

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Уральский энергетический институт  
Кафедра «Электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ ПЕРЕД ГЭК

Зав. кафедрой электротехники

\_\_\_\_\_ В.Э. Фризен

«13» июня 2024 г.

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

### **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Научный руководитель,  
канд. техн. наук, доцент

С.А. Ерошенко

Нормоконтролер,

А.И. Хальясмаа

Студент группы ЭНМ-221201

Д.М. Иванов

Екатеринбург 2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт Уральский энергетический  
Кафедра Электротехника  
Направление подготовки 01.04.04 – Прикладная математика  
Образовательная программа Искусственный интеллект в электроэнергетике

**УТВЕРЖДАЮ**  
Зав. Кафедрой В.Э. Фризен  
«15» января 2024 г.

## ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студента Иванова Дмитрия Михайловича группы ЭНМ-221201  
(фамилия, имя, отчество)

### 1. Тема выпускной квалификационной работы

Методика оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов для  
диагностики состояния элементов линий электропередачи

Утверждена распоряжением по институту от «10» января 2024 г. № 33.07-05/003

2. Руководитель Ерошенко Станислав Андреевич, канд. Техн. наук, доцент  
(Ф.И.О., должность, ученое звание, ученая степень)

### 3. Исходные данные к работе

3.1 Методологические данные для вероятностной оценки влияния внешних факторов.

3.2 Данные о характеристиках работы комплекса БВС.

### 4. Перечень демонстрационных материалов

Презентация (15 слайдов)

### 5. Календарный план

№ п/п	Наименование этапов выполнения работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении
1.	Опыт внедрения БВС для диагностики состояния высоковольтных линий электропередачи	до 01 марта 2024 г.	
2.	Разработка алгоритма предварительной обработки исходных данных	до 01 апреля 2024 г.	
3.	Разработка многокритериальной функции для оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи	до 01 мая 2024 г.	
4.	ВКР в целом	до 06 июня 2024 г.	

Руководитель \_\_\_\_\_  
(подпись)

С.А. Ерошенко  
Ф.И.О.

Задание принял к исполнению 15.01.2024

дата

(подпись)

**6. Выпускная квалификационная работа закончена** «06» июня 2024 г. считаю возможным допустить Иванова Дмитрия Михайловича к защите выпускной квалификационной работы в Государственной экзаменационной комиссии.

Руководитель \_\_\_\_\_  
(подпись)

С.А. Ерошенко  
Ф.И.О.

**7. Допустить** \_\_\_\_\_ к защите магистерской диссертации в Государственной экзаменационной комиссии (протокол заседания кафедры №\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.).

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

В. Э. Фризен  
Ф.И.О.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 69 с., 19 рис., 8 табл., 14 источников, 1 прил.

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Целью настоящей работы является вывод многокритериальной функции для оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи, автоматизация существующего подхода к планированию миссий по обследованию элементов линий электропередачи и принятию решения о полете на основе распределения вероятностей, учитывающих характеристики вводных данных.

В работе рассматриваются влияние реальных факторов на различные риски при диагностике состояния элементов линий электропередачи с применением беспилотных воздушных судов с использованием алгоритма предварительной обработки исходных данных.

## СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ .....	4
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	7
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ .....	9
ВВЕДЕНИЕ .....	10
1 ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ БВС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	16
1.1 Основные методы обследования с помощью беспилотных воздушных судов.....	16
1.2. Выводы.....	19
2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.....	20
2.1 Анализ подходов к планированию миссий по обследованию элементов линий электропередачи.....	20
2.2 Основные статистические методы для оценки влияющих факторов.....	23
2.3 Матрица рисков.....	33
2.4 Выводы.....	34
3 РАЗРАБОТКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ. ....	35
3.1 Исходные данные.....	35
3.2 Многокритериальная функция оценки рисков использования БВС .....	37

3.3 Методика применение методов компьютерного зрения для распознавания элементов линий электропередачи.....	40
3.3.1 Классификация методов компьютерного зрения .....	40
3.3.2 Особенности применения компьютерного зрения при получении изображений с беспилотного воздушного судна.....	42
3.3.3 Анализ использования методов компьютерного зрения при использовании беспилотного воздушного судна в задачах диагностики состояния элементов линий электропередачи.....	43
3.3.4 Выбор языка программирования для реализации системы компьютерного зрения .....	46
3.3.5 Пример использования методов компьютерного зрения для распознавания элементов ЛЭП.....	49
3.4 Методика расчета показателей риска .....	56
3.5 Результаты расчетов .....	58
3.6 Выводы.....	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	62

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей работе применяют следующие термины с соответствующими определениями.

Выпускная квалификационная работа	- работа, выполненная обучающимся, демонстрирующая уровень подготовленности выпускника к самостоятельной профессиональной деятельности.
Издание	- документ, предназначенный для распространения содержащейся в нем информации, прошедший редакционно-издательскую обработку, самостоятельно оформленный, снабженный нормативно предписанными выходными сведениями, позволяющими однозначно идентифицировать его в документально-информационной среде
Реферат	- краткое точное изложение содержания первичного документа в текстовой форме, включающее основные фактические сведения и выводы, без дополнительной интерпретации или критических замечаний автора реферата
Документ	- зафиксированная на материальном носителе информация с реквизитами, позволяющими ее идентифицировать
Стандарт организации	- нормативный документ по стандартизации, разработанный, как правило, на основе согласия, характеризующегося отсутствием возражений по существенным вопросам у большинства заинтересованных сторон устанавливающий комплекс норм, правил, требований к различным видам деятельности университета или их результатам и утвержденный приказом руководства университета.

Нормативно-  
техническая  
документация

- документы, устанавливающие требования.

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ

БВС	–	Беспилотное воздушное судно
ВЛ	–	Воздушная линия электропередачи
ЕЭС России	–	Единая энергетическая система России
ВИЭ	–	Возобновляемые источники энергии
ЭЭС	–	Электроэнергетическая система
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров электротехники и электроники)
НСУ	–	Наземная станция управления
CDF	–	Cumulative Distribution Function (Кумулятивная функция распределения)
ЕС ОрВД	–	Единая система организации воздушного движения Российской Федерации
HFACS	–	Human Factors Analysis and Classification System (Система анализа и классификации человеческого фактора)

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы.

Воздушные линии (ВЛ) электропередачи являются главной составляющей электрической системы. Она предназначена для передачи и распределения электрической энергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным к опорам или кронштейнам и стойкам на инженерных сооружениях при помощи изоляторов и арматуры. Основным требованием к линиям электропередачи является их надежность и безопасность. На ВЛ лежит важная функция по передаче и распределению электроэнергии на большие расстояния между источником и потребителями.

Около 73% аварий в электрических сетях напряжением 110кВ и выше приходится на ВЛ. При анализе аварий на ВЛ существенный процент аварийности занимает (около 17%) несвоевременное выявление и устранение дефектов (рисунок 1). Ввиду важности элемента в системе передачи электроэнергии снижение аварийности на ВЛ является приоритетной задачей сетевых предприятий [1]. Традиционные способы оценки состояния элементов ВЛ являются трудоемкими и иногда недостаточно надежными для выявления дефектов.



Рисунок 1- Причины аварий на ВЛ 110кВ и выше

Обследование воздушных линий электропередачи с помощью беспилотных воздушных судов (БВС) дает ряд существенных преимуществ и весьма актуально в современном управлении электросетевыми предприятиями по нескольким причинам:

1) Безопасность: БВС устраняют необходимость в ручных проверках, проводимых наземными бригадами, снижая риск несчастных случаев и травм, связанных с работой на высоте или в опасных средах. Исключая работу на линии под напряжением проверки с применением БВС способствуют повышению безопасности обслуживающего персонала.

2) Доступность: БВС имеют возможность достигать отдаленных и труднодоступных участков вдоль линий электропередач, включая пересеченные местности, удаленные районы или местности с ограниченной инфраструктурой. Такая доступность обеспечивает проведение более глубоких и всесторонних проверок инфраструктуры линий электропередач, в том числе и тех компонентов, которые расположены в сложных или труднодоступных местах.

3) Эффективность: Обследование с помощью БВС могут быстро и эффективно охватывать большие территории, сокращая время и ресурсы, необходимые для инспекционной деятельности, по сравнению с традиционными методами. Эта эффективность приводит к экономии затрат для электросетевых предприятий и сводит к минимуму перебои в электроснабжении во время инспекционных мероприятий.

4) Уровень достоверности и полноты информации: БВС оснащены камерами, датчиками и технологиями обработки изображений высокого разрешения, которые могут с высокой точностью захватывать подробные визуальные данные о компонентах линий электропередачи. Эти высококачественные данные позволяют инспекторам более точно выявлять

потенциальные проблемы, такие как коррозия, повреждения или зарастание растительностью, способствуя своевременному техническому обслуживанию и ремонту.

5) Экологичность: Используя БВС вместо пилотируемых самолетов или наземных транспортных средств для проверок, коммунальные компании могут уменьшить свое воздействие на окружающую среду и свести к минимуму воздействие на окружающую среду. БВС тише, производят меньше выбросов и потребляют меньше энергии по сравнению с традиционными методами проверки.

6) Экономическая эффективность: несмотря на первоначальные затраты, связанные с приобретением БВС и обучением персонала, долгосрочная экономия средств от использования БВС для проверки линий электропередачи может быть значительной. Снижение затрат на рабочую силу, оборудование и простой способствует общей экономической эффективности и эффективности работы электросетевых предприятий. Согласно расчету приведенным в статье [2] себестоимость обследования 1000 км ВЛ при помощи БВС по сравнению с обследованием оперативным персоналом в два раза ниже, и составляет 122 руб/км по сравнению с затратами обследования наземной бригадой обходчиков - 244р/км, при этом эффективность и уникальность обследования выше.

В целом актуальность проверки воздушных линий электропередач с использованием БВС заключается в возможности повысить безопасность, доступность, эффективность, качество данных, экологическую устойчивость, экономическую эффективность и снижение рисков в практике управления электросетевыми предприятиями. Поскольку технологии продолжают развиваться ожидается, что БВС будут играть все более важную роль в обслуживании и управлении энергетической инфраструктурой во всем мире.

Согласно проведенному исследованию [3] объем мирового рынка по обследованию линий электропередач с помощью БВС в 2023 году оценивался в 1477,6 млн долларов США, а к 2030 году прогнозируется его скорректированный размер в 7502,1 млн долларов США со среднегодовым темпом роста 26,1% в течение всего периода. По оценкам Ростелекома В2Е [4], российский рынок БВС для коммерческого сектора вырос в 2023г. на 63% и составил более 8млрд руб. Ожидается, что по итогам 2024 года объем превысит 13млрд руб., из них на долю электроэнергетики приходится порядка 15-20%.

Поддержка использования БВС в промышленном секторе на государственном уровне заключается в создании специальной правительственной комиссии по вопросам развития беспилотных авиационных систем. Одной из задач которой поиск оптимальных решений для организации разработки, производства, сертификации и эксплуатации беспилотников, обеспечение интеграции БВС в воздушное пространство сказано в постановления правительства РФ (№ 190 от 09.02.2023).

Объем российского рынка смежных с БВС секторов к 2028 году предположительно будет составлять 82 млрд руб. (рисунок 2).

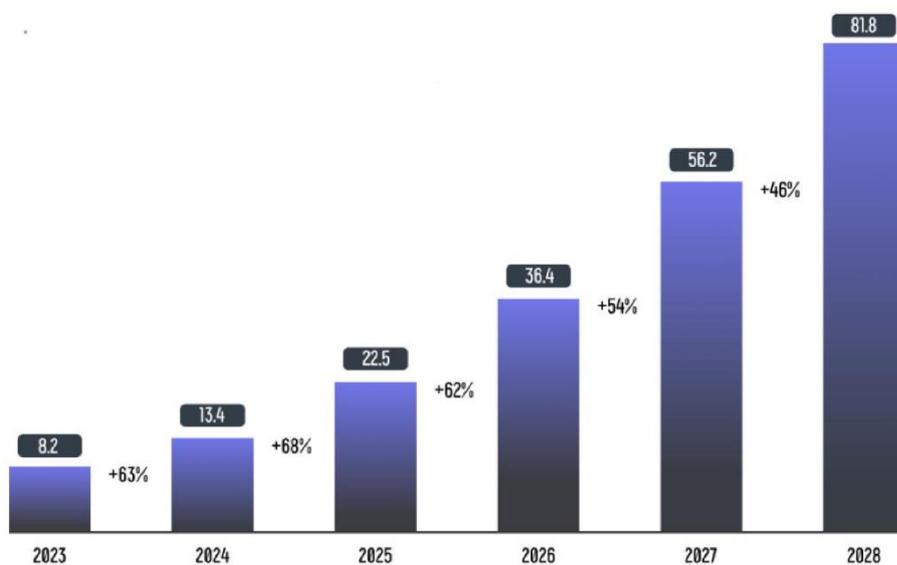


Рисунок 2- Российский рынок БВС в коммерческом секторе

Объем БВС для коммерческого использования с максимальной взлетной массой более 250гр. может состоять из 500 000 единиц к 2035 году [5]. Из них доля на сферу строительства и энергетики оценочно придется 41%.

Таким образом вышеописанное подтверждает актуальность применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи и создает необходимость разработки методики оценки целесообразности применения БВС и анализу рисков, возникающих при данном способе обследования элементов линий электропередачи.

**Объектом исследования** является беспилотное воздушное судно, применяемое для оценки состояния элементов высоковольтных линий электропередачи.

**Предметом исследования** являются методика оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи

**Цель работы** – адаптация существующих подходов к принятию решения по использованию БВС для диагностики состояния линий электропередачи, оценка рисков утраты БВС либо технологического нарушения при использовании БВС для оценки текущего состояния линий электропередачи. Разработка многокритериальной функции для оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи.

**Задачи,** поставленные для достижения цели:

- анализ существующих подходов к принятию решения по использованию беспилотного воздушного судна для оценки состояния элементов высоковольтных линий электропередачи;
- определение степени влияния предварительной обработки исходных данных на результаты проведения миссии полета;
- анализ факторов, влияющих на проведения обследования с применением БВС.
- адаптация методики оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи с выводом вероятностных сценариев на основе вводных данных.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработан новый алгоритм предварительной обработки исходных данных, учитывающий степень влияния на вероятностные сценарии;
- предложена методика оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи.

# **1 ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ БВС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

## **1.1 Основные методы обследования с помощью беспилотных воздушных судов.**

С течением времени элементы высоковольтных линий электропередачи подвержены износу. На трассах ВЛ вырастают деревья и кустарники, которые приближаются к проводам на недопустимое расстояние и представляют угрозу технологического нарушения. Для своевременного обнаружения неисправностей и принятия мер по предотвращению возможных проблем необходимо проводить осмотры также в периоды повышенного риска, такие как пожары, грозы и обледенение проводов. Диагностика состояния элементов высоковольтных линий электропередачи предполагает оценку различных компонентов на предмет их структурной целостности, функциональности и безопасности. Использование беспилотных воздушных судов позволяет решать задачу диагностики ВЛ с надлежащим качеством за короткий промежуток времени. Одними из основных методов, используемых для диагностики состояния элементов линии электропередачи, являются:

**Визуальный осмотр.** Визуальный осмотр является самым основным методом оценки элементов линии электропередачи. Он включает в себя физический осмотр таких компонентов как изоляторы, провода и оборудование, на наличие признаков повреждений, коррозии, износа или других отклонений. На БВС для этого применяются гиростабилизированные видеокамеры с возможностью передачи изображения в режиме онлайн.

**Инфракрасная термография.** Инфракрасная термография обнаруживает изменения температуры вдоль элементов линии электропередачи, что может указывать на потенциальные проблемы, такие как ослабление соединений, перегрузка компонентов или нарушение изоляции. Тепловизионные камеры,

установленные на дронах используются для получения тепловых изображений компонентов линий электропередачи.

Обнаружение коронного разряда: Коронный разряд возникает когда электричество ионизирует воздух вокруг компонентов линии электропередачи, создавая характерное свечение или ультрафиолетовое излучение. Оборудование для обнаружения коронного разряда, такое как УФ-камеры может определять области коронного разряда вдоль линий электропередачи, что может указывать на потенциальные проблемы, такие как ухудшение изоляции или утечка.

Сканирование LiDAR: технология обнаружения и определения дальности света (LiDAR) создает подробные трехмерные модели инфраструктуры линий электропередачи, позволяя инспекторам с точностью оценивать состояние опор, проводов и других компонентов. Дроны, оснащенные LiDAR собирают данные облака точек, которые можно анализировать для выявления дефектов или отклонений от ожидаемой геометрии.

В настоящее время разработаны методы проведения автоматической проверки линий электропередачи с возможностью подзарядки от фазного провода, материалы исследования отправляются в облачный сервер (рисунок 3) для проведения оценки анализа данных специалистами на местах. [6]

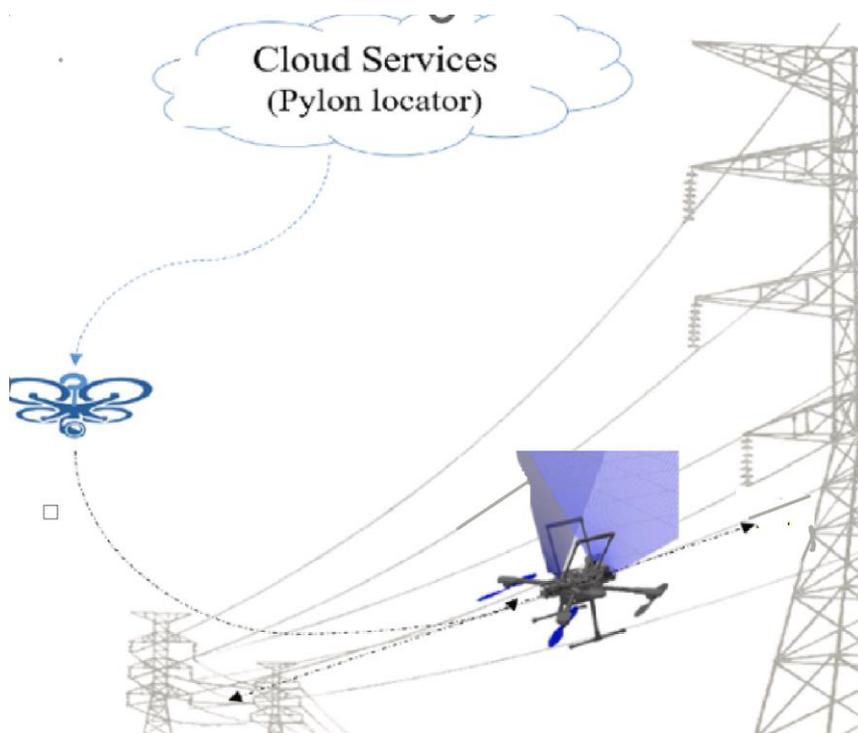


Рисунок 3- Проведения автоматической проверки линий электропередачи

Передовые методы анализа данных, такие как машинное обучение или распознавание образов, могут анализировать большие наборы данных, собранные с помощью различных методов диагностики, для выявления тенденций, аномалий или прогнозируемых индикаторов потенциальных сбоев. Эти методы повышают эффективность диагностических процессов и поддерживают стратегии профилактического обслуживания.

Используя комбинацию этих методов диагностики, электросетевые предприятия могут эффективно оценивать состояние элементов линий электропередачи, определять приоритетность работ по техническому обслуживанию и обеспечивать надежность и безопасность электроэнергетической инфраструктуры.

## **1.2. Выводы**

Основными преимуществами БВС для использования предприятиями энергетического сектора являются возможность оптимизации и упрощения процессов, сокращения трудозатрат, ускорение сбора данных, а также минимизация человеческого фактора. Развитию данного направления будет способствовать увеличение инвестиций со стороны коммерческого сектора, совершенствование регулирования, а также создание поддерживающей инфраструктуры.

## **2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.**

### **2.1 Анализ подходов к планированию миссий по обследованию элементов линий электропередачи.**

В настоящее время наиболее полное описание и актуальные подходы вместе с применяемым оборудованием для выполнения обследования элементов линий электропередачи описаны в Стандарте организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.200.10.235-2016 «Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи и энергетических объектов»[7]. В частности, стандарт определяет порядок применения БВС при обследованиях (плановых и внеочередных) коридоров прохождения ВЛ при помощи БВС самолетного и вертолетного типов. Для обследования протяженных участков ВЛ, в том числе, проходящих по труднодоступным участкам местности, должны применяться БВС самолетного типа, имеющие радиус применения не менее 50км. В нашей задаче построения алгоритма обработки исходных данных данный тип БВС не рассматривается поскольку он не позволяет устанавливать необходимую для наших целей полезную нагрузку, в частности тепловизионные и ультрафиолетовые камеры. БВС вертолетного типа применимы для исследований в радиусе 10-15км, позволяет выполнить съемку объекта с расстояния до 5 м.

Основными подготовительными этапами при использовании БВС для обследований являются:

- 1) Составление плана выполнения работ, разрабатывается оператором БВС
- 2) Согласование полета БВС, согласовывается руководителем полетов
  - 2.1) Отправка запроса на разрешение выполнения полетов в Зональный центр ЕС ОрВД.

2.2) Представление на установление местного режима (время летных смен, №борта, координаты взлета/посадки, координаты маршрута, диапазон высот полета)

2.3) За сутки Руководитель полетов узнает в отделе по режимам ЗЦ номер МР, составляет план полетов в соответствии с данными

3) Взаимодействие с пунктами управления полетами.

3.1) За 2 часа до времени выполнения полета доложить о готовности к началу работы

3.2) После взлета и совершения посадки докладывать в ЗЦ ЕС Ор ВД.

Согласно СТО, имеются ограничение на использование комплексов БВС для обследования высоковольтных линий электропередачи.

- при температуре воздуха, выходящей за пороговые значения определенные производителем оборудования в РЭ;
- при нахождении объектов наблюдения далее предельно установленной дистанции телекодовой линии связи между наземной станцией управления (НСУ) и БВС;
- при скорости ветра у поверхности земли, превышающей пороговое значение, определенное производителем оборудования в РЭ;
- при других неблагоприятных условиях, ограничивающих применение БВС в соответствии с РЭ.

Лицам, которые по состоянию здоровья или из-за отсутствия опыта и соответствующих знаний не могут уверенно работать с комплексом и его составными частями, не рекомендуется эксплуатировать комплекс без руководства опытного оператора БВС.

Из вышеописанного следует принять, что подготовительные этапы важны для планирования миссий полета и имеют свои вводные условия. Определение степени влияния исходных данных на результаты проведения

миссии полета, а также анализ факторов, влияющих на проведения обследования с применением БВС складываются в задачу с вероятностной постановкой. Основными влияющими факторами определим:

- Скорость ветра, м/с
- Температура окружающего воздуха, °С
- Литиево-ионная батарея, Ah
- Расстояние до исследуемого объекта, м
- Уровень подготовки оператора БВС
- Вероятность отказа двигателя, 4 шт.
- Орнитологическая обстановка

Влияющие факторы представляем в виде случайного события - события, которое может произойти с определенной вероятностью и определяются своими законами, так называемыми функциями распределения вероятности. Для каждого явления используется своё распределение вероятности, более точно отражающее вероятностный характер возникновения явления.

Для описания вероятностных событий метеорологических параметров выделяют статистический подход, основанный на анализе ретроспективных данных.

Стандартом СТО 56947007–29.200.10.235–2016 регламентировано применение полезной нагрузки Для диагностики ЛЭП на БВС вертолётного типа используют различные видеокамеры видимого диапазона, камеры инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. Применение видеокамер позволяет наземным бригадам дистанционно осмотреть под разными углами гирлянды изоляторов, оценить их загрязнённость и целостность, обследовать труднодоступные опоры и возможность подъезда к ним. Применение камер инфракрасного диапазона позволяет определять величину и разницу температур диагностируемых элементов. Неисправные элементы ВЛ, в случае возникновения дефекта, повышают свою температур относительно общей

экспозиции, при этом с развитием дефекта увеличиваются температуры, вплоть до полного разрушения. Так, при возникновении неплотного соединения между двух высоковольтных проводов, появляется нерасчетное сопротивление, вследствие чего растут температуры. Появление дефектов на изоляторах, например, сложно различаемых человеческим глазом микротрещин, является причиной возникновения пробоя, вследствие чего тоже растут температуры. Все эти дефекты с высокой вероятностью выявляются радиометрической тепловизионной камерой, установленной на БВС вертолетного типа.

## **2.2 Основные статистические методы для оценки влияющих факторов.**

Для описания вероятностных событий метеорологических параметров выделяют статистический подход, основанный на анализе ретроспективных данных. В таком подходе применяются методы математической статистики для анализа временных рядов.

### **2.2.1 Скорость ветра.**

При описании скорости ветра справедливо использовать распределение Вейбулла [8]. Распределение Вейбулла представляет собой двух- или трехпараметрическую функцию определяющую вероятность возникновения определенной скорости ветра на участке в зависимости от параметров Вейбулла.

Плотность вероятности трехпараметрического распределения Вейбулла имеет вид:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v-u}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v-u}{c} \right)^k \right], \quad (1)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с;  $k$  – параметр формы;  $c$  – параметр масштаба, м/с;  
 $u$  – параметр местности, м/с.

Плотность вероятности двух параметрического распределения Вейбулла имеет вид:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad (2)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с;  $k$  – параметр формы;  $c$  – параметр масштаба, м/с;

Соотношение между параметрами распределения Вейбулла и средней скоростью имеет вид:

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}, \quad (3)$$

где  $\bar{v}$  – средняя скорость ветра, м/с;  $k$  – параметр формы;  $c$  – параметр масштаба, м/с;  $\Gamma$  – гамма-функция.

На рисунке просматривается корреляция измеренных данных [8] к функции плотности вероятности скоростей ветра (рисунок 4). Данные натурных наблюдений повторяемости скоростей ветра обозначены кружками, а график их функции плотности вероятности – сплошной кривой.

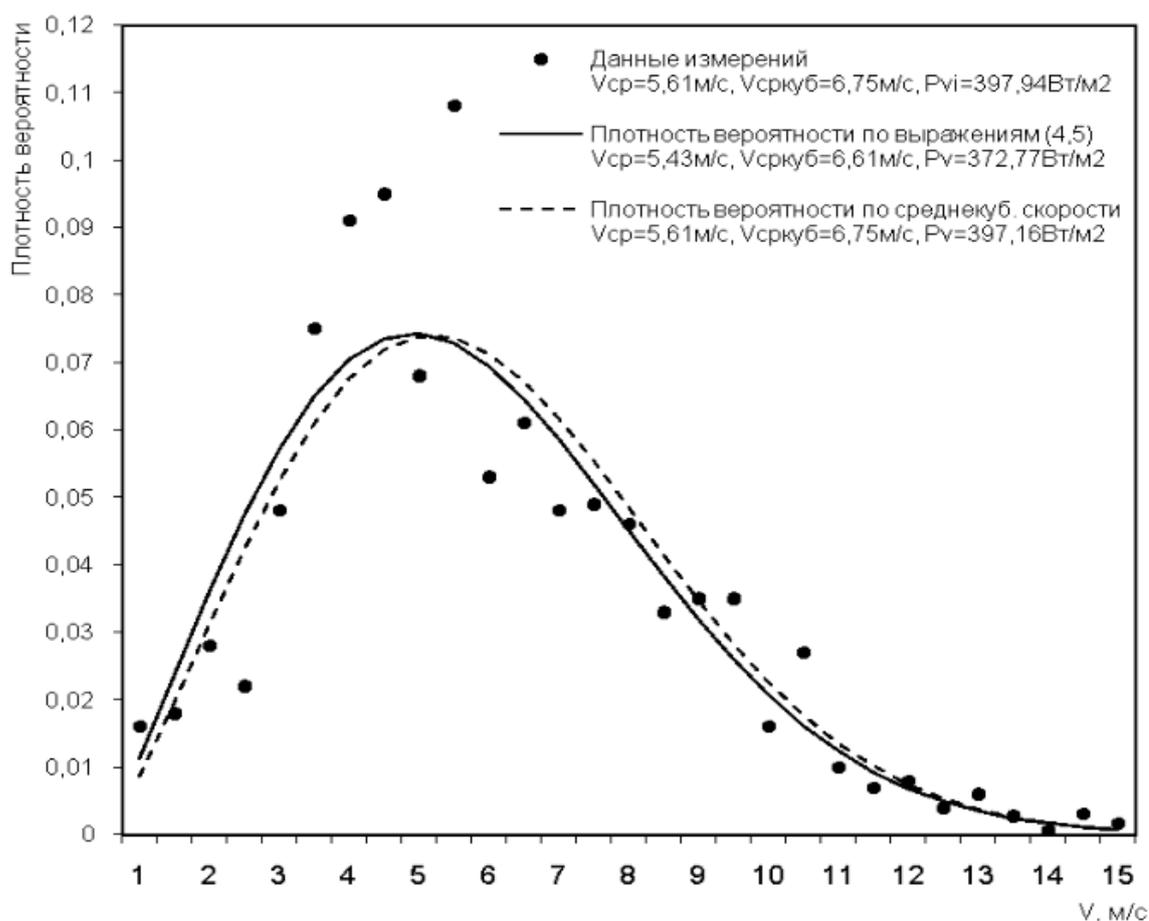


Рисунок 4 – Данные измерений скоростей ветра и их плотность вероятности

При описании скорости ветра на территории Урала используем карту районирования по потенциалу использования ветровых ресурсов (рисунок 5), с выдержкой приложения значений коэффициента формы  $k$ . (таблица 1)

Таблица 1 – Значения коэффициента формы  $k$ .

№	Тип ландшафта	Значение коэффициента формы $k$
2.3	20 м широколиственные и хвойные леса (густота 75 %)	2,5
2.4	17 м хвойные и вечнозеленые леса (густота 75 %)	2,5

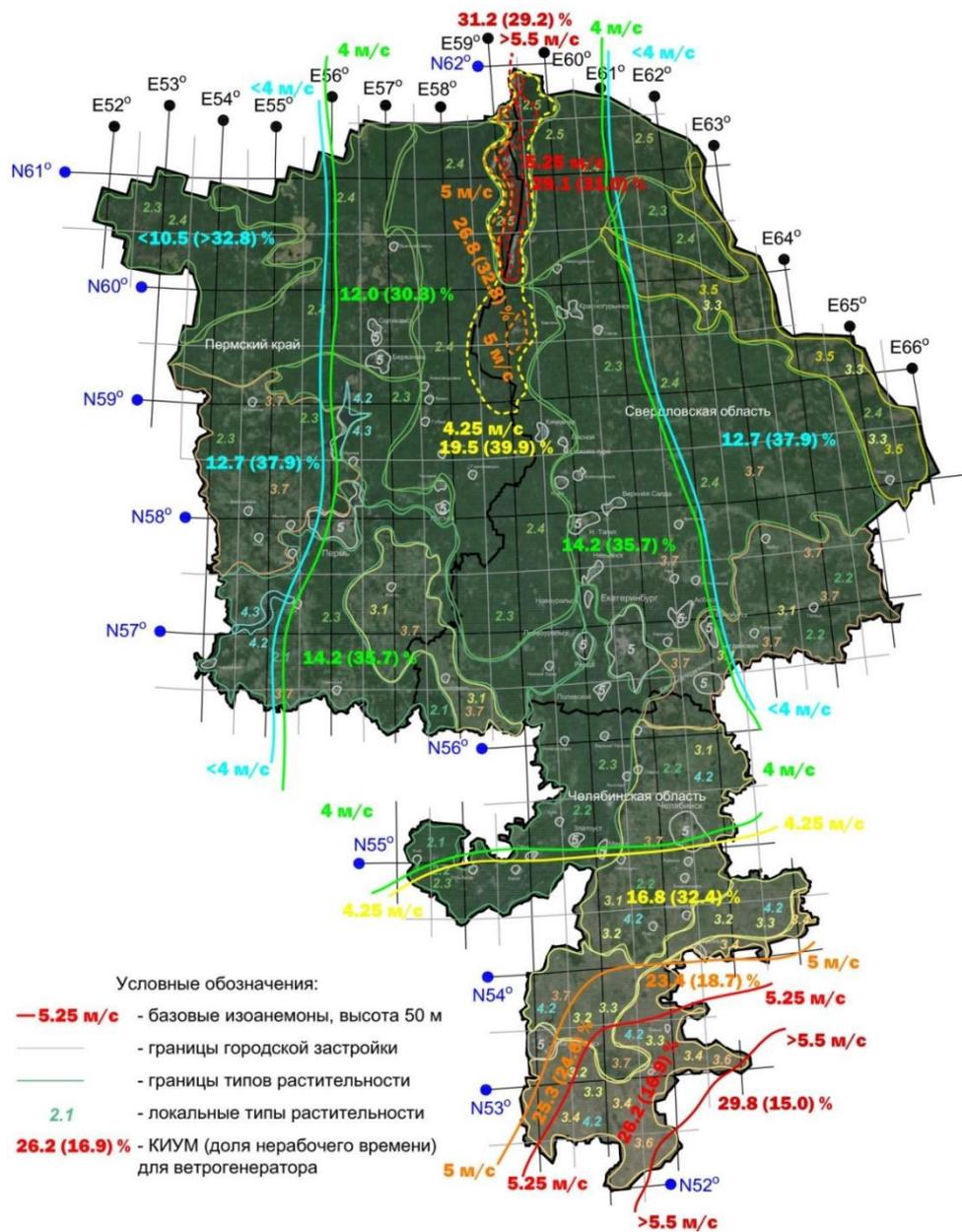


Рисунок 5 – Карта районирования по потенциалу использования ветровых ресурсов на территории Урала

### 2.2.2 Температура.

Для вероятностной оценки значения температуры справедливо использовать сезонный подход, основанный на предположении, что значения температуры являются периодическими функциями от времени. Так у разной

местности в разный период времени года разный прогноз температуры, и не всегда применимы конкретные распределения, поэтому возьмём классическое нормальное распределение на основании средних температур в регионе.

Нормальное (гауссовское) распределение хорошо подходит для моделирования температурных данных.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $\mu$ — среднее значение (математическое ожидание), определяющее центр распределения;  $\sigma$  — стандартное отклонение, определяющее ширину распределения и его разброс.

Для температур на Урале предполагаем, что они имеют среднее значение и стандартное отклонение, характеризующие сезонные колебания.

Распределение Гаусса, представляет собой функцию плотности вероятности, которая имеет характерную колоколообразную форму. На примере летнего периода примем значения средней температуры в регионе Урала  $15.4^{\circ}\text{C}$ , с отклонением  $7.5^{\circ}\text{C}$ . Код программы представлен в приложении А.

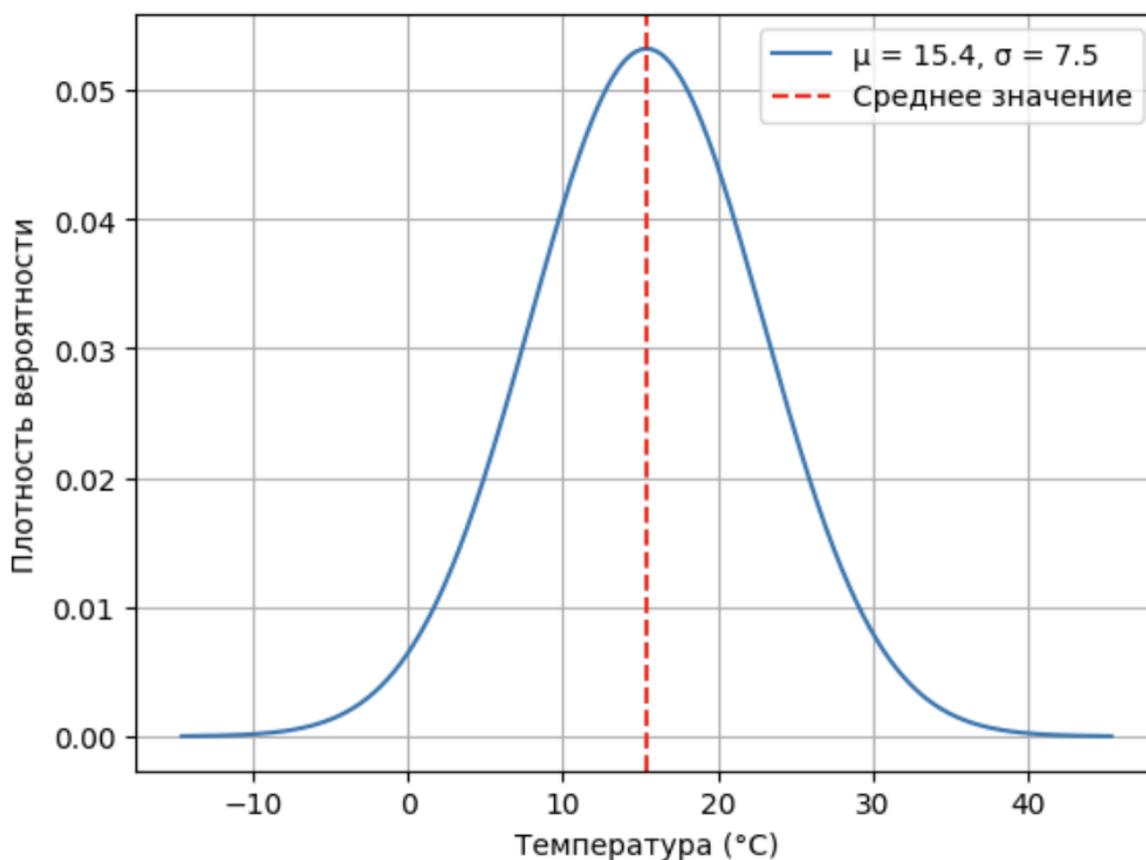


Рисунок 6 – Распределение Гаусса для температуры на Урале в летний период

### 2.2.3 Аккумуляторная батарея.

Важным фактором, влияющим на исход полета БВС является вероятность отказа аккумуляторной батареи. Благодаря своей высокой плотности энергии и мощности, длительному жизненному циклу и экологически чистым компонентам было разработано много видов литий-ионных батарей. Наиболее распространёнными являются два типа коммерческих литий-ионных батарей:  $LiFePO_4$  (LFP) и  $LiMn_2O_4$  (LMO). Надежность батарей выразить как количество отказов за период времени, либо другими словами как среднее время до отказа.

Вероятность отказа литий-ионного аккумулятора справедливо оценивается распределением Вейбулла поскольку оно имеет универсальные

характеристики подгонки распределения, основанных на его форме и параметрах масштаба и подходит для оценки преждевременных отказов и отказов, связанных с неудачными производственными партиями и эксплуатацией.

Поскольку параметр местности принимаем равно нулю, то плотность вероятности двух параметрического распределения Вейбулла имеет вид:

$$f(t) = \frac{k}{c} \left(\frac{t}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left(\frac{t}{c}\right)^k \right], \quad (5)$$

где  $k$  – параметр формы;  $c$  – параметр масштаба, м/с;.

Кумулятивная функция распределения Вейбулла определяется как:

$$F(t) = 1 - e \left[ - \left(\frac{t}{c}\right)^k \right] \quad (6)$$

Анализ расчетов [9] графически представлен на рисунке 5.

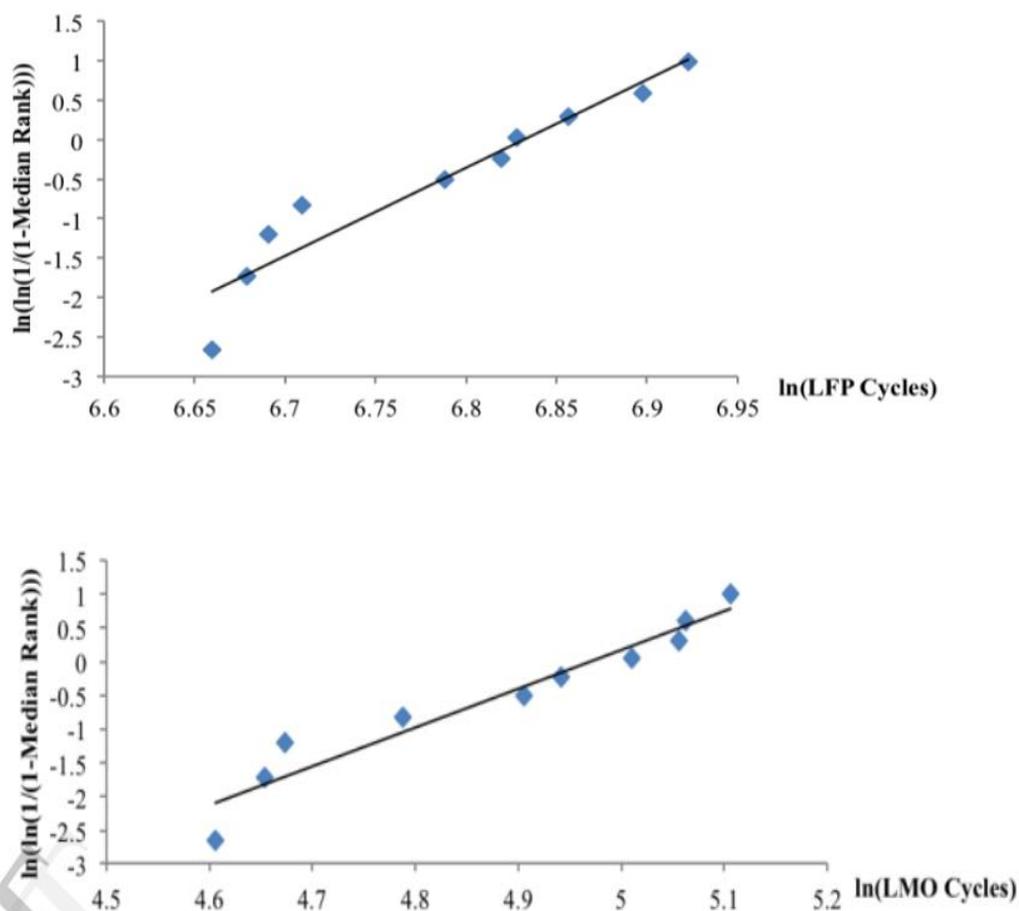


Рисунок 5 – Линейная регрессия батарей типа LFP и LMO.

Сравнивая параметры формы и параметры масштаба данных типов батарей определяем циклы (Таблица 2)

Таблица 2 – Параметры формы и параметры масштаба

Батарея	Параметр формы (к)	Параметр масштаба (с)
LFP	11.17	926.78
LMO	5.75	144.20

Параметр масштаба (с) представляет собой характерный срок службы элемента, определяемый как время, за которое 63,2 % батарей вышли из строя. Это означает, что около 36,8% LFP должны отработать не менее 926,78

циклов. Для сравнения, около 36,8% LMO должны отработать не менее 144,20 циклов.

Анализ разряда LFP батареи можно разделить на три фазы (рисунок 6).

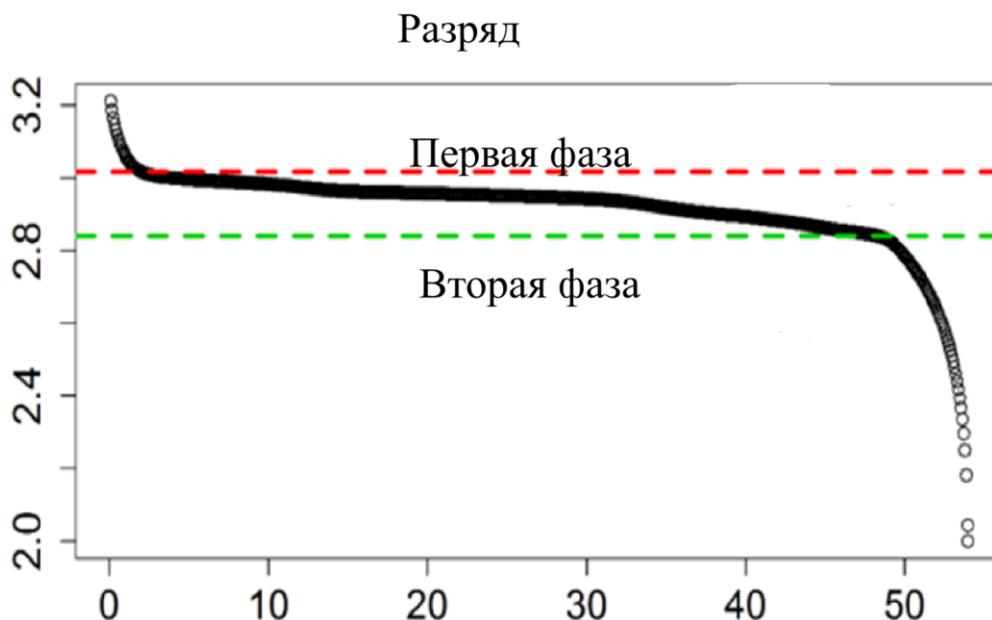


Рисунок 6 – Характеристика напряжения от времени одного цикла батарей типа LFP.

1. Резкое падение напряжения в начале процесса разряда;
2. Постепенное падение напряжения, основная часть процесса разряда;
3. Резкое падение напряжения в конце процесса разряда;

#### 2.2.4 Уровень подготовки оператора БВС.

Известным методом оценки риска возникновения аварий является Система анализа и классификации человеческого фактора (HFACS), которая разбивает причины аварий на четыре основные категории:

- организационные влияния,
- надзор,
- предварительные условия
- действия

Схематично стечение данных факторов можно представить на изображении (рисунок 7)



Рисунок 7 – Система анализа и классификации человеческого фактора.

В исследовании опроса 22 операторов БВС [12] уровень навыка играет решающую роль в процессе оценки риска. Опытные операторы БВС больше заботятся о процессе организационного влияния, а не о категории «действия» и «надзора», в то время как внимание менее опытных операторов БВС сосредоточены как на «действиях», так и на «надзоре» (рисунок 8). Результатами исследования выявлена значимость навыка оператора БВС, а значит развитие подходов к вопросам лицензирования операторов БВС, позволяющее снизить риск инцидента на 25% .



Рисунок 8 – Сравнительная оценка внимания операторов БВС на категории рисков

### 2.3 Матрица рисков

Матричное представление в риск-ориентированном подходе выражается в произведение вероятности наступления неблагоприятного события на степень тяжести этого события (т.е. средняя величина ущерба или, что более консервативно, максимально вероятная величина ущерба). В нашей задаче оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи матрица полезна поскольку вероятность и степень тяжести ущерба представляю обладают оценочной точностью (рисунок 9).

5–почти произошло	1.	0.2	0.4	0.6	0.8	1.
4–очень вероятны	0.8	0.16	0.32	0.48	0.64	0.8
3–средняя вероятность	0.6	0.12	0.24	0.36	0.48	0.6
2–мало вероятны	0.4	0.08	0.16	0.24	0.32	0.4
1–не возникнут	0.2	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.
		1–незначительное	2–минимальное	3–среднее	4–критичное	5–очень сильное

Рисунок 9 – Матрица рисков

Учитывая степень наступления фактора оказывающего влияние на оценку и степень тяжести этого события получаем анализ предварительных данных.

## 2.4 Выводы

Статистические подходы к оценке вероятности наступления события имеют важное значение, описывая методологию процесса. Статистические методы позволяют анализировать данные и делать выводы на основе эмпирических фактов. предсказывая вероятность наступления событий в будущем, что полезно для планирования и принятия решений. На основе статистики возможно оценить риски, что позволяет принять решения по использованию БВС для диагностики состояния линий электропередачи.

### **3 РАЗРАБОТКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.**

#### **3.1 Исходные данные.**

Для расчета многокритериальной функции нам потребуются конкретные данные с привязкой к местности, конкретной ВЛ, типом БВС и т.д.

##### **3.1.1 Основные технические характеристики БВС**

Рассмотрим основные технические характеристик БВС на примере DJI Matrice 210 (рисунок 10)



Рисунок 10 – БВС DJI Matrice 210

DJI Matrice 210 (M210) — это профессиональная платформа для БВС, предназначенная для выполнения сложных задач в таких областях, как инспекция инфраструктуры, поисково-спасательные операции, картографирование и мониторинг. Это надежный дрон с возможностью использования в суровых условиях, предоставляющий продвинутые функции для промышленных приложений. Основными преимуществами данной модели являются:

- поддержка нескольких камер
- поддержка различных датчиков для тепловизионной съемки, визуального анализа и LiDAR сканирования.
- время полета до 38 минут (в зависимости от полезной нагрузки и условий полета), при полной полезной нагрузке: до 11 минут.
- 2 аккумулятора DJI TB55, Литий-ионный (Li-ion), Емкость: 7660 мА·ч (7.66 А·ч). Напряжение: 22.8 В. W=174.6 Вт·ч. Масса: 885 г.
- Максимально допустимая скорость ветра: 12 м/с.
- Точность позиционирования по горизонтали: ±1,5 м.
- Класс защиты: IP43
- диапазон рабочих температур: от -20°C до +40°C [13].

Таблица 3 – Стоимость комплекта БВС DJI Matrice 210

№	Наименование	Стоимость, тыс.руб
1	DJI Matrice 210	2608.19
2	Аккумуляторы TB55 (2шт)	186.78
3	Зарядная станция	258.69
4	Запасные пропеллеры	8.98
5	Комплект разработчика	47.39
Итого		3113.72

### 3.1.2 Исследуемая высоковольтная линия электропередачи

В качестве примера диагностируемой ЛЭП выбрана ВЛ 110 кВ Дегтярка - Полевская, расположенная на территории Западных электрических сетей филиала «Свердловэнерго» ПАО «Россети Урал», длина составляет 23.5 км. Согласно Схеме и программе развития электроэнергетики Свердловской области на период 2020-2024, ориентировочная сметная стоимость её составила 144 млн.руб [14, СиПР], с учетом поправочных коэффициентов на 2024г. для учета роста цен приведенная стоимость составляет 214,698 млн.руб.

Для того, чтобы оценить затраты на проведение возможных ремонтных работ после технологического нарушения, которое должно быть найдено с помощью БВС, в справочнике был взят коэффициент затрат на обслуживание равны 0,4%, Стоимость затрат на обслуживание ВЛ 110 кВ Дегтярка – Полевская вследствие технологического нарушения равна 85,987 тыс.руб [15 справочник].

### 3.1.3 Климатические условия (район г.Полевской, г.Дегтярск)

Для учёта погодного фактора в оценке рисков миссии БВС были получены последние климатические данные для рассматриваемого объекта, которые находится рядом с г. Екатеринбург, собранные за период 1881 г – 2024г. Информация получена с метеорологической станции в Екатеринбурге. [16] В качестве характерных погодных состояний были взяты два месяца для данного региона: январь 2024, как самый холодный в среднем месяц в году, и июль 2023, как самый жаркий в среднем месяц в году. Норма среднемесячной температуры января:  $-12.6^{\circ}$ . Фактическая температура месяца по данным наблюдений:  $-14.4^{\circ}$ . Отклонение от нормы:  $-1.8^{\circ}$ . Норма суммы осадков в январе: 25 мм. Выпало осадков: 27 мм., 106% от нормы. Самая низкая температура воздуха ( $-27.2^{\circ}$ ) была 3 января. Самая высокая температура воздуха ( $-3.0^{\circ}$ ) была 24 января. Норма среднемесячной температуры июля:  $18.9^{\circ}$ . Фактическая температура месяца по данным наблюдений:  $21.7^{\circ}$ . Отклонение от нормы:  $+2.8^{\circ}$ . Норма суммы осадков в июле: 93 мм. Выпало осадков: 71 мм., 77% от нормы. Самая низкая температура воздуха ( $12.4^{\circ}$ ) была 16 июля. Самая высокая температура воздуха ( $40.0^{\circ}$ ) была 11 июля.

## **3.2 Многокритериальная функция оценки рисков использования БВС**

В функцию оценки рисков использования БВС в целях диагностики ЛЭП входят следующие факторы:

- Надежность работы литий-ионной аккумуляторной батареи БВС;

- Скорость ветра;
- Температура окружающего воздуха;
- Близость к диагностируемой ЛЭП.

Для получения значений, соответствующих уровню возможного риска БВС, каждый фактор представляется своей отдельной функцией распределения вероятности с заданными параметрами. Данный тип математического моделирования позволяет учесть вероятностный характер приведенных выше факторов. Использование данных функций позволит определить вероятность наступления события, связанного с повреждением БВС ввиду превышения допустимых рабочих характеристик устройства, которая в свою очередь будет использована для определения риска миссии.

Фактор надежности литий-ионной аккумуляторной батареи представлен распределением Вейбулла, с коэффициентом формы 11.17 и коэффициентом масштаба 926.78, полученные в ходе исследования, описанного выше. Количество циклов заряда-разряда батареи, которое будет использовано для получения значения вероятности отказа, варьировалось и бралось из следующего списка: 1(новый и еще не использованный аккумулятор), 100, 500, 1000 (аккумулятор с истекающим жизненным циклом).

Фактор скорости ветра представлен также распределением Вейбулла, с коэффициентом формы 2.5, характерного для рассматриваемого района сети, и коэффициента масштаба, который может варьироваться для моделирования различных условий. Средняя скорость ветра на высоте 10 м для заданного района составляет 2.3 м/с. Но объекты, подлежащие диагностике с БВС, а именно провода и опоры ЛЭП 110 кВ, как правило, располагаются выше 10 м, поэтому также была взята скорость на большей высоте (50 м), равная, для данного региона, удвоенной средней скорости 4.6 м/с. Заодно данное значение позволит смоделировать ситуацию с возможными сильными порывами ветра, которые представляют угрозу для рассматриваемого БВС. Также с этой целью

были взяты значения 9.2 м/с (утроенная средняя скорость ветра) и 25 м/с (максимальная зарегистрированная скорость ветра для данного региона).

Фактор температуры воздуха представлен нормальным распределением вероятности. Данное распределение было выбрано, потому что в каждом регионе имеется свой прогноз температуры в определенное время года, и не всегда имеются в наличии данные, позволяющие выбрать вид функции распределения вероятности и её параметры. Поэтому для данного фактора было взято стандартное нормальное распределение, которое часто берется для случаев, когда изначально неизвестны законы, устанавливающие вероятностное возникновение описываемых событий (к тому же, если следовать закону больших чисел, то все распределения так или иначе сводятся к нормальному, при наличии большого количества рассматриваемых данных). Математическим ожиданием распределения являются средние ( $21.7^{\circ}$  для июля и  $-14.4^{\circ}$  для января) и максимальные ( $40^{\circ}$  для июля и  $-27.2^{\circ}$  для января) наблюдаемые значения температуры для обоих характерных месяцев. Стандартным квадратичным отклонением является отклонение температуры от нормы для обоих рассмотренных месяцев ( $2.8^{\circ}$  для июля и  $-1.8^{\circ}$  для января).

Фактор близости БВС к частям диагностируемой ЛЭП обусловлен возможным приближением БВС к оборудованию под напряжением, что может привести к пробоем воздушного промежутка и последующим повреждением БВС электрической дугой. Ввиду отсутствия каких-либо статистических данных по данному фактору было решено выбрать нормальное распределение, с матожиданием, равным расстоянием от БВС до диагностируемой ЛЭП (принятое равным 5 м, как минимально допустимое расстояние согласно требованиям Россетей). Стандартное квадратичное отклонение равно точности горизонтального позиционирования, 1.5 м.

### **3.3 Методика применение методов компьютерного зрения для распознавания элементов линий электропередачи**

#### **3.3.1 Классификация методов компьютерного зрения**

Методы компьютерного зрения можно разделить на несколько основных категорий, каждая из которых включает в себя различные подходы и алгоритмы для обработки и анализа изображений.

1. Преобразование и фильтрация изображений. Эта категория в себя алгоритмы геометрических преобразований, такие как масштабирование, поворот, сдвиг; и алгоритмы устранения шумов и выделения определенных характеристик, таких как края или текстуры путем использования сглаживающих фильтров (Гаусса, медианный фильтр, билатериальный), фильтры выделения границ (Собеля) и другие.

2. Сегментация изображений. Обширная категория методов для решения различных задач, связанных с разделением изображения на фрагменты. Используются алгоритмы пороговой сегментации по цвету или яркости; алгоритмы кластеризации для объединения пикселей в области с похожими характеристиками; сегментация по границам; сегментация на основе моделей глубокого машинного обучения.

3. Выделение особых точек и определение их характеристик. Локальные дескрипторы используются для выделения наиболее значимых признаков в определенных точках или локальных блоках изображения (SIFT, SURF, ORB).

4. Классификация изображений. Используются алгоритмы машинного обучения для отнесения всего изображения целиком к определенному классу. Используемые методы машинного обучения включают в себя решающие деревья, наивный байесовский классификатор, метод опорных векторов, случайные леса, глубокие нейронные сети.

5. Детектирование объектов. Подобно предыдущему пункту, но на изображении выделяется объект(ы) и для каждого из них определяется свой класс.

6. Трекинг. Отслеживания движущихся объектов в видеопотоке, включая методы, базирующиеся на корреляции, на основе обнаружения объектов, и методы, использующие глубокое обучение.

В данной работе необходимо использование алгоритмов детектирования объектов. Существует несколько подходов, которые широко используются для этой цели.

1. Статистические алгоритмы на основе признаков. Изображение или его фрагмент (могут браться все фрагменты с перекрытием в скользящем окне) сопоставляется с шаблона объекта. Этот метод эффективен для небольших объектов с высоким контрастом, но неэффективен для больших изображений или объектов с изменяющейся формой или при съемке с различных расстояний. Более точного результата можно добиться путем сравнения не самих изображений объектов, а их образов в некотором пространстве признаков, например, с помощью дескрипторов.

2. Алгоритмы на основе машинного обучения. Если используется определения вектора признаков, то потом к нему могут применяться алгоритмы машинного обучения, работающие с табличными данными, такие как методы опорных векторов, ансамбли решающих деревьев и т.д. Наиболее популярными в настоящее время являются сверточные нейронные сети. В этом случае модели обучаются на больших наборах данных, чтобы определить признаки объектов и их положение на изображении. Однако в случае отсутствия большой размеченной выборки данных метод неприменим. Тем не менее, успехи современных систем компьютерного зрения в основном связаны именно с глубокими сверточными моделями машинного обучения. Можно выделить следующие модели:

- R-CNN (Region-based Convolutional Neural Networks), основанный на регионах интереса (RoI) для предварительного выделения потенциальных объектов, а затем применения модели машинного обучения для классификации и локализации объектов внутри каждого RoI.

- Fast R-CNN представляет собой улучшенную версию R-CNN, которая использует единую сверточную сеть для извлечения признаков изображения и регионов интереса, что позволяет ускорить процесс детектирования объектов.

- Faster R-CNN модифицирует Fast R-CNN так, чтобы нейронная сеть использовалась и для определения регионов интереса, что позволяет ускорить процесс детектирования объектов.

- YOLO (You Only Look Once) – один из самых быстрых алгоритмов детектирования объектов, который использует одну сверточную сеть для одновременной классификации и локализации объектов на изображении. Этот метод может быть эффективным для реального времени и обработки видеопотока.

### **3.3.2 Особенности применения компьютерного зрения при получении изображений с беспилотного воздушного судна**

Применение компьютерного зрения в БВС получило широкое распространение, поскольку позволяет решать ряд задач:

- распознавание препятствий в реальном времени для избежаний столкновений;
- определения местоположения БВС и навигации в условиях;
- автоматического управления полетом БПЛА, включая контроль высоты, скорости и направления полета;
- мониторинг окружающей среды;

При этом применение компьютерного зрения в БВС требует особого подхода к получению и обработке данных.

БВС собирают большие объемы данных в реальном времени, включая видеопотоки, телеметрические данные и данные с датчиков. Это требует высокопроизводительных систем обработки данных, чтобы обеспечить быструю обработку и анализ данных, особенно если он выполняется в режиме реального времени. В то же время ограничение веса и габаритов БВС не позволяет использовать мощные вычислительные системы на борту. Передача данных также ограничена. Поэтому перспективным направлением исследований создание алгоритмов извлечения из видеопотока или изображений признаков, из которых затем можно получить всю необходимую информацию.

Необходимо отметить, что БВС могут работать в условиях низкого качества данных из-за ограничений на габариты и вес камер, съемки в движении, плохих условий съемки (освещение, дождь, снег, дым) и прочих факторов. Это требует использования алгоритмов, устойчивых к помехам и способных обрабатывать данные с низким качеством.

Аспектом, который часто упускается в исследованиях, является необходимость обеспечения защиты данных. БВС часто собирают хранят конфиденциальные данные и даже данные, которые могут быть отнесены к государственной тайне. Поэтому необходимо обеспечение безопасности данных, включая шифрование данных, контроль доступа и защиту от несанкционированного доступа.

### **3.3.3 Анализ использования методов компьютерного зрения при использовании беспилотного воздушного судна в задачах диагностики состояния элементов линий электропередачи**

БВС могут использовать камеры не только видимого спектра, но и тепловизионные камеры и другие сенсоры для получения детальных изображений элементов линий электропередачи. Затем методы компьютерного зрения позволяют обработать эти изображения и выделить

ключевые признаки, такие как обрывы проводов, коррозия и другие дефекты. При этом методы компьютерного зрения позволяют автоматически обрабатывать данные с БВС и выявлять проблемы в режиме реального времени или приближенном к нему. Это позволяет оперативно реагировать на обнаруженные проблемы и предотвращать возможные аварийные отключения.

Результаты съемки ЛЭП с БВС могут быть проанализированы человеком. Но использование методов компьютерного зрения позволяет многократно значительно ускорить процесс мониторинга и диагностики элементов линий электропередачи, что позволяет сократить время и затраты на проведение регулярных проверок и обслуживание линий электропередачи.

Уже отмеченной особенностью является необходимость обучения, валидации и тестирования моделей на основе больших объемов данных для автоматического обнаружения и классификации элементов линий электропередачи и выявления их дефектов.

В области применения компьютерного зрения для диагностики состояния элементов линий электропередачи существует ряд перспективных направлений исследований:

- использование моделей машинного обучения для автоматического обнаружения и классификации дефектов на ЛЭП;
- разработка методов обработки видеопотоков с БВС в режиме реального времени;
- интеграция данных с различных источников, включая камеры видимого спектра, инфракрасные камеры, лидары, телеметрию для получения полной картины состояния ЛЭП
- разработка новых алгоритмов обработки изображений для оптимизации процессов обработки и передачи данных на основе выделения ключевых признаков;

- разработка автономных систем диагностики ЛЭП, которые могут работать без участия оператора.

Для детектирования элементов ЛЭП используются различные алгоритмы компьютерного зрения, можно выделить наиболее перспективные.

1. Алгоритмы обнаружения объектов, такие как R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN и YOLO, используются для автоматического обнаружения элементов ЛЭП, таких как провода, опоры, изоляторы и т.д.

2. Алгоритмы сегментации изображений, такие как U-Net и Mask R-CNN, используются для разделения элементов ЛЭП на отдельные сегменты, что позволяет более точно детектировать и классифицировать элементы.

3. Алгоритмы обнаружения краев, такие как операторы Кэнни и Собеля, используются для выделения границ элементов ЛЭП на изображениях, что помогает детектировать основные элементы ЛЭП.

4. Алгоритмы выделения характерных точек.

Последняя категория является хорошей альтернативой использования моделей глубокого обучения с точки зрения оптимизации обработки данных и отсутствия необходимости обучения на больших объемах размеченных данных.

Существует несколько алгоритмов для выделения ключевых точек изображений, которые используются в компьютерном зрении и компьютерной графике. Некоторые из наиболее популярных алгоритмов:

1. SIFT (Scale-Invariant Feature Transform). Алгоритм SIFT использует масштабно-инвариантные фильтры для обнаружения и описания ключевых точек на изображении. Он устойчив к изменениям масштаба, повороту и освещению.

2. SURF (Speeded Up Robust Features). Алгоритм SURF использует ускоренные фильтры для обнаружения и описания ключевых точек.

Алгоритмы работает быстрее, чем SIFT, но также устойчив к изменениям масштаба, повороту и освещению.

3. FAST (Features from Accelerated Segment Test). Алгоритм FAST использует ускоренный сегментный тест для обнаружения ключевых точек. Отличается быстротой и точностью, но не так устойчив к изменениям масштаба и освещения, как SIFT и SURF.

4. ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF). Алгоритм ORB объединяет FAST для обнаружения ключевых точек и BRIEF для описания точек. Поэтому при сохранении быстроты и точности FAST является устойчивым к изменениям масштаба и повороту.

5. MSER (Maximally Stable Extremal Regions). Алгоритм MSER использует поиск максимально стабильных экстремальных областей для обнаружения ключевых точек. Устойчив к изменениям масштаба и освещению.

6. Harris corner detector. Алгоритм Харриса использует матрицу Харриса для обнаружения угловых точек на изображении. Алгоритм быстрый, но не так устойчив к изменениям масштаба и освещению, как SIFT и SURF.

### **3.3.4 Выбор языка программирования для реализации системы компьютерного зрения**

При выборе языка программирования для задач компьютерного зрения рекомендуется учитывать следующие факторы:

- наличие и качество библиотек и фреймворков для компьютерного зрения на языке программирования; например, для Python доступно множество библиотеки, таких как TensorFlow, PyTorch, OpenCV, scikit-image;
- вычислительная производительность, такие языка как C и C++, имеют преимущество в вычислительной производительности, особенно для сложных и ресурсоемких задач компьютерного зрения (хотя стоит отметить, что

указанные выше библиотеки содержат внутри код на С и С++, а использоваться могут и на других языках);

- удобство и скорость разработки, которые особенно важны для исследовательских задач;

- наличие активной и поддерживаемой экосистемы и сообщества для языка программирования;

- интеграция с другими системами (например, С++ имеет преимущество в интеграции с другими системами и библиотеками)

В целом, Python является наиболее популярным и универсальным языком программирования для компьютерного зрения благодаря библиотекам и фреймворкам машинного обучения, удобству и скорости разработки, активному сообществу и поддержке. Однако для сложных и ресурсоемких задач С++ может иметь преимущество в производительности и оптимизации кода. В данной работе используется Python, как позволяющий быстрее реализовывать прототипы и проверять гипотезы. Однако, при развитии проекта конечное решение предполагается реализовывать на языке С++.

В экосистеме Python существует множество библиотек, которые предназначены для компьютерного зрения. Эти библиотеки предоставляют широкий спектр инструментов для обработки изображений, распознавания объектов, лиц, сегментации изображений и многое другое. Ниже приведен обзор некоторых из наиболее популярных и мощных библиотек компьютерного зрения на Python.

1. OpenCV (Open Source Computer Vision Library – одна из самых популярных и широко используемых библиотек для компьютерного зрения. Она предоставляет функции для обработки изображений и видео, распознавания объектов, лиц, следящих систем и многое другое. OpenCV поддерживает множество платформ и языков программирования, включая Python.

2. TensorFlow и Keras. TensorFlow является мощной библиотекой для машинного обучения и глубокого обучения, которая также широко используется для компьютерного зрения. Keras является высокоуровневым API для TensorFlow, который упрощает создание и обучение нейронных сетей. Обе библиотеки предлагают множество предварительно обученных моделей для задач компьютерного зрения, таких как распознавание объектов и сегментация изображений.

3. PyTorch – библиотека для глубокого обучения, которая предлагает динамический граф выполнения (в отличие от статического графа TensorFlow). PyTorch очень популярен среди исследователей за свою гибкость и удобство использования, а также предлагает множество инструментов для компьютерного зрения. Последние годы PyTorch успешно вытесняет TensorFlow и Keras.

4. Scikit-image – это библиотека, предназначенная для широкого спектра операций с изображениями, включая фильтрацию, сегментацию, морфологические операции и анализ текстур, а также ряд узкоспециализированных алгоритмов.

5. Pillow (PIL fork) – библиотека для работы с изображениями, предоставляющая простой интерфейс для открытия, изменения и сохранения изображений в различных форматах. Она поддерживает основные операции над изображениями, такие как изменение размера, цветовая коррекция.

6. Mahotas – библиотека для компьютерного зрения и обработки изображений, которая акцентирует внимание на алгоритмах для анализа изображений в медицинской диагностике и биологии. Она предлагает функции для морфологической обработки, текстурного анализа и сегментации изображений.

В данной работе основным инструментом является библиотека OpenCV, а также библиотека для операций с матрицами NumPy.

### 3.3.5 Пример использования методов компьютерного зрения для распознавания элементов ЛЭП

Практическая часть работы была выполнена на данных съемки реальной опоры ЛЭП с помощью БВС с камерой видимого спектра и инфракрасной камерой. При этом собраны данные с различных ракурсов, расстояний, при различном фоне (только небо, только земля, небо и земля). Примеры приведены на рисунках 11-14.

Кроме видимого спектра, для каждой точки съемки получено и изображение в ИК-спектре. Для изображения, показанного на рисунке 11 соответствующее ИК-изображение приведено на рисунке 14.

Камеры не являются полностью соосными, кроме того, имеют разное разрешение, поэтому возникла задача разработки алгоритма совмещения изображений, включающего в себя следующие шаги:



Рисунок 11 – Пример снимка опоры ЛЭП с БВС

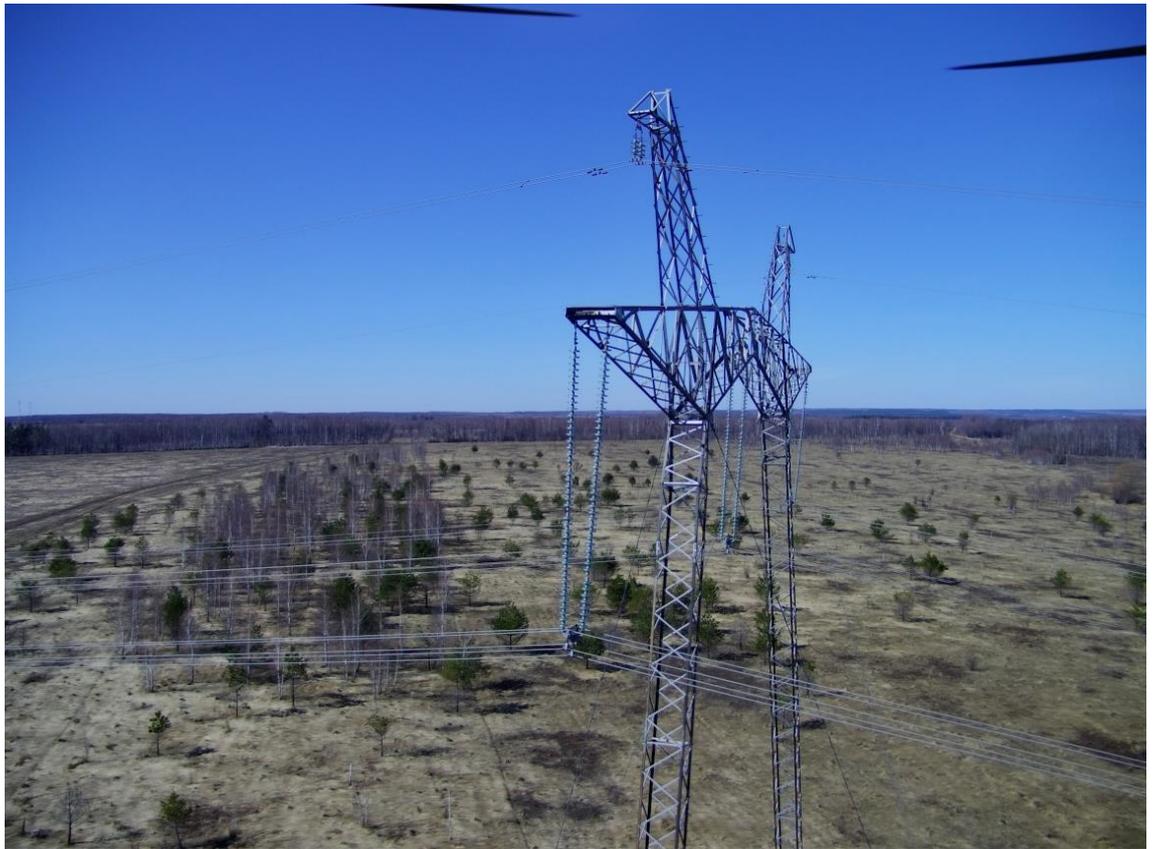


Рисунок 12 – Пример снимка опоры ЛЭП с БВС



Рисунок 13 – Пример снимка опоры ЛЭП с БВС



Рисунок 14 – Пример снимка опоры ЛЭП с БВС в инфракрасном спектре

- изменение размера ИК-изображения;
- поворот ИК-изображения;
- наложение ИК-изображения на изображение в видимом спектре со сдвигом.

Код приведен в Приложении А.

Определение матриц поворота и сдвига можно выполнить с помощью выделения ключевых точек на изображении. На рисунке 3.5 показаны результаты работы алгоритма.



Рисунок 15 – Результаты алгоритма совмещения изображений в видимом и ИК-спектрах

Применение к изображению алгоритмов выделения признаков является важным этапом для распознавания элементов ЛЭП, которое необходимо для последующей оценки их технического состояния. На рисунках 16–17 показаны применение детектора Харриса, позволяющего выделить по облаку ключевых точек область, которую занимает ЛЭП на снимке.

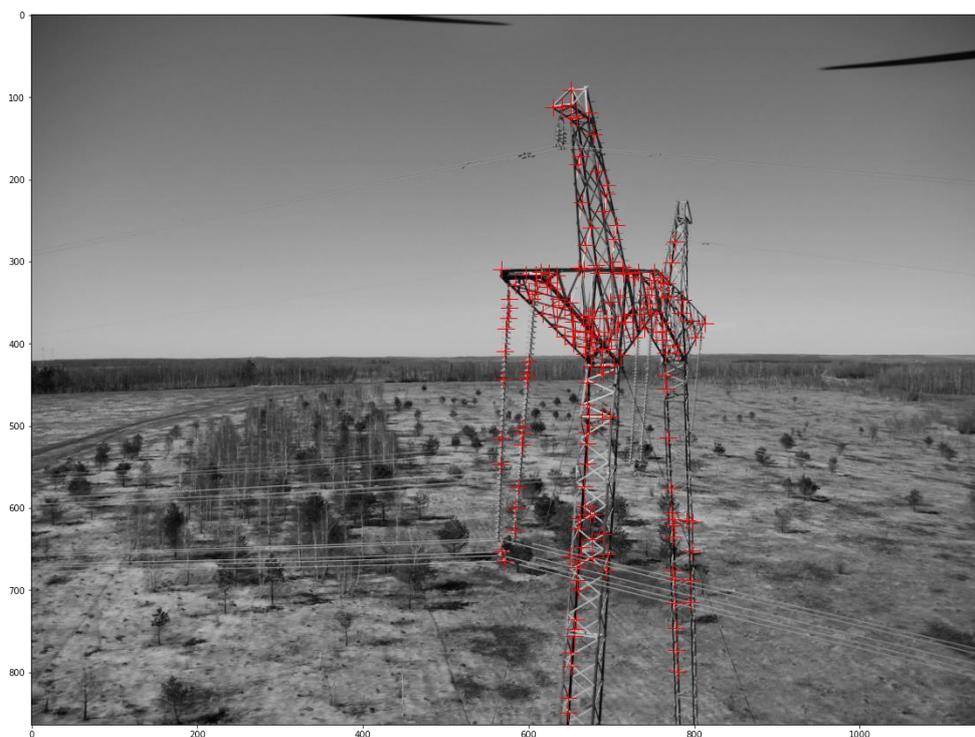


Рисунок 16 – Выделение области, занимаемой ЛЭП на снимке с помощью детектора Харриса



Рисунок 17 – Выделение области, занимаемой ЛЭП на снимке с помощью детектора Харриса

По сравнению с алгоритмом выделения тонких границ Кэнни, алгоритм Харриса предпочтительнее, поскольку алгоритм Кэнни не удалось адаптировать для получения приемлемой точности на фоне земли (пример с большим числом выделенного шума приведён на рисунке 18).



Рисунок 18 – Результаты алгоритма выделения тонких границ Кэнни

Детектор углов Харриса может быть использован и для выделения отдельных тарелок гирлянды изоляторов при настройке коэффициента чувствительности, как показано на рисунке 19.



Рисунок 19 – Распознавание тарелок с помощью детектора Харриса

### 3.4 Методика расчета показателей риска

Расчет показателей риска можно разделить на два этапа: расчет вероятностей отказа БВС под воздействием различных факторов и последующий анализ рисков.

Расчет вероятностей выполнен следующим образом: приведенные факторы, потенциально приводящие к отказу БВС, не зависят друг от друга и поэтому отказы, происходящие вследствие какого-либо из факторов, можно считать независимыми событиями. Также одновременно за одну миссию БВС могут сработать несколько факторов, то есть у отказа может быть несколько причин одновременно. Такие события, которые могут произойти вместе за одно испытание, называются совместными. Согласно теории вероятности, вероятность возникновения хотя бы одного из совместных событий (которые приводят к отказу БВС) равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного появления:

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (6)$$

где  $P(A)$  и  $P(B)$  – вероятности наступления событий  $A$  и  $B$  соответственно,

$P(AB)$  – вероятность одновременного появления  $A$  и  $B$ .

Выражение (6) преобразовывается к следующему виду:

$$P(A + B) = 1 - P(\bar{A} \cdot \bar{B}) \quad (7)$$

где  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$  – события, противоположные  $A$  и  $B$  соответственно.

Для рассматриваемой задачи формула будет принимать следующий вид:

$$P(O) = 1 - P(\bar{B} \cdot \bar{V} \cdot \bar{T} \cdot \bar{L}) \quad (8)$$

, где  $P(O)$  – общая вероятность отказа БВС,

$P(\bar{B})$  – событие, обратное отказу БВС по причине отказа батареи,

( $\bar{B}$ ) – событие, обратное отказу БВС из-за превышения допустимых температур,

( $\bar{T}$ ) – событие, обратное отказу БВС из-за превышения допустимых температур,

( $\bar{L}$ ) – событие, обратное отказу БВС по причине слишком низкого расстояния до токоведущих частей.

Оценка рисков производится следующим путем: полученное значение полной вероятности возникновения одного из событий умножается на затраты, возникающие при потере БВС. Делается допущение, что затраты на ремонт/восстановление БВС равны стоимости новых закупных. Но при поломке БВС не теряются все элементы комплекта, а БВС и те, которые непосредственно находятся на БВС, тем самым для расчетов рисков берется следующее значение затрат:

Таблица 4 – Стоимость комплекта БВС DJI Matrice 210 при отказе

№	Наименование	Стоимость, тыс.руб
1	DJI Matrice 210	2608.19
2	Аккумуляторы TB55 (2шт)	186.78
Итого		2796.47

Полученные значения риска сравниваются со стоимостью ремонтно-восстановительных работ, которые могут быть нужны, если БВС пропустит технологическое нарушение. Затем принимается решение – отправлять БВС на ремонтные работы или нет, выбирая между потенциально поврежденным БВС и технологическим нарушением.

### 3.5 Результаты расчетов

Расчеты потенциальных рисков были полностью выполнены в программном комплексе Matlab, версия R2022b.

Для всех описанных выше значений температуры и количества циклов разряд-заряд были посчитаны значения рисков, путем перемножения суммарной вероятности на стоимость потенциально потерянного БВС. Зеленым цветом выделены такие ячейки, риск-факторы которых меньше, чем значение затрат.

Таблица 5 Анализ риска для июля, средние температуры

Скорость ветра, м/с \ количество циклов АКБ	1	100	500	1000
2.3	27448	27448	30257	2681300
4.6	27495	27495	30304	2681300
9.2	424130	424160	426560	2697800
25	2387900	2387900	2388400	2779500

Таблица 6 – Анализ риска для января, средние температуры

Скорость ветра\количество циклов АКБ	1	100	500	1000
2.3	30029	30029	32835	2681400
4.6	30075	30075	32881	2681400
9.2	426370	426370	428770	2697900
25	2388300	2388300	2388700	2779500

Таблица 7 Анализ риска для июля, максимальная температура

Скорость ветра\количество циклов АКБ	1	100	500
2.3	1412000	-	-

Таблица 8 Анализ риска для января, максимальная температура

Скорость ветра\количество циклов АКБ	1	100	1000
2.3	2796400	-	-

### 3.6 Выводы

Выполнен обзор методов компьютерного зрения применительно к задаче обработки и анализа графических данных с беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи. Показано, что применение могут найти как модели глубоких нейронных сетей (YOLO, Faster R-CNN и др.), так и более вычислительно простые методы, основанные на выделении определенных признаков с учетом специфики задачи.

Обоснован выбор языка программирования Python и библиотеки машинного обучения OpenCV для решения поставленных задач.

Для выполнения экспериментальной части использована выборка более чем 100 снимков ЛЭП с видимом и ИК-спектрах, полученных с БВС мультроторного типа. Разработаны и реализованы на языке Python алгоритмы совмещения снимков в видимом и ИК-спектрах. Проанализированы особенности алгоритмов извлечения признаков, показано, что детектор углов Харриса позволяет обнаруживать на снимках ЛЭП и их элементы для последующей диагностики их состояния.

Выполнен расчет вероятностных событий сравниваемые с риском потери БВС и затратной стоимостью восстановления линии. Важно отметить, что при критических значения температуры оценка целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи не подтверждает работу на ВЛ. На основании произведенных расчетов, при благоприятных погодных условиях (скорость ветра менее 4,6м/с, кол-во циклов АКБ менее 500) оценка риска потери БВС меньше стоимости восстановительных работ на ВЛ вследствие ТН, что позволяет принять решение о производстве работ по диагностике ВЛ в данный момент.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами выпускной квалификационной работы магистра являются:

1. Обоснованы актуальность и значимость задачи оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи.
2. Отобраны факторы оказывающие наибольшее влияние на оценку целесообразности применения беспилотных воздушных судов для диагностики состояния элементов линий электропередачи.
3. Проведен анализ существующих подходов к планированию миссий по обследованию элементов линий электропередачи.
4. Предложена методика оценки целесообразности применения беспилотных воздушных судов на основании многокритериальной функции, учитывающей вероятностный сценарий влияния основных факторов.
5. Проведена адаптация существующих подходов к принятию решения по использованию БВС для диагностики состояния линий электропередачи, Проанализирована оценка рисков утраты БВС либо технологического нарушения при использовании БВС

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск: Наука, 2009. - 136 с.
2. P.V. Belyaev, A.P. Golovsky Omsk State Technical University “Inspection of high-voltage line using unmanned aerial vehicles” Mechanical Science and Technology Update, vol. 9-1 (84), 2023 doi:10.1088/1742-6596/1260/5/052002
3. Global Drone Power Line Inspection Market 2024 By Company, Regions, Type And Application, Forecast To 2030. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marketreportsworld.com/global-drone-power-line-inspection-market-26951424>
4. А.Аниченкова., К.Смотровва Презентационный материал ПАО «Ростелеком» Рынок гражданских беспилотных аппаратов. 1 кв.2024г.
5. Какие отрасли в России переходят на беспилотники, 18 октября 2023, [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rbc.ru/industries/news/651fc16d9a79476386445662>
6. Рынок БВС в России, [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aeroscript.ru/investors>
7. Oscar Bowen Schofield, Nicolai Iversen, Emad Ebeid Autonomous power line detection and tracking system using UAVs, SDU UAS Center, The Maersk Mc-Kinney Moller Institute, University of Southern Denmark, Odense, Denmark,
8. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.200.10.235-2016 «Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи и энергетических объектов»
9. А.В. Сидоров, канд. техн. наук, В.Г. Сидоров, инженер, И.З. Шволко, инженер, К.Н. Фадеев, аспирант (БНТУ), Энергетические характеристики ветра, УДК 620.91

10. Farnaz Ganjeizadeh, Thananan Tapananon, Howard Lei, Predicting Reliability of Lithium Ion Batteries, ISSN: 2278-0181
11. Chun Pang LIN, Man Ho LING, Javier CABRERA, Fangfang YANG, Denis Yau Wai YU, Prognostics for lithium-ion batteries using a two-phase gamma degradation process model, School of Data Science, City University of Hong Kong, Hong Kong
12. Omar ALHARASEES, Mlifthah S.M. ABDALLA, Utku KALE Analysis of Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) of UAV Operators DOI: 10.1109/NTAD57912.2022.10013492
13. Квадрокоптер DJI Matrice 210 [Электронный ресурс]. [https://www.djimsk.ru/catalog/products/industrial/matrice/kvadrokopter\\_dji\\_matrice\\_210\\_rtk\\_v2.html](https://www.djimsk.ru/catalog/products/industrial/matrice/kvadrokopter_dji_matrice_210_rtk_v2.html)
14. Погода и климат [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/>

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### ФРАГМЕНТЫ ИСХОДНОГО КОДА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КАМЕР БВС

#### *Алгоритм совмещения изображений в видимом и ИК-спектрах*

```
# Импорт необходимых библиотек

import cv2 as cv

import numpy as np

from google.colab.patches import cv2_imshow

import math

# Функция для поворота изображения
def rotation(image, angleInDegrees):

    h, w = image.shape[:2];

    img_c = (w / 2, h / 2);

    rot = cv.getRotationMatrix2D(img_c, angleInDegrees, 1);

    rad = math.radians(angleInDegrees);

    sin = math.sin(rad);

    cos = math.cos(rad);

    b_w = int(h * abs(sin) + w * abs(cos));

    b_h = int(h * abs(cos) + w * abs(sin));
```

```

rot[0, 2] += ((b_w / 2) - img_c[0]);
rot[1, 2] += ((b_h / 2) - img_c[1]);

return cv.warpAffine(image, rot, (b_w, b_h), flags=cv.INTER_LINEAR,
borderValue=(0,0,0));

# Поворот ИК-изображения
ir_img_rot = rotation (ir_img, 1.62);

# Изменение размера ИК-изображения
scale_percent = 92;
width = int(ir_img_rot.shape[1] * scale_percent / 100);
height = int(ir_img_rot.shape[0] * scale_percent / 100);
dim = (width, height);
resized = cv.resize(ir_img_rot, dim, interpolation = cv.INTER_AREA)

# Размещение ИК-изображения
num_rows, num_cols = rgb_img.shape[:2];
translation_matrix = np.float32([ [1,0,295], [0,1,224] ]);
img_translation = cv.warpAffine(resized, translation_matrix, (num_cols,
num_rows));

print('Исходные размеры RGB-изображения : ',rgb_img.shape);
print('Изменённые размеры ИК-изображения : ',img_translation.shape);

```

```
# Совмещение ИК-изображения и RGB-изображения  
blended_img = cv.addWeighted(rgb_img, 0.7, img_translation, 0.5, 0.0);  
cv.imwrite('mix_image.jpg', blended_img)  
cv2.imshow('blended_img');
```

### *Алгоритмы выделения признаков*

```
# Импорт необходимых библиотек

from matplotlib import pyplot as plt

import cv2 as cv

from google.colab.patches import cv2_imshow

from skimage import data

from skimage.feature import corner_harris, corner_subpix, corner_peaks, hog

from skimage.feature import match_descriptors, plot_matches

from skimage.transform import warp, AffineTransform

from sklearn.cluster import DBSCAN

from skimage.draw import ellipse

from skimage import io, exposure

from skimage.color import rgb2gray

import numpy as np

import glob

# Функция, описывающая Детектор углов Харриса.

def harris (image, distance, threshold):

    coords = corner_peaks(corner_harris(image), min_distance=distance,

threshold_rel= threshold);
```

```

fig, ax = plt.subplots(figsize=(20, 15));

ax.imshow(image, cmap=plt.cm.gray);

ax.plot(coords[:, 1], coords[:, 0], color='red', marker='+', linestyle='None',
markersize=20);

plt.show();

# Функция, описывающая Детектор Канны.

def canny (grayscale, low_threshold, high__threshold):

    canny_img = cv.Canny(grayscale, low_threshold, high__threshold,
apertureSize=3);

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(20, 15));

    ax.imshow(canny_img, cmap=plt.cm.gray);

    plt.show();

# Функция, описывающая оператор Собеля.

def sobel (grayscale, ddepth, ksize, scale, delta, prior_x, prior_y):

    grad_x = cv.Sobel(grayscale, ddepth, 1, 0, ksize=ksize, scale=scale,
delta=delta);

    grad_y = cv.Sobel(grayscale, ddepth, 0, 1, ksize=ksize, scale=scale,
delta=delta);

    Scale_absX = cv.convertScaleAbs(grad_x);

    Scale_absY = cv.convertScaleAbs(grad_y);

    result = cv.addWeighted(Scale_absX, prior_x, Scale_absY, prior_y, 0);

    Hori_1 = np.concatenate((grayscale, grad_x), axis=1);

    Hori_2 = np.concatenate((grad_y, result), axis=1);

```

```

cv2_imshow(Hori_1);

cv2_imshow(Hori_2);

# Функция, описывающая Морфологические преобразования.

def morf (cv_rgb_img, cv_gray_img, low_HSV, high_HSV, kernel_1,
kernel_2):

    image_filtered = cv.inRange(cv_rgb_img, np.array(low_HSV),
np.array(high_HSV));

    eroded = cv.morphologyEx(image_filtered, cv.MORPH_ERODE,
np.ones((kernel_1),np.uint8));

    dilated = cv.morphologyEx(eroded, cv.MORPH_DILATE,
np.ones((kernel_2),np.uint8));

    fig, ax = plt.subplots(2, 2, figsize=(20, 20));

    ax[0, 0].imshow(image);

    ax[0, 1].imshow(cv.addWeighted(cv_gray_img, 0.5, image_filtered, 1., 0.));

    ax[1, 0].imshow(cv.addWeighted(cv_gray_img, 0.5, eroded, 1.0, 0.));

    ax[1, 1].imshow(cv.addWeighted(cv_gray_img, 0.5, dilated, 1.0, 0.));

```