text{ м}$ $D = 4.12 \text{ м}$
			WIT – слева от опоры	$\alpha=12^\circ$ $d=0.5 \text{ м}$ $a=1.75 \text{ м}$	$H_{WIT} = 15 \text{ м}$ $D = 4.12 \text{ м}$
			WIT – сверху от опоры	$\alpha=12^\circ$ $d=3.5 \text{ м}$ $h_I=10.5$	$H_{WIT} = 27.1 \text{ м}$ $D = 0 \text{ м}$
	Траверс уровень	1	УФ	CIRP	$\alpha=12^\circ$ $d=0.5 \text{ м}$ $h_I=10.5 \text{ м}$
2	Провода	ИК	WIT – справа от опоры	$\alpha=12^\circ$ $d=4 \text{ м}$ $a=3 \text{ м}$	$H_{WIT} = 10 \text{ м}$ $D = 19.1 \text{ м}$
			WIT – слева от опоры	$\alpha=12^\circ$	$H_{WIT} = 10 \text{ м}$

				$d=4\text{ м}$ $a=3\text{ м}$	$D = 19.1\text{ м}$
			WIT – сверху от опоры	$\alpha=12^\circ$ $d=6\text{ м}$ $h_1=8\text{ м}$	$H_{WIT} = 36.5\text{ м}$ $D = 0\text{ м}$
	Траверс уровень 1	УФ	CIRP	$\alpha=12^\circ$ $\beta=60^\circ$ $d=1.02$ $h_1=8\text{ м}$	$H_{CIRP} = 9.17\text{ м}$ $R = 3.38\text{ м}$
	Траверс уровень 2		CIRP	$\alpha=12^\circ$ $\beta=60^\circ$ $d=1.02$ $h_2=12\text{ м}$	$H_{CIRP} = 13,17\text{ м}$ $R = 3.38\text{ м}$
3	Провода	ИК	WIT – справа от опоры	$\alpha=12^\circ$ $d=2.5\text{ м}$ $a=1\text{ м}$	$H_{WIT} = 12.3\text{ м}$ $D = 9.5\text{ м}$
			WIT – слева от опоры	$\alpha=12^\circ$ $d=2.5\text{ м}$ $a=1\text{ м}$	$H_{WIT} = 12.3\text{ м}$ $D = 9.5\text{ м}$
			WIT – сверху от опоры	$\alpha=12^\circ$ $d=2\text{ м}$ $h_1=8\text{ м}$	$H_{WIT} = 23.1\text{ м}$ $D = 0\text{ м}$
	Траверс уровень 1	УФ	CIRP	$\alpha=12^\circ$ $\beta=60^\circ$ $d=0.14$ $h_1=13.5\text{ м}$	$H_{CIRP} = 13,9\text{ м}$ $R = 3\text{ м}$

В таблице 6 представлено соответствие между сценой в моделирующем комплексе и заданными параметрами, необходимыми для построения траектории движения БПЛА с целью съемки участка ЛЭП в заданном спектре. В таблице значения расстояний БПЛА до опоры ЛЭП определенного типа брались из того расчета, что если вычисленные значения параметров паттернов будут меньше минимально допустимых значений для

определенного типа ЛЭП, то параметры будут иметь именно эти минимально допустимые значения.

### **3.7 Описание методики съемки**

В целях проверки работоспособности предлагаемой методики съемки КЭ ЛЭП для выявления повреждений элементов ЛЭП в данной работе было проведено моделирование трёх сцен с распространёнными типами опор ЛЭП (рис. 24, табл. 5).

Blender [29] представляет собой программный комплекс для трёхмерного моделирования объектов и процессов, а также рендеринга, визуализирующего смоделированные сцены. Помимо открытого программного кода, данный пакет отличается большой универсальностью и самодостаточностью, поскольку содержит практически исчерпывающий набор программных инструментов, необходимых для обеспечения всей технологической цепочки динамической компьютерной визуализации любого уровня сложности. Это касается, в первую очередь, возможности моделирования указанных повреждений элементов ЛЭП. Таким образом, благодаря вышеприведённому набору характеристик Blender может быть использован в качестве универсальной программной среды для моделирования объектов и процессов естественно-научных исследований. В частности, для моделирования процесса сбора данных о ЛЭП.

Смоделированная сцена содержит следующие компоненты: HDRI-карта, модель опоры ЛЭП и связанные с ней модели изоляторов и проводов, освещение, камера и вспомогательные оси.

HDRI (High Dynamic Range Imaging)-карты используются повсеместно при настройке окружения в сцене. Сами HDR-карты (рисунок 27) находятся в открытых источниках, например, бесплатный каталог HDRI карт - Junior3d.ru [30]. Или данные карты можно сделать самостоятельно в том же Blender. Скаченная или созданная HDRI-карта имеет расширение *.hdr* и загружается как фоновое изображение сцены, во вкладке шейдеров Blender. Пример HDRI-карты приведен на рисунке 27.



Рисунок 27 – Примеры HDR-карты для трёх моделируемых сцен

В рамках данной работы было выполнено моделирование указанных в разделе выше и отображённых на рисунке 28 ЛЭП. Модели ЛЭП были взяты из открытой библиотеки моделей Free3D [31].

Моделируемые повреждения: неровный светящийся шар и светящийся цилиндр – имитируют повреждения в спектрах, отличных от видимого. Неровный светящийся шар – это коронный разряд, который виден только в УФ спектре; светящийся цилиндр – это участок нагретого провода, который виден только в ИК спектре. Для имитации фотографий в УФ спектре параметры освещения сцены были занижены (рисунок 28), а для имитации фотографий в ИК спектре, полученные снимки сцены были обработаны в следующем порядке: уменьшение яркости до значения -40, уменьшение контраста до -25, уменьшение насыщенности до -100 (рисунок 28).



Рисунок 28 – Примеры постобработки полученных изображений для имитации УФ (слева) и ИК (справа) спектра

Для имитации полета БПЛА с камерой была использована функция Анимации в Blender. Камере были заданы ключевые точки (key point), соответствующие полету БПЛА в среде Gazebo, для первого кадра, траектория движения камеры в зависимости от КЭ, key point для последнего кадра. Траектория движения камеры задаётся функцией задаётся как функция для прямолинейного движения в плоскости OXY для съёмки проводов; и

функцией для круговой траектории в плоскости OXY для съемки изоляторов. Камера в Blender имела следующие характеристики: угол обзора камеры составляет 12°. Съемка велась с частотой 30 кадров/с. Размер каждого изображения 1920×1080.

В результате симуляции полетов БПЛА была сформирована выборка изображений повреждений ЛЭП в УФ и ИК спектрах. Данные изображения были размечены вручную в соответствии с задачей семантической сегментации. Данный тип разметки подразумевает формирование сегментационных масок, совпадающих по форме с сегментируемым объектом на изображении. В качестве средства аннотации собранного набора данных была выбрана программа LabelMe [32], которая позволяет формировать сегментационные маски для визуальных объектов, находящихся на изображении. На рисунках 29–31 приведены примеры размеченной выборки изображений для сцен 1 – 3 соответственно.

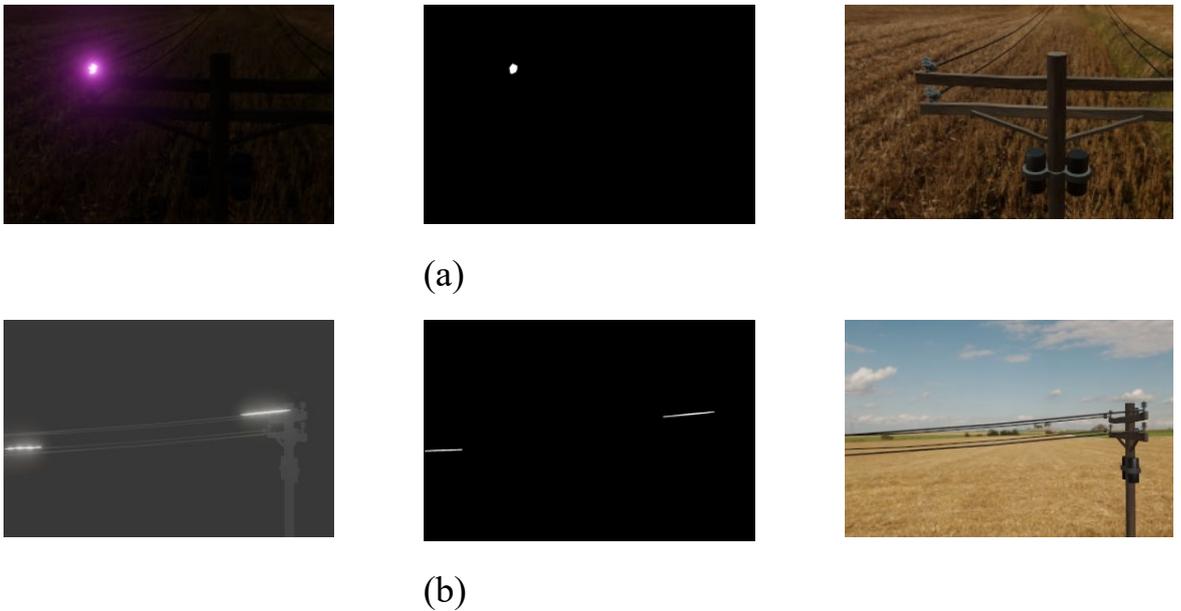


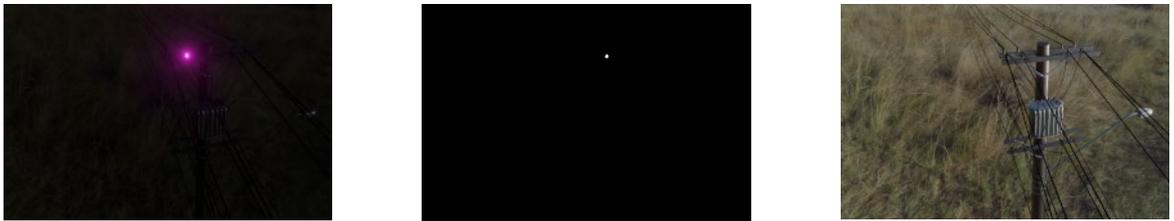
Рисунок 29 - Изображение сцены 1 из размеченной выборки. (a) – изображение коронного разряда в УФ спектре, соответствующая сегментационная маска и изображение в видимом спектре; (b) – изображение нагрева проводов в ИК спектре, соответствующая сегментационная маска и изображение в видимом спектре





(b)

Рисунок 30 - Изображение сцены 2 из размеченной выборки. (a) – изображение коронного разряда в УФ спектре, соответствующая сегментационная маска и изображение в видимом спектре; (b) – изображение нагрева проводов в ИК спектре, соответствующая сегментационная маска и изображение в видимом спектре



(a)



(b)

Рисунок 31 - Изображение сцены 1 из размеченной выборки. (a) – изображение коронного разряда в УФ спектре, соответствующая сегментационная маска и изображение в видимом спектре; (b) – изображение нагрева проводов в ИК спектре, соответствующая сегментационная маска и изображение в видимом спектре

Результирующая выборка имеет суммарно 1300 изображений, на которых в различных ракурсах суммарно представлено 17 отдельных повреждений КЭ ЛЭП. Для анализа полученной выборки ее целесообразно разделить на подвыборки, соответствующие сцене или виду ЛЭП, изображения КЭ которых были получены в ходе симуляции, а также спектру съемки, который, в свою очередь, соответствует типу повреждений КЭ.

Для оценки репрезентативности данных в полученной выборке было вычислено количество ракурсов, на которых был запечатлен каждый объект. Ввиду того, что изображения получаются в ходе движения БПЛА, каждый

отдельных элемент имеет уникальный ракурс, количество которых совпадает с количеством изображений, на которых присутствует КЭ. Также было вычислено среднее количество ракурсов на один КЭ. Для оценки размеров КЭ были вычислены значения площадей сегментированных вручную КЭ в пикселях, а также их доверительные интервалы согласно формуле:

$$s = \bar{s} \pm t_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (47)$$

где  $\bar{s}$  – среднее значение площади КЭ на изображениях подвыборки одной сцены;  $t_{\alpha/2}$  – значение двусторонней статистики Стьюдента для уровня значимости  $\alpha = 1 - C$ ,  $C=0.05$ ;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение значений площади КЭ, полученное на выборке;  $N$  – размер выборки. Все результаты сведены в таблицу 7.

Таблица 7 - Параметры полученной выборки

Подвыборка	Кол-во изображений	Кол-во КЭ	Кол-во ракурсов поврежденных КЭ (среднее значение для одного повреждения)	Площадь отдельных поврежденных КЭ, пиксели
Сцена 1, нагрев проводов – ИК спектр	300	4	306 (76.5)	981±59
Сцена 1, коронный разряд – УФ спектр	100	1	100 (100)	2068±240
Сцена 2, нагрев проводов – ИК спектр	300	6	485 (80.8)	351±13
Сцена 2, коронный разряд – УФ спектр	200	2	183 (91.5)	884±130
Сцена 3, нагрев проводов – ИК спектр	300	3	202 (67.3)	736±85
Сцена 3, коронный разряд – УФ спектр	100	1	100 (100)	262±10

При оценке площадей КЭ на получаемых изображениях разброс значений, выраженный доверительными интервалами, показывает, что для сцен 1 и 2 площади нагрева проводов на изображениях в ИК спектре имеют меньший разброс, чем у площадей коронного разряда в УФ спектре. Это объясняется, в первую очередь, способом съемки и, соответственно, паттерном полета. В то же самое время, для сцены 3 разброс площадей коронного разряда на УФ-изображениях меньше, чем разброс нагрева проводов на ИК-изображениях. Это объясняется тем, что симулируемый

коронный разряд имеет малые размеры и находится практически в центре радиуса паттерна CIRP.

При оценке репрезентативности данных, выраженной в оценке количества ракурсов одного КЭ, показанные результаты свидетельствуют о достижении высоких показателей (минимальное значение 67.3 ракурса для одного КЭ, а в некоторых случаях количество ракурсов совпадает с количеством полученных в рамках одного облета изображений). При этом, при инспекции коронного разряда в УФ спектре на изображениях, полученных посредством паттерна CIRP, достигается большая репрезентативность данных, чем при инспекции нагрева проводов в ИК спектре на изображениях, полученных посредством паттерна WIT, даже несмотря на то, что паттерн WIT реализуется в трех вариантах: слева, справа и сверху относительно опор ЛЭП. В общем и целом, для 17 симулированных отдельных дефектов ЛЭП было получено 1376 ракурсов, что соответствует 80 ракурсам в среднем на одно повреждение. Такие показатели вариативности представления одного визуального объекта свидетельствуют о достижении высоких показателей репрезентативности собираемых данных, а показатели абсолютного количества полученных в ходе симуляции изображений говорят о достижении требования большой выборки данных.

### **3.8 Обработка изображений и анализ дефектов**

В рамках реализации проекта была поставлена задача обеспечить детектирование и анализ дефектов элементов ЛЭП на основе обработки изображений в различных спектрах. В 2021 г. в ходе работ по проекту было проведено исследование метода детекции в видимом спектре конкретного дефекта ЛЭП – отсутствие изолятора. Детекция выполнялась на основании обработки изображений в видимом спектре, снятых с БПЛА и составляющих размеченную выборку [33]. Обработка изображения проводилась посредством нейронных сетей семейства YOLO. Сравнительный анализ YOLOv3, YOLOv4 и их упрощенных версий показал хорошие результаты точности детекции дефекта (отсутствие изолятора) при помощи YOLOv3-tiny ( $mAP@0,50=0,97\pm 0,03$ ;  $mAP@0,75=0,78\pm 0,04$ ) [34].

Задача локализации повреждений ЛЭП в ИК и УФ спектрах может быть решена посредством сегментации элементов объекта – формирования маски, повторяющей форму объекта определённого класса на изображении. Семантическая сегментация является наиболее подходящим способом локализации для таких визуальных объектов как нагрев проводов и коронный разряд на изображении, т.к. позволяет выделять геометрическую форму и место на изображении в условиях съемки объектов с различных ракурсов.

Ввиду того, что рассматриваемые дефекты в указанных спектрах имеют значительную контрастность на изображении, для их выявления перспективными выглядят методы сегментации, основанные на анализе распределения яркостей пикселей изображения. К таким методам относится метод пороговой фильтрации с выбором порога на основании анализа гистограмм распределения яркости пикселей объектов на изображениях.

Кроме того, в общей задаче семантической сегментации наилучшие результаты показывают глубокие сверточные нейронные сети. Поэтому в рамках данной работы также были рассмотрены две распространенных нейросетевых архитектуры: сверточный автокодировщик (САК) [35-37] и U-Net [38].

### 3.8.1 Метод пороговой фильтрации

Принцип методов пороговой фильтрации основывается на выделении значений пикселей, принадлежащих заданному диапазону и отсечении (приравнении к нулю) значений остальных пикселей. В общем, это может быть выражено следующим решающим правилом:

$$I_{i,j}^{out} = \begin{cases} I_{ij}^{in}, I_{ij}^{in} \in [I_{min}, I_{max}] \\ 0, I_{ij}^{in} \notin [I_{min}, I_{max}] \end{cases} \quad (48)$$

где  $i$  – номер строки пикселя,  $j$  – номер столбца пикселя;  $I_{ij}^{in}$  – значение пикселя входного изображения;  $I_{i,j}^{out}$  – значение пикселя отфильтрованного изображения;  $I_{min}$  – минимальное значение допустимого диапазона яркостей пикселей;  $I_{max}$  – минимальное значение допустимого диапазона яркостей пикселей.

При этом, сам подбор диапазонов значений осуществляется в соответствии с общим методом обучения моделей машинного обучения: общая выборка разделяется на обучающую и тестовую части (в рамках данной работы – 50% составила обучающая часть, а остальные 50% – тестовая). Далее на основе анализа обучающей части выборки выполняется подбор значений диапазонов  $I_{min}, I_{max}$ , которые далее проверяются на тестовой выборке.

Выбор диапазона значений осуществлялся на основе гистограмм распределения значений яркостей пикселей для двух классов – нагрев проводов и коронный разряд. Гистограммы изображены на рисунке 32.

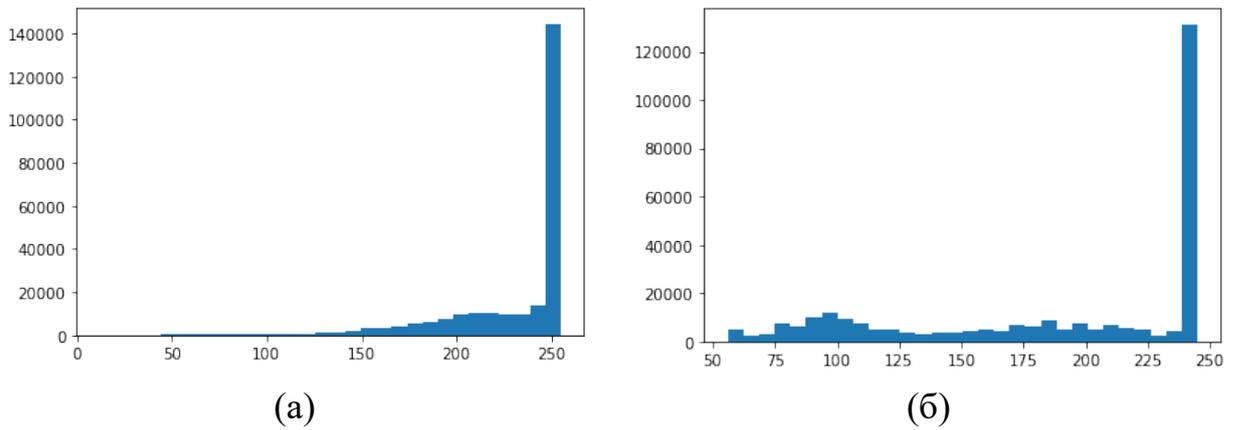


Рисунок 32 - Гистограммы яркостей пикселей для коронного разряда (а) и для нагрева проводов (б)

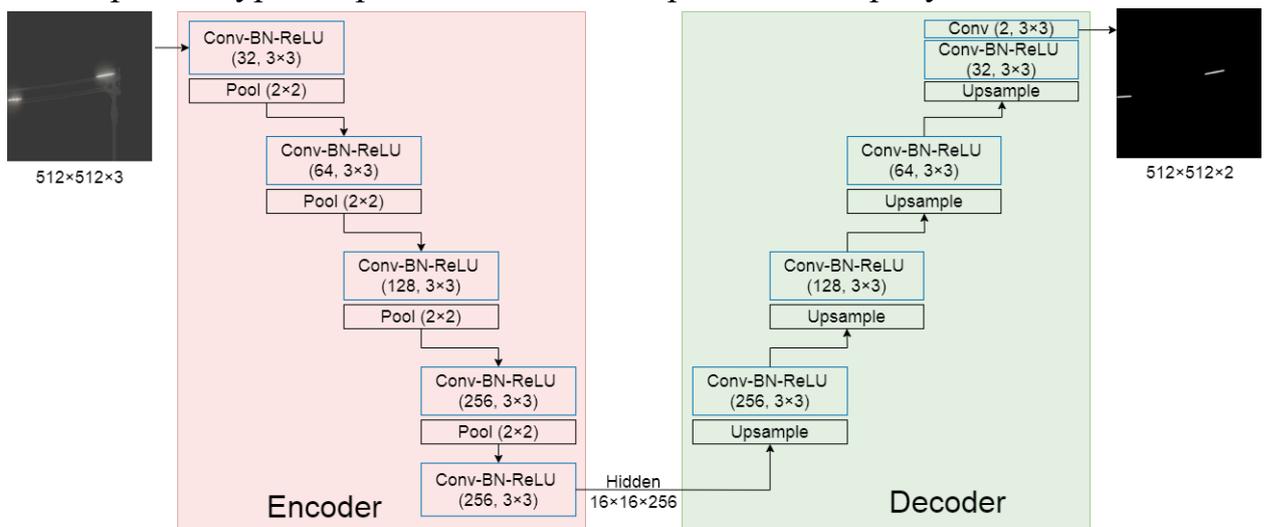
Гистограммы обоих классов представляют собой несимметричные распределения, на которых отчетливо различимы моды – наиболее часто встречающиеся значения в распределении. Для гистограммы коронного разряда мода составила 255, а для гистограммы нагрева проводов – 245. Далее эмпирическим путем были подобраны значения интервалов допустимых значений относительно моды. Результаты сведены в таблицу 8.

Таблица 8 - Вычисленные интервалы допустимых значений

Класс	Интервал значений $[I_{min}, I_{max}]$
Коронный разряд	[206, 255]
Нагрев проводов	[198, 246]

### 3.8.2 САК

Архитектура нейронной сети САК приведена на рисунке 33.



Convolutional Autoencoder

Рисунок 33 - Архитектура САК

Нейронная сеть данной архитектуры состоит из двух симметричных частей - энкодера и декодера (блоки Encoder и Decoder на рисунке 33). Энкодер выполняет обработку поступающего на его вход RGB изображения размером  $512 \times 512$  пикселей и выделяет в нем наиболее значимую информацию. Сам энкодер состоит из блоков обработки информации, куда последовательно включены слои свертки, пакетной нормализации (Batch Normalization – BN) [39], активации ReLU [40]. На рисунке 33 это изображено как единый блок Conv-BN-ReLU, при этом, в скобках для каждого блока указано количество ядер свертки и размер каждого ядра свертки (например, 16,  $3 \times 3$ ). Блоки Conv-BN-ReLU перемежаются блоками субдискретизации – отбора значимой информации и снижения размерности (Pool). В рамках данной операции исходная карта признаков разбивается на равные участки размером  $2 \times 2$ , и на каждом таком участке производится отбор максимального значения. По мере углубления обработки информации в автокодировщике, количество карт признаков увеличивается при снижении размера самих карт признаков, в результате чего формируется промежуточное представление, которое на рисунке 33 обозначено как Hidden. Декодер выполняет обратную операцию: обрабатывая промежуточное представление, декодер выполняет построение результирующей сегментационной маски, поэтапно повышая размер промежуточных карт признаков и уменьшая их количество. Само увеличение размера карт признаков осуществляется посредством операции билинейной интерполяции карт признаков (блок Upsample на рисунке 33). Обработка карт признаков, полученных в результате операции Upsample, также выполняется блоками Conv-BN-ReLU, описанных выше. На выходе данной архитектуры формируется множество результирующих карт признаков, количество которых равняется количеству классов сегментации, а размер выходных карт равен размеру входного изображения. При этом, каждая карта выходных признаков содержит в себе сегментационные маски одного класса. На выходе нейронной сети применяется активационная функция softmax:

$$\text{softmax}(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^N e^{z_j}}, \quad (49)$$

где  $z_i$  – это значение  $i$ -го нейрона выходного слоя до применения активационной функции,  $N$  – количество классов.

### 3.8.3 U-Net

Архитектура U-Net приведена на рисунке 34.

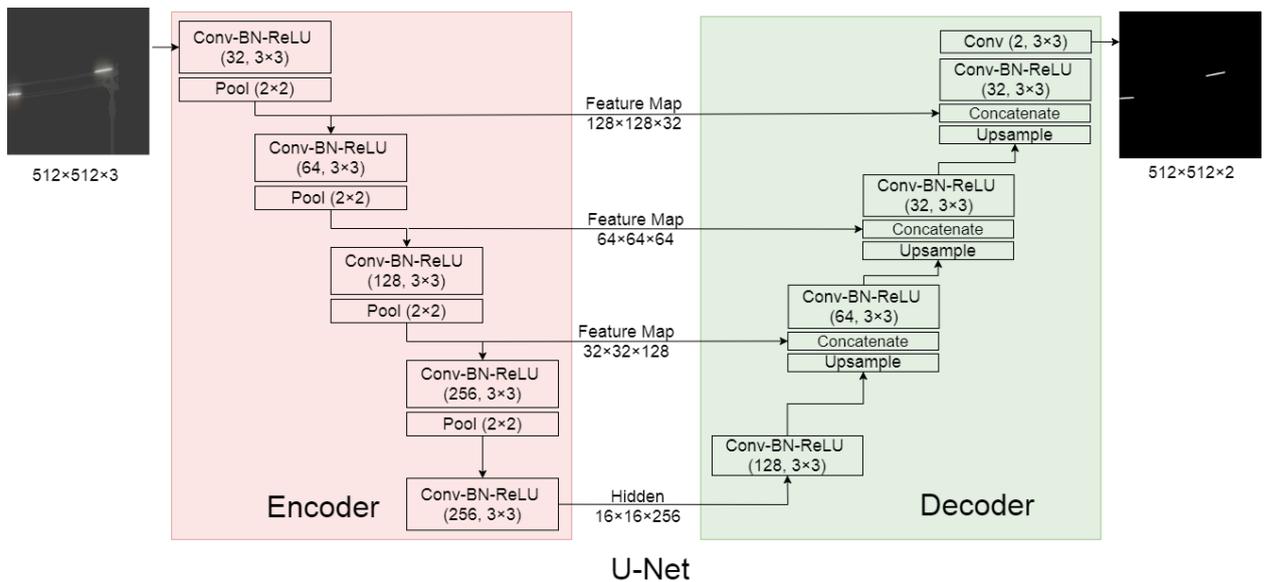


Рисунок 34 - Архитектура U-Net

Нейронная сеть архитектуры U-Net также реализует принципы обработки информации автокодировщиком. В этой нейронной сети, также как и в SegNet в декодере происходит учет информации, получаемой в энкодере. Однако, реализовано это при помощи другой операции: выполняется конкатенация (блок Concatenate на рисунке 34 увеличиваемой карты признаков с картой признаков того же размера, получаемой из симметричного слоя энкодера. Сформированная таким образом карта признаков обрабатывается далее следующим сверточным слоем. Повышение размерности карт признаков, также, как и в САК, выполняется посредством операции билинейной интерполяции (блок Upsample на рисунке 34. Остальные элементы данной нейронной сети полностью воспроизводят САК.

Все приведенные нейронные сети реализуют архитектуру автокодировщика. Другой общей особенностью всех приведенных архитектур является одинаковое устройство сверточных слоев и в энкодере, и в декодере. Различаются эти слои только лишь в особенностях передачи информации между энкодером и декодером.

### 3.9 Обучение нейронных сетей

В рамках данной работы каждая из описанных в предыдущем разделе нейронных сетей была обучена на выборке данных, собранной в рамках данной работы. Обучение выполнялось следующим образом: сначала общая выборка была разделена на обучающую и тестовую части: 50% попало в обучающую часть, 50% тестовую. Разбиение выполнялось посредством генератора случайных чисел из равномерного распределения.

Обучение выполнялось при помощи библиотеки глубокого обучения pytorch [41]. Каждая модель обучалась 200 эпох при помощи модифицированного алгоритма стохастического пакетного (mini-batch) градиентного спуска Adam [37] со стандартными параметрами из библиотеки pytorch. Для борьбы с переобучением были применены следующие методы аугментации изображений обучающей выборки: случайное зеркальное отображение изображений по горизонтали и по вертикали, поворот изображений на случайный угол, взятый из равномерного распределения с диапазоном значений  $[-15, 15]$  угловых градусов. В качестве функции потерь была взята функция перекрестной энтропии:

$$E(\hat{y}, y) = -y \log \hat{y} - (1 - y) \log (1 - \hat{y}), \quad (50)$$

где  $y$  – это значение истинной метки класса  $\hat{y}$  – значение метки класса, сгенерированное нейронной сетью.

Для общей оценки эффективности семантической сегментации в данной работе используется индекс Джаккара, который широко используется для оценки методов семантической сегментации. Индекс Джаккара вычисляется как отношение пересечения истинной площади маски объекта и площади маски объекта, сгенерированной нейронной сетью, к площади их объединения (Intersection Over Union – IoU):

$$IoU = \frac{|S_p \cap S_t|}{|S_p \cup S_t|} = \frac{TP}{TP + FP + FN}, \quad (51)$$

где  $S_p$  – площадь маски, сгенерированной нейронной сетью,  $S_t$  – это площадь истинной маски объекта, TP (True Positive) – это количество истинноположительно распознанных пикселей, FP (False Positive) – это количество ложноположительно распознанных пикселей, FN (False Negative) – это количество ложноотрицательно распознанных пикселей. Данная метрика вычисляется для каждого из классов, представленных в выборке. Для того, чтобы оценить общую эффективность семантической сегментации, используется среднее значение метрики Джаккара:

$$mIoU = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IoU_i, \quad (52)$$

где  $N$  – это количество классов,  $IoU_i$  – значение метрики Джаккара, вычисленная для  $i$ -го класса.

Результаты сегментации нагрева проводов в ИК спектре сведены в таблицу 9.

Таблица 9 - Семантическая сегментация проводов в ИК-спектре

	$mIoU$	$IoU$ для отдельных классов
--	--------	-----------------------------

		Фон	Нагрев проводов
САК	0.773	0.995	0.551
U-Net	0.774	0.995	0.554
Пороговая фильтрация	0.764	0.993	0.535

Результаты сегментации коронного разряда на изоляторах в УФ спектре сведены в таблицу 10.

Таблица 10 - Семантическая сегментация коронного разряда в УФ-спектре

	<i>mIoU</i>	<i>IoU</i> для отдельных классов	
		Фон	Коронный разряд
САК	0.877	0.995	0.759
U-Net	0.881	0.995	0.767
Пороговая фильтрация	0.874	0.995	0.752

Также было выполнено сравнение времени обработки одного изображения рассматриваемыми методами. Обработка выполнялась на оборудовании CPU Intel Core i7 6700k 4 ГГц, GPU Nvidia GeForce 1080 8 Гб. При этом GPU использовалась только для обработки изображений нейронными сетями. Тестирование выполнялось на выборке из 500 изображений разрешение изображений было изменено на 512x512 пикселей. В результате было получено среднее значение времени обработки одного изображения и его доверительные интервалы:

$$T = \bar{T} \pm t_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (53)$$

где  $\bar{T}$  – среднее значение времени обработки одного изображения;  $t_{\alpha/2}$  – значение двусторонней статистики Стьюдента для уровня значимости  $\alpha = 1 - C$ ,  $C=0.05$ ;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение значений времени, полученное на выборке;  $N$  – размер выборки. Все результаты сведены в таблицу 8.

Таблица 11 – Семантическая сегментация коронного разряда в УФ-спектре

	Время обработки на CPU, мс	Время обработки на GPU, мс
САК	1296±3	22.5±0.6
U-Net	1505±3	27.4±0.6
Пороговая фильтрация	1.038±0.02	—

Описанный метод пороговой фильтрации позволяет достичь сравнимых показателей эффективности сегментации по метрике IoU с рассматриваемыми нейронными сетями (таблицы 10-11). Это объясняется, в первую очередь, тем, что данные в выборке имеют всего 3 класса (коронный разряд, нагрев проводов и фон), а сами признаковый состав классов более-менее однороден. В то же самое время метод пороговой фильтрации, выполняющийся на CPU значительно превосходит рассматриваемые нейронные сети, выполняющиеся на GPU, по времени обработки (в 21.6 раза САК и в 26.4 раза U-Net). Кроме того, обучение нейронных сетей требует значительного времени, специализированного оборудования и больших вычислительных затрат. Все это в совокупности делает рассмотренный метод пороговой фильтрации наиболее перспективным для реализации на бортовом вычислительном устройстве БПЛА или мобильной наземной станции.

### **Заключение**

За весь срок выполнения проекта была разработана методика построения траекторий движения БПЛА для автоматизации процесса инспекции повреждений ЛЭП. Данная методика построения траектории автономного движения БПЛА в ходе инспекции ЛЭП в различных спектрах отличается новым принципом формированием траекторий, основанном, во-первых, на анализе конструкционных особенностей инспектируемых ЛЭП, а также с учетом требований репрезентативности и унификации собираемых данных. Разработанная модель глобального планирования значительно ускоряет процесс создания миссии, а время полета в автономном режиме по рассчитанной траектории уменьшилось на 11%, по сравнению со временем полета в ручном режиме и позволяет значительно упростить работу оператора при использовании БПЛА. В результате экспериментов было получено среднее отклонение фактической траектории движения БПЛА от сгенерированной глобальным планировщиком траектории обследования ЛЭП. Для расчета были использованы две метрики: расстояние Хаусдорфа и OWD. В результате сравнения удалось установить, что максимальное отклонение не превышает 0.4 м, что допустимо при движении рядом с трассой ЛЭП. Также разработанная методика обеспечивает сбор большой (суммарно 1300 изображений) репрезентативной выборки с точки зрения вариативности ракурсов отдельных повреждений ЛЭП (в среднем 80 ракурсов на одно повреждение). Данные показатели свидетельствуют о перспективе данной методики для построения траекторий автономного полета БПЛА с целью сбора репрезентативных выборок данных о повреждениях ЛЭП.

В рамках реализации проекта была поставлена задача обеспечить детектирование и анализ дефектов элементов ЛЭП на основе обработки изображений в различных спектрах. Для этого был проведен обзор современных методов мониторинга состояния элементов конструкции ЛЭП посредством обработки изображений в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах. 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, LBRHF+SVM, DMNN, VGG-19, LBP и ULBP, YOLO v3, DELM и LRF, SVM, Faster R-CNN, CNN, стереозрение и PLAMEC. В ходе работы была собрана база данных, которая включает в себя 7566 снимков в видимом спектре. В итоге было проведено исследование метода детекции в видимом спектре конкретного дефекта ЛЭП – отсутствие изолятора. Детекция выполнялась на основании обработки изображений в видимом спектре, снятых с БПЛА и составляющих размеченную выборку. Обработка изображения проводилась посредством нейронных сетей семейства YOLO. Сравнительный анализ YOLOv3, YOLOv4 и их упрощенных версий показал хорошие результаты точности выявления дефекта (отсутствие изолятора) при помощи YOLOv3-tiny ( $mAP@0,50=0,97\pm0,03$ ;  $mAP@0,75=0,78\pm0,04$ ).

Дефекты ЛЭП имеют значительную контрастность на изображении, для их выявления перспективными выглядят методы сегментации, основанные на анализе распределения яркостей пикселей изображения. К таким методам относится метод пороговой фильтрации с выбором порога на основании анализа гистограмм распределения яркости пикселей объектов на изображениях. В общей задаче семантической сегментации наилучшие результаты показывают глубокие сверточные нейронные сети. Поэтому в рамках данного проекта были рассмотрены две распространенных нейросетевых архитектуры: сверточный автокодировщик (САК) и U-Net и метод пороговой фильтрации для выявления нагрева проводов в ИК-спектре и коронного разряда в УФ-спектре. Каждая модель обучалась 200 эпох при помощи модифицированного алгоритма стохастического пакетного (mini-batch) градиентного спуска Adam со стандартными параметрами из библиотеки pytorch. Полученные результаты на основе метрики IoU для отдельных классов: нагрев проводов в ИК-спектре (САК - 0.551, U-Net - 0.554, пороговая фильтрация - 0.535), коронный разряд в УФ-спектре (САК - 0.759, U-Net - 0.767, пороговая фильтрация - 0.752). Описанный метод пороговой фильтрации позволяет достичь сравнимых показателей эффективности сегментации по метрике IoU с рассматриваемыми

нейронными сетями (таблицы 10-11, см. Приложение 1). В то же самое время метод пороговой фильтрации, выполняющийся на CPU значительно превосходит рассматриваемые нейронные сети, выполняющиеся на GPU, по времени обработки (в 21.6 раза САК и в 26.4 раза U-Net). В совокупности делает рассмотренный метод пороговой фильтрации наиболее перспективным для реализации на бортовом вычислительном устройстве БПЛА или мобильной наземной станции.

## Литература

1. Овсянников А. Г., Арбузов Р. С. Ультрафиолетовая инспекция оборудования: желаемые и реальные возможности //Энергоэксперт. – 2020. – №. 2. – С. 20-27.
2. Гизатуллин Р. М., Дроздилов В. А., Константинов Э. С. Моделирование функционирования элементов электронных систем БПЛА при воздействии излучаемых электромагнитных помех высоковольтной линии электропередачи //Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11. – №. 4 (44). – С. 13-21.
3. Васильев Е. М., Мельник Н. О. Математическая модель беспилотного летательного аппарата в условиях движения с возмущающими воздействиями //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. – №. 2. – С. 31-33.
4. Кочкаров А. А., Агишев Р. Т. Моделирование движения квадрокоптера по траектории с минимальной ошибкой отклонения //Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – №. 20. – С. 186-191.
5. Daniel Mellinger and Vijay. – 2011.
6. Bouabdallah S. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. – Epfl, 2007. – №. THESIS.
7. Quigley M. et al. ROS: an open-source Robot Operating System //ICRA workshop on open source software. – 2009. – Т. 3. – №. 3.2. – С. 5.
8. 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. – Т. 3. – С. 2149-2154.
9. 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. – С. 6235-6240.
10. 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. – С. 158-166.

11. Chen S. et al. End-to-end UAV simulation for visual SLAM and navigation //arXiv preprint arXiv:2012.00298. – 2020.
12. 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. – Т. 8. – №. 4. – С. 38-39.
13. Liu W. et al. A survey of deep neural network architectures and their applications //Neurocomputing. – 2017. – Т. 234. – С. 11-26.
14. Liu L. et al. Deep learning for generic object detection: A survey //International journal of computer vision. – 2020. – Т. 128. – №. 2. – С. 261-318.
15. Zaidi S. S. A. et al. A survey of modern deep learning based object detection models //Digital Signal Processing. – 2022. – С. 103514.
16. Hao S., Zhou Y., Guo Y. A brief survey on semantic segmentation with deep learning //Neurocomputing. – 2020. – Т. 406. – С. 302-321.
17. Hafiz A. M., Bhat G. M. A survey on instance segmentation: state of the art //International journal of multimedia information retrieval. – 2020. – Т. 9. – №. 3. – С. 171-189.
18. Kirillov A. et al. Panoptic segmentation //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2019. – С. 9404-941.
19. Bengio Y., Lecun Y., Hinton G. Deep learning for AI //Communications of the ACM. – 2021. – Т. 64. – №. 7. – С. 58-65.
20. Gondal M. W. et al. On the transfer of inductive bias from simulation to the real world: a new disentanglement dataset //Advances in Neural Information Processing Systems. – 2019. – Т. 32.
21. Reed S. E. et al. Deep visual analogy-making //Advances in neural information processing systems. – 2015. – Т. 28.
22. LeCun Y., Huang F. J., Bottou L. Learning methods for generic object recognition with invariance to pose and lighting //Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. – IEEE, 2004. – Т. 2. – С. II-104.
23. Монтаж и эксплуатация воздушных линий электропередачи. Доступно по: <https://elektro-montagnik.ru/?address=lectures/part2/&page=page1> (дата обращения: 16.11.2022).
24. Chermoshencev S.F., Gaynutdinov, R.R. Modeling the external electromagnetic influences on the complex electronic equipment. 2015 XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). 2015. pp. 90-92. doi: 10.1109/SCM.2015.7190420.
25. Huang L., Xu D., Zhai D. Research and Design of Space-Sky-Ground Integrated Transmission Line Inspection Platform Based on Artificial Intelligence. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2018. pp. 1-4. doi:10.1109/EI2.2018.8582405.
26. 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. – №. 43 (44). – С. 17-30.
27. Riba, J. R., Abomailek, C., Casals-Torrens, P., & Capelli, F. (2018). Simplification and cost reduction of visual corona tests. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(4), 834-841
  28. Gaussorgues G., Chomet S. *Infrared thermography*. – Springer Science & Business Media, 1993. – Т. 5
  29. Blender Studio. Available at: <https://www.blender.org/> (accessed 16.11.2022).
  30. Junior3d.ru – Сайт о 3D. Доступно по: <https://junior3d.ru> (дата обращения: 16.11.2022).
  31. Free3D. Доступно по: <https://free3d.com> (дата обращения: 16.11.2022).
  32. Image Polygonal Annotation with Python. Доступно по: <https://zenodo.org/record/5711226#.Yw14ShxBy5c> DOI: 10.5281/zenodo.5711225 (дата обращения 21.11.22).
  33. Insulator Data Set - Chinese Power Line Insulator Dataset (CPLID). Доступно по: <https://github.com/InsulatorData/InsulatorDataSet> (дата обращения: 16.12.2022).
  34. Астапова М. А., Уздяев М. Ю. Детектирование дефектов неисправных элементов линий электропередач при помощи нейронных сетей семейства YOLO. – 2021
  35. Chow J., Su Z., Wu J., Tan P. S., Mao X., Wang Y. H. Anomaly detection of defects on concrete structures with the convolutional autoencoder //Advanced Engineering Informatics. – 2020. – Т. 45. – С. 101105.
  36. Badža M. M., Barjaktarović M. Č. Segmentation of Brain Tumors from MRI Images Using Convolutional Autoencoder //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 9. – С. 4317.
  37. Bergmann P. et al. Improving unsupervised defect segmentation by applying structural similarity to autoencoders //arXiv preprint arXiv:1807.02011. – 2018
  38. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation //International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. – Springer, Cham, 2015. – С. 234-241.
  39. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift //International conference on machine learning. – PMLR, 2015. – С. 448-456
  40. Glorot X., Bordes A., Bengio Y. Deep sparse rectifier neural networks //Proceedings of the fourteenth international conference on artificial intelligence and statistics. – JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2011. – С. 315-323.
  41. PyTorch. Доступно по: [pytorch.org](https://pytorch.org) (дата обращения: 16.11.2022).