

Промежуточный отчет о выполнении проекта РФФИ №20-08-01056 А «Разработка подхода к автоматизированному мониторингу ЛЭП при помощи БЛА, включающего планирование движения БЛА и определение состояния элементов ЛЭП на основе анализа изображений в различных спектрах» за 2020 г.

Аннотация

В 2020 г. в ходе работ по проекту были проанализированы методы планирования пути беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для получения аэроснимков и последующего обнаружения повреждений элементов воздушных линий электропередач (ЛЭП). В частности, рассмотрена классификация методов планирования маршрута летательного аппарата: на основе построения графов, клеточной декомпозиции и интеллектуальных технологий, а также методы потенциальных полей. По результатам обзора, наиболее предпочтительным решением данной задачи является совместное использование методов машинного обучения и методов быстрого перестроения пути, например, алгоритмом D*. Такое решение не требует знания карты местности, может быть использовано в динамической среде окружения, а также позволит частично решить задачу детектирования компонентов воздушных линий.

В ходе выполнения анализа характеристик и параметров ЛЭП были обозначены факторы, оказывающие непосредственное влияние на проектирование, эксплуатацию и их надежность. Приведены систематизированные данные о высоковольтных ЛЭП единой энергетической системы России (ЕЭС РФ), содержащие характеристику пропускной способности и регламентированной длины пролета в зависимости от класса напряжения. Структурирован набор контролируемых характеристик ЛЭП, на основе которого возможно проводить оценку состояния ее элементов. Рассмотрены существующие типы опор ЛЭП и изоляторов, обозначены основные параметры, характеризующие техническое состояние поддерживающих провода конструкций. Проанализированы виды расположения проводов на опорах и обозначены преимущества использования грозозащитных тросов. Приведена сравнительная характеристика композитных, стальных, железобетонных и

деревянных опор, а также их классификация по функциональному исполнению (промежуточные, угловые, концевые, анкерные, ответвительные, повышенные и транспозиционные). Выполнен детальный анализ вариантов конструктивного исполнения проводов ЛЭП, в том числе самонесущих изолированных проводов (СИП). Приведено подробное сравнение материалов, из которых изготовлены провода и опоры ЛЭП, обозначены их достоинства и недостатки. Проанализированы современные российские и зарубежные исследования в области: эксплуатации электроэнергетических систем; проведения оценки потерь мощности на корону; влияния температуры и стрелы провеса линии на ее техническое состояние; исследования режима работы распределительной сети, изменяющимся в реальном времени в зависимости от коммутационных действий, в результате которых меняют соединения между фидерами, шинами, нагрузками и источниками питания. Актуальными являются проблемно-ориентированные изыскания в области: мониторинга систем распределения электроэнергии; влияния грозовых разрядов на линии электропередачи; неэффективного резервирования, получения неточных параметров в результате проведения псевдоизмерений, ветровых нагрузок и гололедообразования, которые оказывают негативное воздействие на техническое состояние ЛЭП и опор. Приведена структура систем мониторинга ЛЭП, которая содержит данные о применяющихся для этой цели базовых компонентов и типов датчиков. Описаны параметры ЛЭП, по которым проводится мониторинг технического состояния ее функциональных узлов. Структурированы виды операций комплексной диагностики ЛЭП и раскрыто их содержание.

Представлен обзор современных методов мониторинга состояния элементов конструкции линий электропередач посредством обработки изображений в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах. Рассмотрены методы распознавания основных элементов конструкции ЛЭП и детектирования наиболее характерных для них дефектов, основанные на определении отличительных признаков (цвет, форма, границы, градиент яркости и текстура). В качестве основных элементов ЛЭП были рассмотрены изоляторы, провода, опоры и арматура. Анализ эффективности рассмотренных методов и подходов проводился на основе сравнения представленных в источниках метрик: значений доли верных распознаваний (accuracy), точности (precision) и полноты (recall). Особый интерес представляет анализ методов мониторинга элементов конструкции

ЛЭП на основе изображений, полученных не только в видимом, но также в ультрафиолетовом и инфракрасном спектрах. Методы, предназначенные для обработки изображений в видимом спектре, основываются на алгоритмах глубокого и машинного обучения. Ультрафиолетовый спектр (УФ) используется для выявления коронных разрядов на проводах и изоляторах. Съемка в инфракрасном спектре (ИК) позволяет выявить дефекты элементов ЛЭП, которые не могут быть детектированы на изображениях в видимом спектре, например, горячие точки (hotspot). В результате проведенного анализа были рассмотрены методы детектирования дефектов ЛЭП. Методы с наибольшей эффективностью для видимого спектра: GVN, HOG+SVM, SSD, Grab cut, cascading CNN, LBP-HF+SVM, DMNN, VGG-19, LBP+ULBP, YOLO v3, DELM+LRF, SVM, Faster R-CNN, CNN, стереозрение+PLAMEC. Методом детектирования с наибольшей эффективностью для ИК-спектра является Оцу + пороговая обработка, а для УФ-спектра – метод SVR.

Заявленные цели проекта на период, на который предоставлен грант

На первый год выполнения проекта были запланированы следующие цели:

1. Провести обзор современных методов планирования движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);
2. Провести анализ характеристик и параметров воздушных линий электропередачи (ЛЭП);
3. Провести обзор методов и подходов детектирования дефектов элементов ЛЭП на изображениях в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах;
4. Подготовить серию статей для публикации в высокорейтинговых российских и зарубежных изданиях, индексируемых в РИНЦ и SCOPUS/WoS.

Полученные за период, на который предоставлен грант, результаты с описанием методов и подходов, использованных при реализации проекта

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП), являются одними из самых ненадежных элементов современной энергетической системы. Основные причины повреждения ЛЭП подразделяются на природные

(произошедшие в результате воздействия ветра, гололеда, перепадов температур, грозových явления) и технологические (причинами которых стали возникновения короткого замыкания (КЗ), внутренних перенапряжений, нарушение правил технической эксплуатации и т.д.).

Существенное количество аварийных отключений ЛЭП (до 10% в России) обусловлено возникновением гололедных явлений. При авариях такого рода возникает массовое провисание проводов, которое в последствие приводит к их обрывам, разрушению арматуры, поломкам воздушных опор. В масштабах страны подобные аварии могут приносить значительные финансовые потери.

Образование гололедной изморози на проводах является одним из основных факторов, обуславливающих повышенные внешние механические нагрузки, которые оказывают воздействие, в том числе и на технико-экономические показатели. Например, в зависимости от того, какой толщины могут достигать стенки гололедной изморози в определенном регионе, будет меняться конечная стоимость строительства и сложность эксплуатации ЛЭП. Данные показатели в зависимости от местности могут отличаться в несколько раз. При этом недостаточный учет возможных изменений механической нагрузки может привести к критическому снижению надежности ЛЭП, что еще сильнее скажется на стоимости эксплуатации и увеличению затрат на ремонтно-восстановительные работы.

С данными проблемами сталкивается множество регионов и стран, где географические и климатические условия располагают к возможным выпадениям осадков, особенно в виде снежных отложений или изморози. Значительное число аварий, произошедших за последние годы в умеренно-холодной местности на территории Российской Федерации (РФ), возникли в результате воздействия интенсивных гололедно-ветровых нагрузок и ледяных дождей, в большинстве случаев приводивших к обрыву ЛЭП. На ЛЭП, которые являются объектом исследования, согласно [1], должны проводиться мероприятия по плавке гололеда и мониторинг на основе современных технологий, поскольку согласно статистике в высоковольтных распределительных электрических сетях Ленинградской области перерыв в электроснабжении по причине гололедообразования составляет 30%. Поэтому, безусловно, прогнозирование и предотвращение возможных аварий в электрических распределительных сетях является актуальной научно-технической задачей.

В настоящее время около 60% существующих распределительных линий в значительной мере изношены [2]. Наблюдаемое ухудшение состояния линий электропередачи (ЛЭП) влечет за собой снижение их пропускной способности и, как следствие, снижение эффективности процессов производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии (ЭЭ), ускоренное старение изоляции электрооборудования,

ложное срабатывание устройств релейной защиты и автоматики и пр. Сегодня 90% ЛЭП не оборудованы системами мониторинга, поэтому контроль за состоянием проводящих линий ведется визуальным способом оперативно-выездными бригадами сетевых компаний, а передача полученной ориентировочной информации осуществляется по имеющимся телекоммуникационным каналам. Такая организация работы по контролю ЛЭП является низкоэффективной, что объясняет необходимость разработки современных автоматизированных систем мониторинга. Кроме того, повсеместное внедрение подобных систем позволило бы контролировать уровень тока и температуру проводов по всей трассе, что создает предпосылки к созданию «умной» электрической сети с динамическими параметрами [3,4].

На сегодня наиболее перспективным направлением в области инспектирования и мониторинга состояния распределительных сетей является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [5]. При мониторинге ЛЭП при помощи БПЛА могут быть использованы следующие устройства: камеры различных спектров видимости, лидары, магнитометры, датчики обнаружения химикатов и газов и пр. Наиболее популярным подходом к дистанционному инспектированию ЛЭП при помощи БПЛА является техническое зрение на основе камер высокого разрешения [6,7] и оптических датчиков, которые позволяют получить изображения в видимом спектре и затем применить к ним специализированные методы обработки. Кроме того, для определения температурных режимов работы элементов конструкции ЛЭП и детектирования коронных разрядов используются инфракрасная термография (ИК) и ультрафиолетовая съемка (УФ) соответственно [8].

Для разработки автоматизированного подхода к мониторингу ЛЭП при помощи БПЛА на первом этапе выполнения проекта (2020 г.) были выполнены следующие задачи: выполнен обзор современных методов планирования оптимальных траекторий передвижения БПЛА, проведен анализ характеристик ЛЭП для определения контролируемых параметров мониторинга. Также был проведен обзор различных алгоритмов обработки изображений и методов на базе машинного обучения для обеспечения автоматизированного детектирования дефектов элементов ЛЭП на основе данных камер ИК, УФ и видимого спектров.

1. Обзор существующих методов планирования траектории движения БПЛА

Наблюдаемое ухудшение состояния линий электропередачи (ЛЭП) влечет за собой снижение их пропускной способности и, как следствие, финансовые убытки. Снижение качества электроэнергии (ЭЭ) приводит к таким негативным последствиям, как снижение эффективности процессов производства, передачи, распределения и потребления ЭЭ, ускоренное

старение изоляции электрооборудования, ложное срабатывание устройств релейной защиты и автоматики и пр. Одна из основных задач в мониторинге ЛЭП с помощью БПЛА состоит в планировании пути таким образом, чтобы БПЛА смог обнаружить и сфотографировать повреждения ЛЭП при минимальном энергопотреблении от бортового аккумулятора. Различают следующие методы построения маршрута движения БПЛА: на основе графов, клеточной декомпозиции и интеллектуальных технологий, а также методы потенциальных полей [9] (рис. 1). Рассмотрим подробнее каждую из категорий.

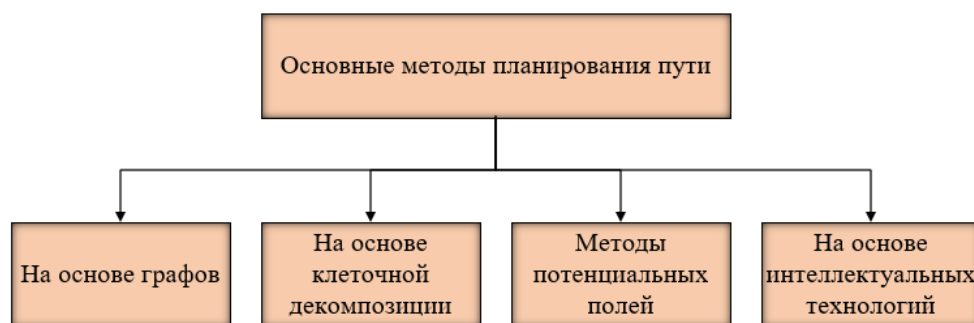


Рисунок 1 – Основные методы планирования пути

Методы на основе графов. Методы на основе графов предполагают представление состояний БПЛА узлами графа, которые может быть выражены координатами, углами ориентации, скоростями или ускорениями. Переходы между состояниями характеризуются функцией затрат, которая позволяет определить путь, имеющий минимальную общую стоимость достижения целевого состояния. Традиционно задача планирования траектории БПЛА рассматривается как задача поиска пути на графе (при этом сам БПЛА обычно считается материальной точкой) в конфигурационном пространстве. Вершинам графа соответствуют различные координаты БПЛА в пространстве, ребрам – элементарные траектории, т.е. такие траектории, следование БПЛА по которым считается тривиальной задачей (обычно это отрезки прямых или кривых определенного радиуса). Таким образом, задача планирования траектории сводится к двум подзадачам: построению графа, моделирующего окружающую среду БПЛА, и поиску пути на этом графе. В качестве графовых моделей окружающей среды обычно используются графы регулярной декомпозиции, в англоязычной терминологии – grids [10].

Планирование пути на основе графов включает в себя множество методов. Рассмотрим основные из них: граф видимости, диаграмма Вороного, вероятностная дорожная карта, метод быстро исследующих случайных деревьев. Результатом таких методов является массив путевых (опорных) точек, соединяющих начало и конец пути.

Граф видимости [11] строится при помощи множества n вершин полигонов, которые являются упрощенными моделями препятствий среды,

дополненные начальными и конечными точками маршрутов. Все вершины попарно соединяются линейными отрезками, ребрами графа, если выполняется условие попарной «видимости» вершин, т.е. отсутствия пересечения с препятствиями среды. Данный метод имеет высокую вычислительную сложность $O(n^2 \log n)$, что затрудняет его применение в системах реального времени.

Диаграмма Вороного используется для формирования из рабочей зоны БПЛА графа, ребра которого равноудалены от всех препятствий. Это необходимо для безопасного обхода геометрически сложных препятствий при движении БПЛА. Диаграмма Вороного на плоскости представляет собой такое разбиение плоскости, при котором каждая область этого разбиения образует множество точек, близких к одной из точек исходного множества. Таким образом, границы областей этого разбиения являются равноудаленными от ближайших точек. Обобщенные диаграммы Вороного строятся вокруг препятствий на плоскости (вместо множества точек) и их границы представляют собой место нахождения массива точек, удаленных от этих фигур, которые можно использовать для построения траектории, удаленной от препятствий. Самая простая реализация данного метода обладает высокой вычислительной сложностью $O(n^4)$, где n – общее количество вершин и граней препятствий [12].

Метод вероятностной дорожной карты [13] основан на случайном выборе путевых точек, распределенных с некоторой вероятностью в пространстве. Точки, попавшие на карте на препятствия, отбрасываются. Для построения графа две путевые точки соединяются ребрами, если из одной точки можно попасть в другую по прямолинейному пути, не пересекая препятствия. Построение вероятностной дорожной карты переходит в задачу поиска пути в графе. Выбор путевых точек случайным образом приводит к тому, что построенный путь не оптимален. Такой метод разбивает процесс планирования на фазу анализа среды и на фазу планирования пути. По причине наличия двух фаз метод вероятностной дорожной карты невозможно использовать в планировании маршрутов в режиме реального времени.

Данного недостатка лишен метод быстро исследующих случайных деревьев [14]. При таком методе процесс планирования пути состоит в построении дерева путевых точек, которое постепенно расширяется. На каждой итерации процесса генерации маршрута выбирается случайная опорная точка. После этого осуществляется поиск ближайшей к этой точке вершины дерева. Полученный отрезок проверяется на конфликтность. Построение дерева прекращается в двух случаях: если из последней добавленной точки достижима целевая точка или если количество вершин дерева достигло предельного количества. Данный метод можно использовать в среде с препятствиями невыпуклой формы.

Для повышения эффективности методов на основе могут быть использованы эвристические правила. Например, в [15] такие правила позволяют построить оптимальную траекторию движения БПЛА для нескольких целевых точек в виде меток, объединенных в единую сеть, расположенную на большом расстоянии от стартовой позиции БПЛА. В этом случае траектория должна быть построена в обход препятствий и максимально приближена к данным меткам. Такая задача является NP-сложной (non-deterministic polynomial).

Все методы на основе графов могут быть модифицированы и адаптированы под специфику поставленной задачи планирования траектории движения БПЛА при осуществлении мониторинга ЛЭП. Однако зачастую данные методы используются в тех случаях, когда рабочая область БПЛА представляет собой статичную среду, карта известна полностью, часто их использование в режиме реального времени затруднено в силу высокой вычислительной сложности методов, а также.

Методы на основе клеточной декомпозиции. В основе методов клеточной декомпозиции лежит представление окружающей среды в виде сетки с заданными параметрами. При точной клеточной декомпозиции окружающую среду делят на клетки, используя грани препятствий. При этом важной задачей является выбор формы и размера ячеек. Известны такие методы разложения пространства, как трапециевидная декомпозиция, триангулированное распределение, цилиндрическая декомпозиция и др. [16]. Методы на основе сеточной декомпозиции позволяют свести вычислительно трудные задачи навигации БПЛА в сложном окружении к более простым задачам, для решения которых имеется развитый математический аппарат теории графов, при этом, как правило, представление пространства в виде ячеек сетки позволяет упростить обработку больших объемов данных о среде по сравнению с «чистыми» графовыми методами. Важным этапом методов на основе клеточной декомпозиции, как и на основе графов, является поиск пути в графе, соответствующего оптимальной или субоптимальной искомой траектории БПЛА. Для этого могут использоваться классические (неинформированные) и эвристические (информированные) методы поиска. Информированные методы обычно обеспечивают более эффективный поиск по сравнению с неинформированными методами.

Для поиска оптимального по длине пути в графе используются алгоритмы, основанные на эвристической стратегии поиска, например, алгоритм Дейкстры, алгоритм A*, алгоритм D*, Jump point search (JPS) и множественные их модификации. Зачастую алгоритмы на основе эвристических правил содержат в себе функцию оценки стоимости спланированного пути. Эвристические алгоритмы осуществляют поиск пути в направлении вершин наименьшей стоимости, что делает их более эффективными по сравнению с классическими методами. Так, целевая

функция алгоритма Дейкстры представляет собой эвристическую функцию оценки расстояния от текущей точки до конечной точки. Алгоритм A^* является улучшенной версией алгоритма Дейкстры и помимо функции оценки расстояния содержит функцию стоимости достижения текущей точки из начальной. Усовершенствованной версией алгоритма A^* является алгоритм D^* , который заключается в перестроении сетки и сокращении числа ее ячеек по сравнению с A^* . Данные особенности позволяют использовать D^* в динамической среде окружения. Также алгоритм A^* является основой алгоритма JPS, в котором функция оценки стоимости рассчитывается намного быстрее, чем в A^* за счет особого отсека соседних клеток. JPS использует набор простых эвристических правил для выбора «выгодных» (низких по стоимости) направлений, в которых могут быть использованы длинные прямолинейные и диагональные переходы («прыжки»). В результате на этапе анализа спланированного пути исключается значительное число вершин, не влияющих на стоимость переходов и качество конечного решения, а время поиска пути существенно сокращается. Применение эвристических правил позволяет уменьшить количество посещаемых вершин графа и, как следствие, повысить эффективность алгоритмов поиска пути в графе.

Также на принципе представления среды в виде сетки основаны методы распространения волнового фронта (wavefront propagation method), например, Fast Marching Method (FMM) [17]. FMM основан на расчете времени, за которое фронт волны достигает целевой точки маршрута, двигаясь из начальной точки. При этом задача планирования пути сводится к решению уравнения эйконала, после которого траектория движения БПЛА может быть найдена как кривая наискорейшего спуска при помощи методов спуска. Особенностью метода FMM является отсутствие этапа поиска путей в графе.

Общий недостаток методов на основе клеточной декомпозиции заключается в увеличении трудоемкости методов и алгоритмов при уменьшении шагов сетки, что приводит к трудностям использования данных методов в пространстве большего объема и ограничению возможных направлений построения пути, вызванном структурой примененной сетки.

Методы потенциальных полей. Методы искусственных потенциальных полей были разработаны для навигации роботов при движении в среде с препятствиями в режиме реального времени [18–22]. Данные методы основаны на аналогии движения заряженной частицы в электростатическом поле вдоль линий поля. При этом препятствия представлены отталкивающей силой, а конечная точка пути – притягивающей силой. Потенциальная функция, которая определяется маршрут движения, задается как сумма притягивающих и отталкивающих потенциалов [23]. Методы потенциальных полей эффективно работают и в

двумерном, и в трехмерном пространствах. У классического метода потенциальных полей есть серьезный недостаток – застревание в локальных минимумах. В работе [24] предложен иерархический метод потенциальных полей для решения проблемы недостижимости целевых точек. Авторы добавили некоторую вращающую силу между БПЛА, которая снижает воздействие локальных минимумов на поиск траектории. Несмотря на преимущества данного класса методов (например, простому контролю процесса движения в режиме реального времени), многие из них имеют существенные ограничения. В частности, методы потенциальных полей плохо адаптируются к условиям динамической среды, переназначению целевых координат и заданных точек маршрута, а также некоторую неопределенность при выборе коэффициентов потенциальной функции. Другим немаловажным недостатком методов потенциальных полей является проблема дрожания [25]. Кроме того, методы потенциальных полей практически неприменимы в условиях, где БПЛА требуется преодолеть узкие области между близкорасположенными препятствиями, т.к. накладывающиеся друг на друга поля порождают силы отталкивания ощутимо, существенно искажающие искомую траекторию.

Методы на основе интеллектуальных алгоритмов. Один из важных аспектов при выборе метода планирования пути является способность БПЛА решать задачу планирования пути в реальных условиях динамической окружающей среды без вмешательства человека. Часто в таких ситуациях используют алгоритмы поведения, встречающиеся в живой природе, генетические алгоритмы или алгоритмы, основанные на нейросетевом базисе. Среди биоинспирированных алгоритмов выделяют муравьиный [26], пчелиный [27], светлячковый (Glow-worm Swarm Optimization, GSO), генетические, эволюционные алгоритмы [28] и их комбинации [29]. Так методы основанные на светлячковом алгоритме могут быть использованы для решения задач планирования пути в трехмерной среде с динамическими препятствиями [30]. При этом задача оптимизации заключается в минимизации стоимости затрат энергии БПЛА на достижение целевой точки. Светлячковый алгоритм обеспечивает высокую скорость сходимости и высокую точность по сравнению с другими алгоритмами эвристической оптимизации. Данный метод подходит также для применения в роевой робототехнике, поскольку обладает высокой масштабируемостью. В таком случае каждый объект роя рассчитывает стоимость достижения цели, и рой БПЛА меняет свое направление движения с минимальными затратами энергии.

При планировании траекторий полета БПЛА активно используются нейронные сети. Так в работе [31] представлен метод планирования пути, основанный на нейронной сети TrailNet. Контроллер на базе такой сети обеспечивает стабильный полет вдоль линии в неоднородной среде. С помощью сети TrailNet на бортовом компьютере Jetson TX1 на

изображениях, поступающих с камеры, можно обнаружить линию, вдоль которой должен перемещаться БПЛА. Далее полученные данные с компьютера передаются в полетный контроллер Pixhawk для управления движением БПЛА. Описанный метод планирования пути может быть полезен в системах автоматизированного управления БПЛА для мониторинга местности и следования вдоль линий, например, вдоль трассы ЛЭП.

Искусственная нейронная сеть может использоваться для поиска оптимальных решений по планированию пути для БПЛА. В работе [32] предложен алгоритм на основе нейронной сети для решения задач навигации и позиционирования БПЛА. В этой работе искусственная нейронная сеть принимает входные данные от GPS, системы технического зрения наземного робота и системы технического зрения квадрокоптера и выдает выходные данные в виде точной позиции БПЛА в системе глобальных координат.

Также существуют комбинированные методы планирования пути. Например, в работе [33] представлен метод на основе многопопуляционного генетического алгоритма (multi-population genetic algorithm, MPGA) и графа видимости. Данный метод предназначен для расчета пути БПЛА в сложноструктурированной среде в условиях наличия динамических препятствий. Комбинирование генетического подхода с графом видимости позволило повысить успешность поиска бесколлизийной траектории для БПЛА, однако привело к существенному увеличению времени работы алгоритма [34], что затрудняет применение данного метода в системах реального времени.

Планирование пути БПЛА вблизи ЛЭП также может быть основано на детектировании элементов линии [35]. В этом случае бортовой компьютер рассчитывает дальнейшую траекторию полета на основе данных полученных с камеры и обработанных нейросетью. Для обнаружения провода и опор используется сверточная нейронная сеть Faster R-CNN (Faster Region based Convolutional Neural Network). На изображениях регистрируется ближайшая и следующая за ней опоры, после чего рассчитываются координаты точки рядом со следующей опорой и строится траектория движения. Такой метод обеспечивает полет БПЛА на безопасном расстоянии от токоведущих элементов.

Выявление дефектов элементов ЛЭП предполагает движение БПЛА вдоль проводов на безопасном расстоянии. Для проведения эффективного мониторинга проводящих линий необходимо выполнение требований работы в неизвестном окружении в режиме реального времени, а также движения в присутствии динамических препятствий. При использовании классических методов планирования пути на основе графов, клеточной декомпозиции и искусственных потенциальных полей необходима информация об окружающей среде, в том числе о наличии и расположении

препятствий. Методы на основе графов не пригодны для реализации в системах реального времени по причине высокой временной сложности. Кроме того, данные методы не универсальны, что приводит к необходимости их модификации при изменении начальных условий и ограничений задачи. Движение БПЛА в случае использования методов клеточной декомпозиции ограничено структурой сетки, что создает дополнительные трудности при планировании пути в пространстве большого объема. Методы потенциальных полей не позволяют планировать маршруты в узких пространствах и могут привести к колебательному движению в полосообразной области, например, при движении вдоль узкой улицы или трассы ЛЭП. Метод на основе искусственной нейронной сети Faster R-CNN не имеет таких недостатков [35]. Данный метод не требует знание карты местности, так как использует в качестве входных данных изображения с бортовой камеры, что делает его автономным. Единоразово обученная модель может использоваться для планирования пути в различных условиях в режиме реального времени. Также использование Faster R-CNN может частично решить задачу обнаружения дефектов, поскольку обеспечивает детектирование провода, опоры и других элементов ЛЭП.

Однако применение интеллектуальных методов, таких как нейронные сети, влечет за собой усложнение конструкции и оснащение летательного аппарата дорогостоящим оборудованием. Faster R-CNN не гарантирует быстрого реагирования БПЛА на изменение среды или появление динамических препятствий.

Комбинация методов машинного обучения с методами быстрого перестроения пути, например, с алгоритмом D^* , является наиболее перспективным подходом для дальнейших исследований, который может позволить разработать полностью автоматизированную систему мониторинга ЛЭП на основе БПЛА с учетом динамичности окружения.

2. Анализ характеристик и параметров воздушных линий электропередачи

В рамках проекта также был проведен анализ характеристик и параметров воздушных линий электропередачи и выявлен набор контролируемых характеристик и параметров воздушных линий электропередачи, позволяющих проводить оценку состояния ее элементов.

Согласно общепринятым определениям ЛЭП – это устройства, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии по проводам, находящимся на открытом воздухе и прикрепленным с помощью траверс (кронштейнов), изоляторов и линейной арматуры к опорам или другим сооружениям (мостам, путепроводам).

Из-за большой протяженности, прохождению по открытой местности, подверженности уже описанным атмосферным, техногенным и антропогенным воздействиям, ЛЭП являются одними из наименее надежных элементов электроэнергетической системы. Постоянно существующая возможность возникновения опасных воздействий различного рода на элементы ЛЭП требует повышенного внимания и учета всех возможных условий эксплуатации, характерных для заданной местности, а также класса напряжения и протяженности ЛЭП.

В России используется две шкалы номинальных напряжений для воздушных линий районного и системообразующего значения: 110, 150, 330, 750 кВ и 110, 220, 500, 1150 кВ, каждая из этих шкал имеет свои регионы применения [1]. Наибольшее распространение на территории РФ получили электрические сети напряжением 6, 10, 35, 110 кВ. В настоящее время для крупных городов, таких как Санкт-Петербург, также характерен переход от ранее используемой сети ЛЭП напряжением 6 кВ к сетям с напряжением 10 кВ. Электрические сети более высоких классов напряжения применяются как распределительные. Классы напряжений могут варьироваться от 110 кВ до 330 кВ и в некоторых случаях до 500 кВ. Сети 110 и 220 кВ выполняются, в основном, как распределительные, но в ряде энергосистем и как системообразующие. Более 15% ЛЭП 110 кВ и 30 % ЛЭП 220 кВ (по протяженности) выполнены двухцепными. Сети 330 кВ получили широкое распространение в энергосистемах Юга и Северо-Запада, на долю которых приходится около 80% общей протяженности линий этого напряжения [36]. Сети напряжением 500 кВ являются основной цепью Единой энергетической системы РФ. Систематизированные данные по ЛЭП классов напряжения 35–750 кВ приведены в табл. 1 [37].

Таблица 1 – Систематизированные данные ЛЭП напряжением 35–750 кВ

Напряжение линии, кВ	Передаваемая мощность на одну цепь, МВт	Длина на ЛЭП, км	Средняя длина ЛЭП между соседними подстанциями, км	Длина пролета, м
35	8-15	10- 50	10	135- 200
110- 150	25-50	50- 150	25	170- 250
220	100-200	150- 250	100	250- 350
330	300-400	200- 300	130	300- 400

500	700-900	800- 1200	280	350- 450
750	1800-2200	120 0-2000	300	350- 540

При проектировании ЛЭП должны учитываться такие факторы, как: расположение, размеры, класс напряжения, источники нагрузки и конечная функция подстанции. Проектирование и исполнение конструкций конкретных ЛЭП выполняется в соответствии с климатическими, географическими и прочими условиями в районах прохождения линии (учитывается ветровое давление, средняя толщина стенок гололедной изморози, сезонная грозовая активность, интенсивность пляски проводов и т.д.). Обязателен учет и проектирование грозозащитных тросов для ЛЭП на металлических и железобетонных опорах. Выделим факторы, оказывающие непосредственное влияние на проектирование, эксплуатацию и надежность ЛЭП.

1. Погода. По мере роста зависимости от использования электроэнергии становится все более важным, чтобы существующие подстанции выдерживали даже более экстремальные погодные условия, чем установленных при их проектировании. Должны учитываться: температура, ветер, лед, дождь, снег, электрические бури и влажность.

2. Звуковой шум. Источниками звукового шума на подстанции являются трансформаторы, регуляторы напряжения, автоматические выключатели и другие источники прерывистого шума. Среди всего электрооборудования трансформаторы имеют наибольший потенциал для создания нежелательного шума. При проектировании новых объектов и эксплуатации существующих необходимо учитывать справочные документы и правила по звуковому шуму.

3. Коронные эффекты на ЛЭП. Эффект «короны» — это эффект свечения на проводах, возникающий в результате неполного пробоя диэлектрика, вызывающий шипящий звук. Коронный шум, возникающий при напряжении 220 кВ и ниже, редко бывает существенным. Однако, он может использоваться в качестве дополнительного фактора для поиска повреждений при эксплуатации и обследовании ЛЭП. Коронный шум обычно поддерживается на приемлемом уровне, если соблюдаются рекомендации по минимизации электрических эффектов. Например, при проектировании систем напряжением 330 кВ обычно требуются соединители и фитинги сверхвысокого напряжения (СВН) или защитные экраны от коронного разряда.

4. Общественная безопасность. Подстанции и ЛЭП должны быть безопасными для людей, которые могут оказаться рядом. Основным средством обеспечения общественной безопасности на подстанциях

является установка барьеров и ограждений, например, металлического забора. Если ограничения местности по законодательству данной территории не являются более строгими, то ограждение должно соответствовать минимальным требованиям, указанным в нормативных документах по безопасному расстоянию электроустановок от общественных мест. Металлические заборы и ограждения, также, как, и основания опор, должны быть правильно заземлены и грозозащищены. Дополнительные средства защиты населения обеспечиваются за счет надлежащего проектирования всех элементов конструкции и добавления периферийного участка в пределах трассы. Защита, уменьшающая возможные разницы потенциалов, исследуется и проектируется отдельно. Соответствующие предупреждающие знаки должны быть размещены на ограждении периферии. Информация о предупреждающих знаках может быть найдена в таких документах, как ГОСТ Р 54906-2012 «Системы безопасности комплексные. Экологически ориентированное проектирование. Общие технические требования», а также «IEEE Знаки экологической и производственной безопасности» [38] и т.д.

5. Внешний вид. Внешний вид становится все более важным для технологической сферы. В некоторых областях техники правила зонирования и предложения технических решений улучшения общественных пространств часто подразумевают наличие конкурсного отбора, где скромный дизайн и другие меры по улучшению внешнего вида могут стать решающими во время конкурсного рассмотрения проекта. Отсутствие такого прямого влияния на пересеченной местности не должно быть причиной отказа от рассмотрения новых методов инженерного дизайна при проектировании. Силуэт опоры можно сделать менее заметным, уменьшив его размеры за счет использования массивных структурных секций. К тому же конструкции с более низким профилем для высоковольтного оборудования подстанции могут быть экономически эффективными с точки зрения проектирования и уменьшения габаритов. Рассматривая варианты большей экономической эффективности, следует отметить возможность совпадения направлений линий электропередач и каналов технологической связи. В этом случае не возникают затраты на прокладку и эксплуатацию отдельных линий связи (как правило, это каналы технологической высокочастотной (ВЧ) дальней связи), однако данный фактор требует дополнительного внимания при эксплуатации и техническом обслуживании.

Рассмотрим более подробно устройство опоры ЛЭП. На рис. 2 представлен фрагмент ЛЭП. Расстояние l между двумя соседними опорами называют пролетом. Расстояние f_{Π} по вертикали между прямой линией, соединяющей точки подвеса провода, и низшей точкой его провисания называется стрелой провеса провода. Расстояние от низшей точки провисания провода до поверхности земли называется габаритом

воздушной линии h_r . В верхней части опор закрепляется грозозащитный трос. Как правило, механическое напряжение не должно превышать 8900 ньютонов (приблизительно 900 килограмм-сил) на провод для небольших распределительных сетей. Однако выравнивание входящей линии передачи, размер провода и перепады высот могут увеличить необходимое натяжение.

Величина габарита линии h_r регламентируется согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) в зависимости от напряжения ЛЭП и вида местности (населенная, ненаселенная, труднодоступная), также, как и длины гирлянд изоляторов λ и расстояние между фазными проводами. Расстояние между точками подвеса верхнего провода и троса $h_{п-т}$ регламентируется ПУЭ исходя из требований к надежности и защиты проводов от прямого попадания удара молнии.

Из всех компонентов, входящих в систему транспортировки электрической энергии, наиболее важными являются провода. Провода – это пути передачи электрической энергии, их основные отличия заключаются в разных вариантах исполнения и сплава. Для обеспечения экономичной и надежной электроэнергии необходимы проводниковые материалы, обладающие высокой электрической проводимостью (низким сопротивлением) и высокой механической прочностью. В конструктивных элементах систем электроснабжения в качестве таких материалов используются медь, алюминий, сплавы на их основе, сталь [36].

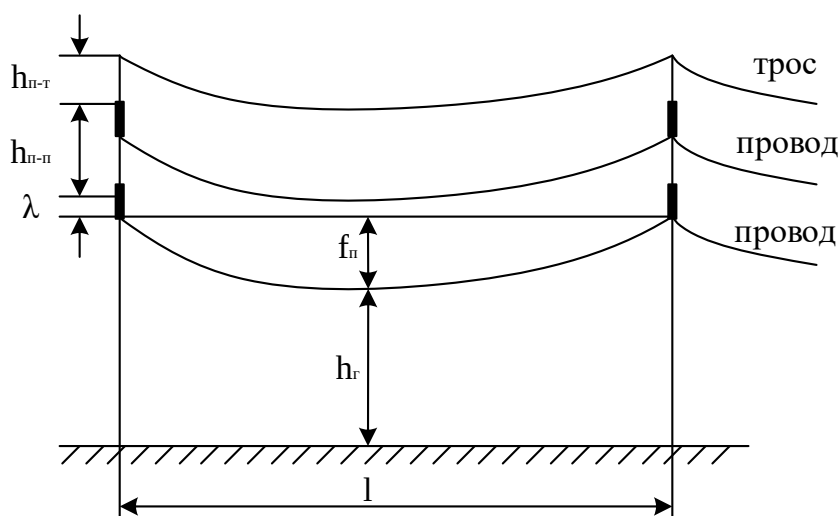


Рисунок 2 – Фрагмент ЛЭП

Наиболее распространенным материалом является медь, однако это достаточно дорогой металл. Медь обладает низким удельным сопротивлением (активное сопротивление $\rho = 0,018 \text{ Ом мм}^2/\text{м}$) и достаточно прочна на разрыв (360 МПа). Как правило, медь используется в качестве материала для обмоток трансформаторов и для кабелей относительно низкого напряжения 10–0,4 кВ.

Алюминий – основной конкурентный металл для меди, обладает более высоким удельным сопротивлением (в 1,6 раза больше, чем у меди) и предельном сопротивлении на разрыв до 2,5 раз меньше. Большая распространенность алюминия в природе и меньшая, чем у меди, стоимость обусловили его широкое применение для проводов ЛЭП.

Следует также отметить частое использование стальных сплавов, которые обладают высокой механической прочностью. Удельное активное сопротивление стали $\rho = 0,13 \text{ Ом мм}^2/\text{м}$, а предельное сопротивление на разрыв – 540 МПа. Зачастую при проектировании и исполнении систем электроснабжения сталь используется для увеличения механической прочности алюминиевых проводов, изготовления опор и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи.

Тип провода выбирается в зависимости от напряжения линии. Основные переменные и факторы, которые следует учитывать при работе с проводниками следующие:

- Тип проводника;
- Размер проводника;
- Токовая нагрузка проводника;
- Теплостойкость проводника;
- Натяжение проводника;
- Учет коррозионной атмосферы;
- Радиошум;
- Учет движения проводника;
- Экономические соображения.

Нормативная база регулирующих документов для выбора сечения проводов ЛЭП не обновлялась с восьмидесятых годов прошлого века. Основным нормативный документ в этом вопросе – ГОСТ 839-80 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)» [39]. Нормативные документы такого рода, как правило, содержат рекомендации по шкале сечения в зависимости от напряжения линии и данные по маркировке в зависимости от используемых материалов.

По конструктивному выполнению провода ЛЭП выполняют в виде однопроволочных и многопроволочных, из одного металла (монометаллические); многопроволочные из двух металлов; самонесущие изолированные. Однопроволочные провода, как правило, имеют небольшое поперечное сечение жилы и используются для ЛЭП напряжением до 1 кВ (рис. 3, а).

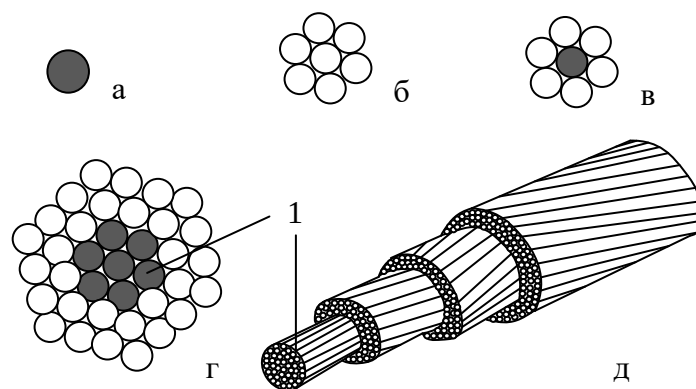


Рисунок 3 – Конструкция неизолированных проводов ЛЭП

Многопроволочные монометаллические провода выполняются сечением более 10 мм^2 . Эти провода изготавливаются свитыми из отдельных проволок. Вокруг центральной проволоки выполняется повив (ряд) из шести проволок такого же диаметра (рис. 3, б). Каждый последующий повив имеет на шесть проволок больше, чем предыдущий. Скрутку соседних повивов выполняют в разные стороны для предотвращения раскручивания проволок и придания проводу более круглой формы [37]. Многопроволочные провода по сравнению с однопроволочными более гибкие, удобные для монтажа и надежные в эксплуатации.

Для большей механической прочности многопроволочные провода изготавливают со стальным сердечником 1 (рис. 3, в, г, д). Сердечник выполняется из стальной оцинкованной проволоки и может быть однопроволочным (рис. 3, в) и многопроволочным (рис. 3, г). Общий вид сталеалюминиевого провода большого сечения с многопроволочным стальным сердечником показан на рис. 3, д [37].

Сталеалюминевые провода широко применяются для ЛЭП напряжением выше 1 кВ. Эти провода выпускаются различных конструкций, отличающихся соотношением сечений алюминиевой и стальной частей. Для обычных сталеалюминевых проводов это соотношение приблизительно равно шести, для проводов облегченной конструкции – восьми, для проводов усиленной конструкции – четырем. При выборе того или иного сталеалюминиевого провода учитывают внешние механические нагрузки на провод, такие как гололед и ветер [40].

В настоящее время на ЛЭП все чаще применяют изолированные самонесущие и защищенные (покрытые) провода. Самонесущие изолированные провода (СИП), в отличие от неизолированных проводов, обладают изолированным покрытием из сшитого полиэтилена на фазных проводах, а также в зависимости от модификации могут быть оснащены данным покрытием на несущем нейтральном проводе. Кроме этого,

существуют разновидности СИП без несущего провода, где все четыре провода изолированы. Рассмотрим основные разновидности СИП:

- СИП-1 – система с голой несущей нейтралью, состоит из одной несущей нейтрали из алюминиевого сплава без изоляции и трех изолированных алюминиевых жил;
- СИП-2 – главным отличием от СИП-1 является заизолированный нейтральный проводник;
- СИП-3 – это фазный провод, применяется на ЛЭП 10–35 кВ, также имеет полиэтиленовое покрытие;
- СИП-4 и СИП-5 – системы, которые представляют собой две или четыре изолированные жилы из алюминиевого сплава. Сечение и механическая прочность всех жил одинаковы. Единственное отличие систем СИП-4 и СИП-5 заключается в разном сечении жил.

На рис. 4 изображены существующие варианты исполнения самонесущих изолированных проводов. Применение проводов СИП при сооружении воздушных линий, а также воздушных защищенных линий позволяет в значительной мере повысить надежность электроснабжения потребителей и сократить эксплуатационные расходы, что, безусловно, обуславливает экономическую выгоду [40].

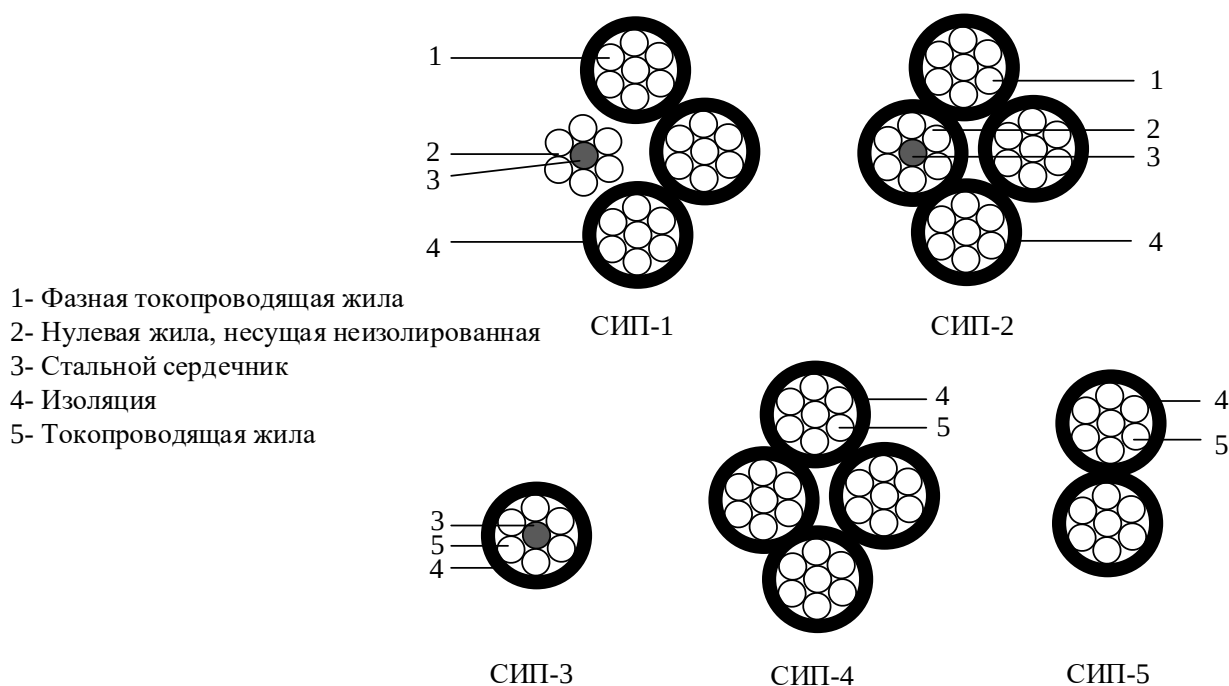


Рисунок 4 – Варианты исполнения самонесущих изолированных проводов.

Основные преимущества проводов типа СИП относительно традиционных:

- уменьшение вероятности возникновения межфазных коротких замыканий;
- возможность уменьшить расстояние от сооружения до ЛЭП;

- по сравнению с неизолированными сталеалюминевыми проводами СИП обладает меньшим индуктивным сопротивлением [40];
- уменьшение налипания мокрого снега – за счет отсутствия электрохимических связей с контактирующими поверхностями и гладких изоляционных материалов мокрый снег не удерживается в канавках между проволоками, как в многопроволочных проводах;
- сравнительное уменьшение реактивного сопротивления.

По количеству проводов, подвешиваемых на одной опоре, различают одноцепные и двухцепные опоры. На одноцепных опорах подвешивается три провода (одна трехфазная цепь), на двухцепных – шесть проводов (две трехфазных цепи). Двухцепная опора по сравнению с двумя одноцепными является более дешевой. Надежность передачи электроэнергии по двухцепной линии несколько ниже, чем по двум одноцепным.

В зависимости от типа исполнения, провода ЛЭП могут быть расположены как на одноцепной линии – треугольником или горизонтально, так и на двухцепной – обратной елкой или шестиугольником (в виде «бочки») [41]. Расположение проводов треугольником (рис. 5, в) применяется на линиях напряжением до 20 кВ включительно, а на линиях более высокого напряжения – с металлическими и железобетонными опорами [42].

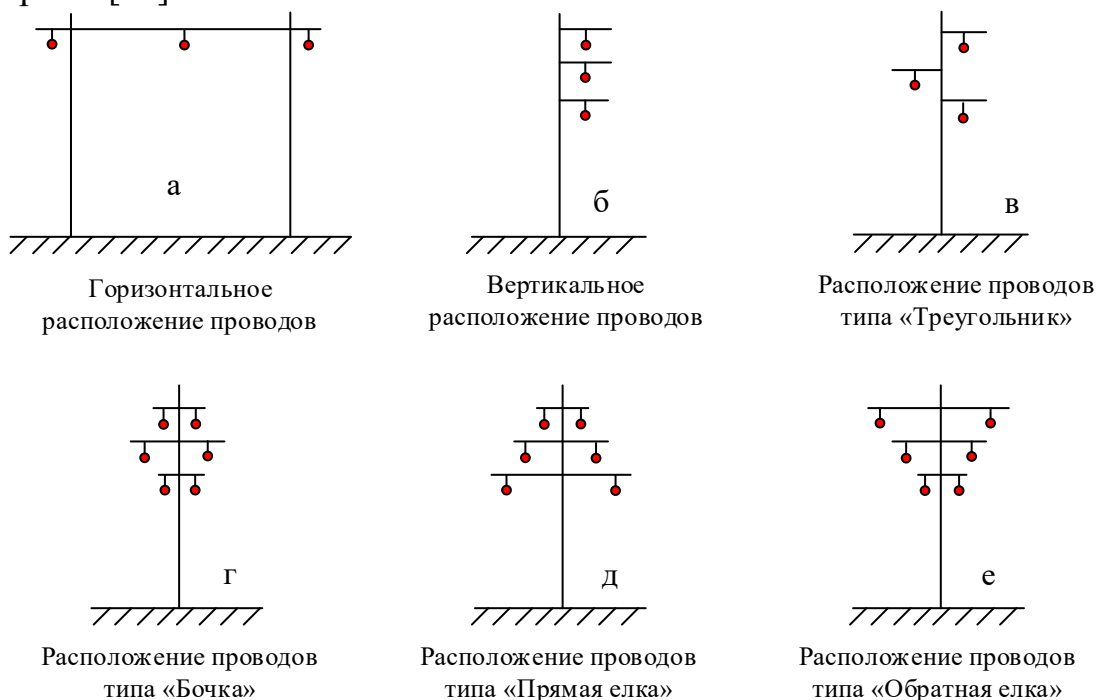


Рисунок 5 – Виды расположения проводов на опорах

Горизонтальное расположение проводов (рис. 5, б) применяется на линиях напряжением 35-220 кВ с деревянными опорами. Такое расположение проводов является наилучшим по условиям эксплуатации, так как позволяет применять более низкие опоры и исключает схлестывание

при сбрасывании гололеда и пляске проводов [43]. На двухцепных линиях провода располагают либо обратной елкой (рис. 5, е), что удобно по условиям монтажа, но увеличивает массу опор и требует подвески двух защитных тросов, либо шестиугольником (рис. 5, г). Последний способ предпочтительнее, он рекомендован к применению на двухцепных линиях напряжением 35–330 кВ.

Грозозащитные тросы являются элементами ЛЭП, аналогичными по своей конструкции многопроволочным монометаллическим проводам. Тросы выполняют из стальных оцинкованных проволок. Номинальные сечения тросов соответствуют шкале номинальных сечений проводов. Минимальное сечение грозозащитного троса 35 мм².

При использовании грозозащитных тросов в качестве высокочастотных каналов связи вместо стального троса используется сталеалюминевый провод с мощным стальным сердечником, сечение которого соизмеримо или больше сечения алюминиевой части [44]. Вблизи траверс должно быть предусмотрено рабочее пространство.

Основное назначение опор – поддержка проводов на требуемой высоте над землей и наземными сооружениями. Опоры состоят из вертикальных стоек, траверс и фундаментов. Для устройства воздушных линий применяют деревянные, железобетонные и металлические опоры.

Деревянные опоры. Простые в изготовлении, транспортировке и эксплуатации, применяются для ЛЭП напряжением до 220 кВ включительно в районах лесоразработок или близких к ним. Основным недостаток таких опор – подверженность древесины гниению. Для увеличения срока службы опоры, древесину просушивают и пропитывают антисептиками, препятствующими развитию процесса гниения.

Вследствие ограниченной строительной длины древесины, опоры выполняют составными (рис. 6, а). Деревянную стойку 1 сочленяют металлическими бандажами 2 с железобетонной приставкой 3. Нижняя часть приставки заглубляется в грунте. Опоры, соответствующие рис. 6, а, применяются на напряжение до 10 кВ включительно. На более высокие напряжения опоры из древесины выполняют П-образными (портальными). Такая опора показана на рис. 6, б.

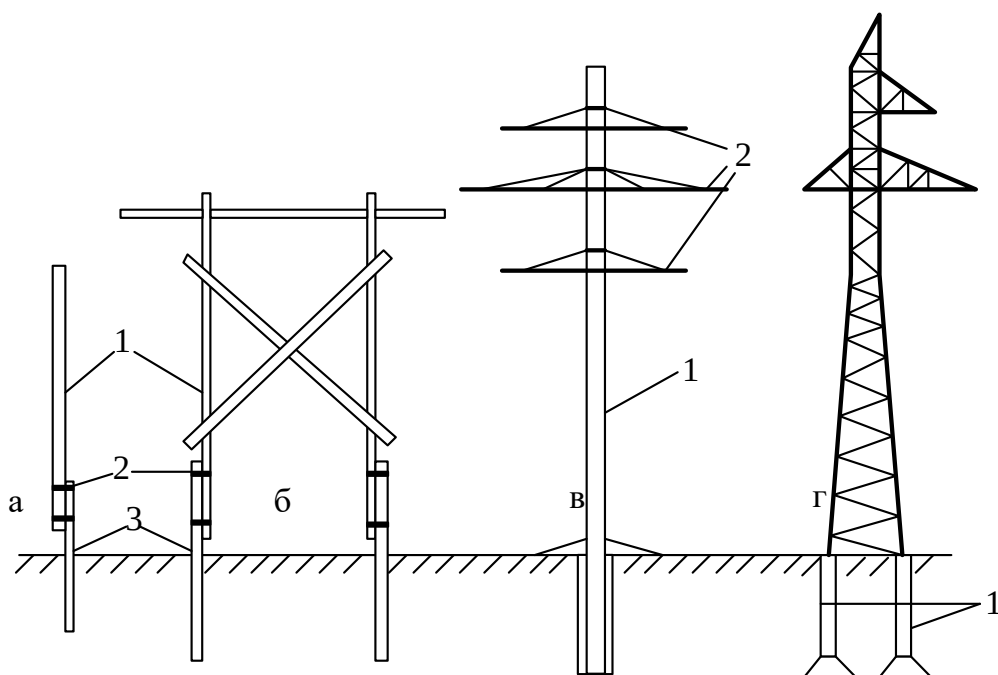


Рисунок 6 – Промежуточные опоры ЛЭП

Железобетонные опоры. Состоят из железобетонной стойки 1 и траверс 2 (рис. 6, в). Стойка представляет собой пустотелую конусную трубу с малым наклоном, образующую конус. Нижняя часть стойки заглубляется в грунт. Траверсы изготавливаются из стального оцинкованного проката. Эти опоры долговечнее опор из древесины, просты в обслуживании и при этом требуют меньше металла, чем стальные опоры. Основные недостатки опор из железобетона: большой вес, затрудняющий транспортировку опор, и относительно малая прочность бетона на изгиб. Для увеличения прочности опор на изгиб при изготовлении железобетонной стойки используется предварительно напряженная (растянутая) стальная арматура.

Стальные опоры. Обладают высокой механической прочностью и большим сроком службы. Эти опоры с помощью сварки и болтовых соединений собираются из отдельных элементов, поэтому имеется возможность создания опор практически любой конструкции (рис. 6, г). В отличие от деревянных и железобетонных опор металлические опоры устанавливаются на железобетонных фундаментах 1. Стальные опоры являются дорогими. Кроме того, сталь подвержена коррозии. Для увеличения срока службы опор их покрывают антикоррозийными составами и окрашивают.

Опоры из алюминиевых сплавов эффективны при сооружении ЛЭП в условиях труднодоступных трасс. Вследствие стойкости алюминия к коррозии, эти опоры не нуждаются в антикоррозийном покрытии. Однако высокая стоимость алюминия существенно ограничивает возможности использования таких опор.

В последние годы для ремонта и строительства воздушных линий предлагаются технические решения на базе опор из композитных материалов. Применение опор из композитного материала положительно влияет на надежность и экономические показатели электроэнергетических объектов. В табл. 2 представлено распределение отказов различных по конструкции опор.

Таблица 2 – Распределение отказов различных видов опор в процентах

Причины отказов	Металлические	Железобетонные	Деревянные
Гололед выше расчетного	33,7	21,7	5
Ветер выше расчетного	13,2	24,8	52,2
Качество проектирования и строительства	9,2	35,5	1,5
Качество эксплуатации	26,9	18	41

В табл. 3 представлена сравнительная характеристика композитных опор по сравнению с традиционными. Композитные опоры имеют ряд преимуществ:

- высокая удельная прочность, в результате этого малая масса;
- сохранение упругости при различных прогибах, в результате этого – устойчивость к аварийным нагрузкам, таким как гололед, ветер, обрыв проводов;
- высокая коррозионная стойкость, стойкость к циклам замораживания и размораживания;
- гибкость конструкции композитных опор позволяет эффективно воспринимать и перераспределять по всей длине линии ударные нагрузки, которые возникают при сбросе гололеда, пляске проводов и коротких замыканиях;
- отсутствие металлических частей, в результате этого – отсутствие необходимости заземления и высокая безопасность.

Очевидно, что повреждаемость опор ЛЭП зависит от материала, который был использован при изготовлении. Однако, выявление уровня и параметров износа может значительно сократить убытки за счет предотвращения аварий в результате своевременного ремонта, зависящего от качества оценки технического состояния, строгого соблюдения норм проектирования и уровня обслуживания. Согласно действующим строительным нормам и правилам (СНиП) и ПУЭ, период до капитального ремонта металлических опор составляет около 30–35 лет.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика опор

Показатели	Композитные	Стальные	Железобетонные	Деревянные
Масса, кг	200-300	500-700	1100-1500	300-400
Стойкость к коррозии	Очень высокая в любых условиях	Средняя, низкая в агрессивных условиях	Средняя	Низкая
Стойкость к циклам замораживания и оттаивания	Высокая	Высокая	Низкая	Средняя
Стойкость к гололедным, ветровым нагрузкам	Упруго деформируются, сохраняют устойчивость	Возможны остаточные деформации; сохраняют устойчивость.	Разрушаются	Переламываются
Возможность ручной транспортировки и монтажа	Имеется	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Возможность работы линии при поврежденных изоляторах	Может работать в штатном режиме длительное время	Не может	Не может	Может удовлетворительно работать

Рассмотрим классификацию опор по функциональному исполнению:

1. Промежуточные, устанавливаемые на прямом участке ЛЭП;
2. Угловые, устанавливаемые на поворотах трассы ЛЭП;
3. Концевые, устанавливаемые в начале и конце ЛЭП;
4. Анкерные конструкции – устанавливают, к примеру, на протяженных прямых участках через каждые 5 км. Если зимой в регионе образуется гололед толщиной более 10 мм, то анкерные опоры ставят через каждые 3 км.

Промежуточные опоры предназначены для поддержки проводов на прямом участке ЛЭП. Провода на опорах такого типа не имеют жесткого соединения, так как крепятся с помощью поддерживающих гирлянд изоляторов. На эти опоры действуют силы тяжести проводов, тросов, гирлянд изоляторов, гололеда, а также ветровые нагрузки. Примеры промежуточных опор приведены на рис. 7.

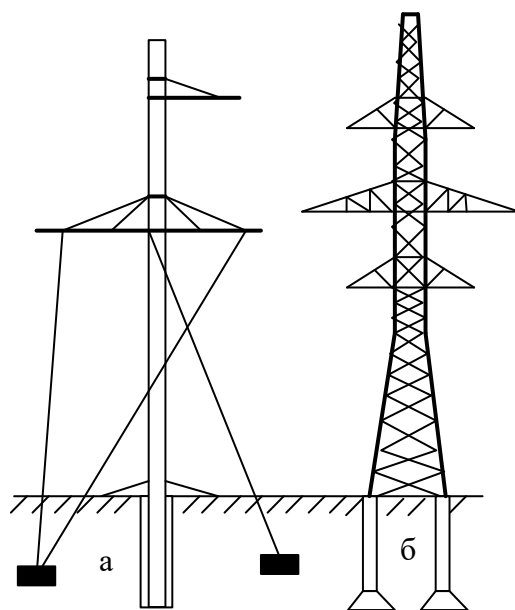


Рисунок 7 – Анкерные угловые опоры ЛЭП

На концевые опоры дополнительно воздействует сила тяжения проводов и тросов, направленная вдоль линии. На угловые опоры дополнительно воздействует сила тяжения проводов и тросов, направленная по биссектрисе угла поворота ЛЭП. Концевые и угловые опоры должны быть достаточно жесткими и не должны отклоняться от вертикального положения при воздействии на них силы тяжения проводов и тросов. Провода с анкерными опорами имеют жесткое соединение, так как крепятся с помощью натяжных гирлянд изоляторов.

Опоры из древесины в двухцепном исполнении не изготавливаются. Опоры ЛЭП напряжением 330 кВ и выше изготавливаются только в одноцепном исполнении с горизонтальным расположением проводов. Такие опоры изготавливаются П-образными (портальными) (рис. 8, а) или V-образными с тросовыми растяжками (рис. 8, б).

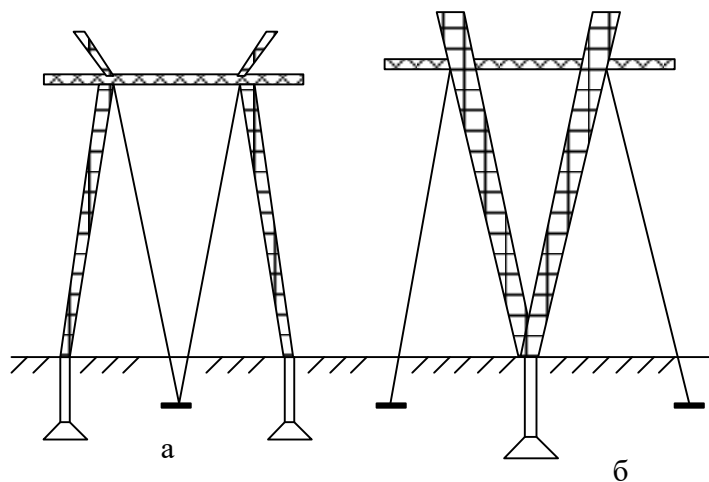


Рисунок 8 – Опоры ЛЭП напряжением 330 кВ и выше

Среди опор ЛЭП отдельно выделяются опоры, имеющие специальную конструкцию. Это ответвительные, повышенные и транспозиционные опоры. Ответвительные опоры предназначены для промежуточного отбора мощности от ВЛ. Повышенные опоры устанавливаются в больших пролетах, например, при переходе через широкие судоходные реки. На транспозиционных опорах осуществляется транспозиция проводов.

Несимметричное расположение проводов на опорах при большой длине ЛЭП приводит к несимметрии напряжений фаз. Симметрирование фаз за счет изменения взаимного расположения проводов на опоре называется транспозицией. Транспозиция предусматривается на ЛЭП напряжением 110 кВ и выше, длиной более 100 км и осуществляется на специальных транспозиционных опорах. Провод каждой фазы проходит каждую треть длины ЛЭП на через разные ветви. Такое перемещение проводов называется полным циклом транспозиции (рис. 9).

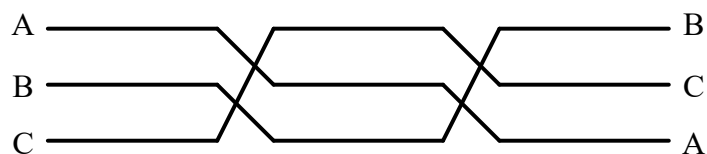


Рисунок 9 – Транспозиция проводов (полный цикл)

При формировании документации в технических характеристиках опоры указываются район по гололеду и ветру, в которых может использоваться опора, диапазон сечений проводов и массогабаритные показатели опоры.

Основные параметры, учитываемые при проектировании ЛЭП

Рассмотрим основные параметры, учитываемые при проектировании ЛЭП.

Длина пролета и зазор до нижнего строения.

Вертикальное разделение в конструкции может зависеть от относительных провисаний проводников передачи и проводников под застройкой. Поскольку длина пролета влияет на относительные прогибы, следует рассчитать результирующий максимальный пролет, ограниченный вертикальным зазором до нижней застройки, чтобы гарантировать, что вертикальное разделение на опоре является правильным для каждого пролета. Формула максимального пролета, ограниченного зазором до нижнего строения, следующая:

$$L_{max} = (R_S) \cdot \sqrt{\frac{A-B}{S_l-S_u}},$$

где:

L_{max} – длина максимального пролета;

R_S – ширина;

A – допустимое расстояние в середине пролета;

B – вертикальное разделение опор;

S_l – прогиб нижнего слоя при той же температуре окружающей среды, что и провода передачи;

S_u – прогиб проводника передачи в условиях, приводящих к наименьшему разделению на недобор (окончательный прогиб).

Рассмотрим условия, при которых применяются горизонтальные зазоры к другим несущим конструкциям, зданиям и прочим сооружениям:

1. Провода в состоянии покоя (без ветрового смещения). Когда провода находятся в состоянии покоя, зазоры применяются для следующих условий температуры: от 15° С до 50° С на конечный прогиб при максимальной рабочей температуре нагрева провода, а также при окончательном прогибе при 0° С, при этом окончательный прогиб должен быть учтен с радиальной толщиной льда (0 мм, 65 мм или 130 мм).

2. Применение зазоров при отклонении проводников в результате воздействия бокового ветра. Зазоры применяются в том случае, когда проводник смещен на 2 м при окончательном прогибе при температуре 15 °С (рис. 10).

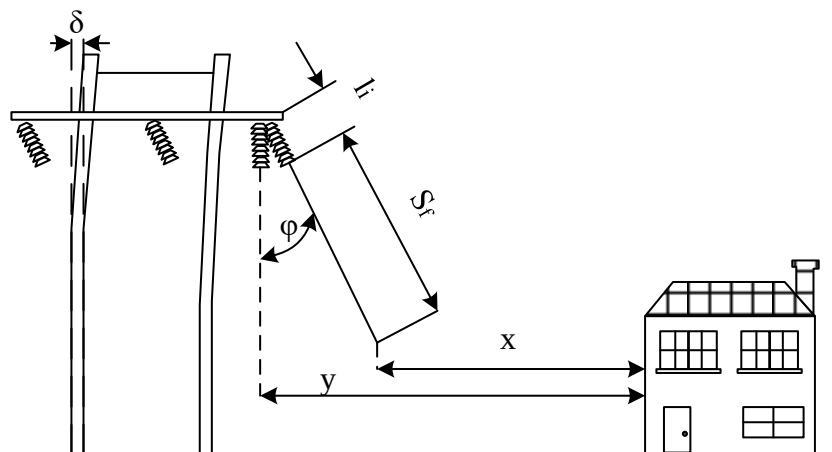


Рисунок 10 – Требования к горизонтальному зазору удаления опоры от зданий:

φ – угол поворота проводника в градусах;

S_f – конечный прогиб проводника при 15-20° С;

x – горизонтальный зазор, необходимый для проводников, смещенных ветром на 2 м/м² (при необходимости, включая поправку на высоту);

l_i – длина гирлянды изоляторов ($l_i = 0$ для опорных изоляторов или изоляторов с фиксированной подвеской);

y – общее расстояние по горизонтали от точки подвеса изолятора (точка крепления проводников для опорных изоляторов) к конструкции с неподвижными проводниками;

δ – прогиб конструкции, м/м²

3. Условия при выборе радиальных и горизонтальных зазоров до растительности. При проектировании следует определить и задокументировать зазоры между растительностью и любыми воздушными незаземленными проводниками, принимая во внимание напряжение линии электропередачи, влияние температуры окружающей среды на провисание проводника при максимальной расчетной нагрузке и влияние скорости ветра на раскачивание проводника. В частности, инженер должен установить зазоры, которые должны быть достигнуты во время работ и контролировать набор зазоров для предотвращения перекрытия между растительностью и воздушными незаземленными проводниками. Эти условия должны применяться ко всем линиям электропередачи, работающим на межфазном напряжении 220 кВ и выше, а также к любым линиям с более низким напряжением, обозначенным как ЛЭП с повышенным уровнем контроля [45].

4. Требования к радиальному зазору. Следует также учитывать необходимые требования по расстоянию между отдельными частями опор и растительностью при номинальных электрических рабочих условиях и

параметрах. Минимальные расстояния необходимы для предотвращения пробоя между растительностью и проводниками.

Расстояния варьируются в зависимости от факторов, приведенных на рис. 11. Эти конкретные минимальные зазоры должны быть не меньше установленных в государственных стандартах ГОСТ Р 58087-2018 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электрические сети. Паспорт воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше» [46], ПУЭ глава 2.5, а также международных стандартах типа 516-2003 Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) при проектировании межгосударственных ЛЭП.

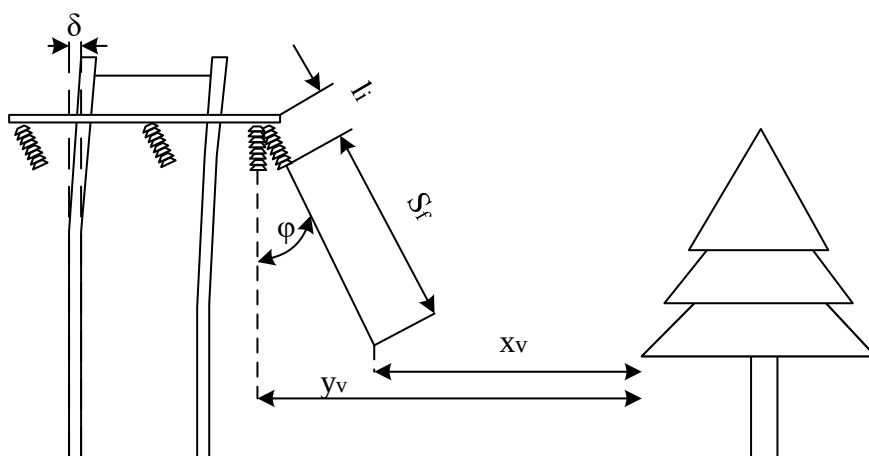


Рисунок 11 – Требования к расстоянию между растительностью и частями ЛЭП:

φ – угол поворота проводника в градусах при номинальных условиях эксплуатации;

S_f – конечный прогиб проводника при номинальных условиях эксплуатации;

x_v – радиальный зазор (при необходимости учитывается поправка на высоту);

l_i – длина гирлянды изоляторов ($l_i = 0$ для опорных изоляторов или изоляторов с фиксированной подвеской);

y – горизонтальный просвет во время работ по управлению растительностью;

δ – прогиб конструкции при всех номинальных рабочих условиях.

5. Общий горизонтальный зазор до точки подвешивания изолятора и определение ширины полосы отвода. При определении горизонтальных зазоров часто исходят из того, что гирлянда изоляторов имеет такой же угол поворота, как и проводник. Это предположение следует делать только в определенных случаях, поскольку в силу разного геометрического исполнения эти углы могут влиять на расчеты при

проектировании. Для линий электропередач полоса отвода обеспечивает среду, позволяющую эксплуатировать и обслуживать линию безопасно и надежно. Определение ширины полосы отвода – это задача, которая требует учета множества оценочных, технических и экономических факторов. Угол поворота проводника (φ) под действием ветра можно определить по формуле:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{d_c \cdot F}{12 \cdot w_c} \right),$$

где:

d_c – диаметр проводника мм²;

w_c – вес проводника в кг/м;

F – сила ветра.

Ширина полосы отвода может быть рассчитана с помощью метода, описанного ниже (рис. 12).

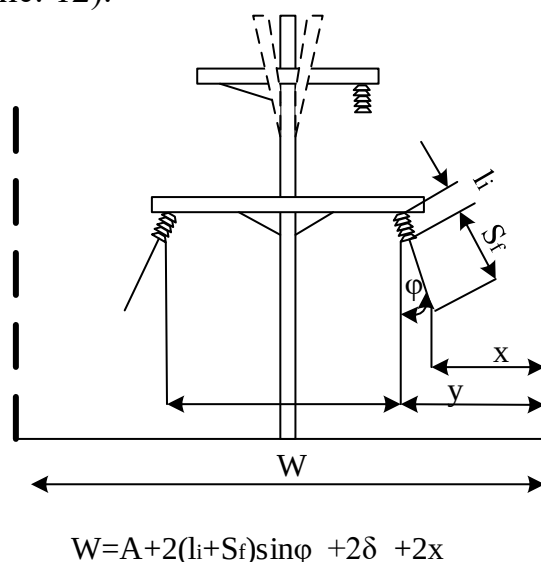


Рисунок 12 – Ширина ряда между опорами:

W – общая требуемая ширина полосы отвода;

A – расстояние между точками подвески гирлянд изоляторов для двух внешних фаз;

x – зазор проводника от ветра;

y – общий горизонтальный зазор от проводника в состоянии покоя

Расчетные значения ширины полосы отвода напрямую связаны с конкретными параметрами конструкции линии. Данный метод обеспечивает достаточную ширину, чтобы удовлетворить требования к свободному пространству для зданий неопределенной высоты и растительностью, расположенной непосредственно на краю полосы отвода.

Изоляторы воздушных линий электропередачи. Изоляторы служат для разделения проводящих поверхностей с помощью

непроводящего (диэлектрического) материала, который обеспечивает высокое сопротивление току. Изоляторы могут быть изготовлены из фарфора, закаленного стекла, стержней из стекловолокна и навесов полимерной или силиконовой конструкции. Изоляторы ЛЭП находятся в открытых климатических условиях и подвержены как электрическим, так и механическим воздействиям. Основными требованиями, предъявляемыми к изоляторам, являются: высокая электрическая и механическая прочность, экономичность и стойкость к воздействию внешней среды.

Основными типами изоляторов, используемых на линиях электропередачи, являются подвесные изоляторы с использованием раструбов или полимерных гирлянд, штифтовые изоляторы, а также вертикальные и горизонтальные стойки. Несколько подвесных колоколов соединены в гирлянду для достижения желаемого уровня изоляции. Полимерная суспензия представляет собой единое целое, уровень изоляции которого во многом определяется ее длиной. Горизонтальные стойки изготавливаются из фарфора или полимера и представляют собой единичные элементы с заданной номинальной мощностью (рис. 13, рис. 14).

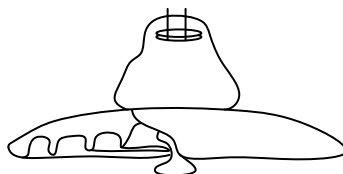


Рисунок 13 – Стандартный фарфоровый изолятор формы и подвеса типа колокол

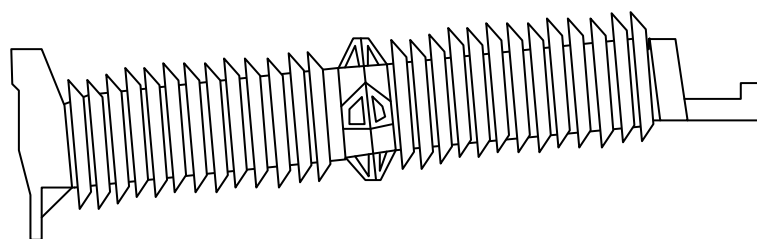


Рисунок 14 – Типовой горизонтальный изолятор-гирлянда

Конструктивно изоляторы ЛЭП изготавливаются двух основных типов: штыревые и подвесные. Штыревые изоляторы применяются для ЛЭП напряжением до 20 кВ и представляют собой монолитное тело специальной формы с канавками для укладки провода и посадочным местом для металлического штыря или крюка. К штыревым изоляторам провода привязываются мягкой проволокой того же металла, что и сам провод.

В соответствии с требованиями отраслевых стандартов для соответствия электрических и механических характеристик ЛЭП применяются фарфоровые изоляторы. Соединительные части фарфоровых изоляторов представляют собой металлические компоненты, залитые в высокопрочный цемент. Уровень прочности фарфоровых изоляторов регламентируется требованиями к испытательной нагрузке каждого изготовленного изделия, которые проштампованы соответствующим образом. Несмотря на то, что фарфоровые изоляторы имеют долгий срок эксплуатации, их струны натяжения тяжелые и могут ломаться.

Существуют также изоляторы из закаленного стекла, которые похожи по конструкции на фарфоровые. Они тяжелые по своей массе, а также часто в черте города могут быть подвержены вандализму.

Некерамические (полимерные) изоляторы обычно состоят из стержня из стекловолокна, который окружен «колокольчиками», изготовленными из полимеров на основе каучука или силикона. Соединительные концы обычно представляют собой сжатые металлические фитинги. Некерамические сборки предлагают различные концевые фитинги, длины и пределы прочности. Они намного легче по весу, чем их фарфоровые и стеклянные аналоги. Полимеры могут быть повреждены коронным напряжением, ультрафиолетовым излучением или физическим повреждением, которое сложно диагностировать без специального оборудования. Износ стержня из стекловолокна может привести к снижению прочности устройства.

Поскольку характеристики низкочастотного перекрытия при сухом перекрытии можно легко и точно проверить, эти параметры обычно являются наиболее распространенными значениями перекрытия, на которые ссылаются при сравнении изоляторов. Однако пробой находящегося в эксплуатации изолятора почти никогда не происходит в нормальных условиях сухой эксплуатации, поэтому эти характеристики, вероятно, являются наименее значимыми из электрических характеристик изолятора.

При сравнении различных типов изоляторов (например, опорных и подвесных) такие характеристики, как импульсное и мокрое перекрытие не обязательно следуют той же схеме, что и характеристики низкочастотного перекрытия при сухом перекрытии. По этим причинам понятна необходимость вычисления и проверки таких значений как импульсного и мокрого перекрытия. Для напряжений до 220 кВ наиболее серьезная нагрузка на изоляцию обычно вызывается молнией и наиболее важной характеристикой пробоя является значение импульсного пробоя.

Для ЛЭП напряжением 500 кВ и выше масса изоляторов может достигать двух тонн, что в значительной степени усложняет как монтажные, так и эксплуатационные работы, неизбежно приводит к увеличению нагрузок на опору и, как следствие, ведет к значительному

повышению габаритов. Для ЛЭП сверхвысоких напряжений разрабатываются синтетические полимерные изоляторы, масса которых на порядок меньше массы изоляторов из стекла или фарфора.

Полимерные изоляторы имеют ряд преимуществ перед стеклянными и фарфоровыми. Масса полимерных изоляторов в 10-20 раз меньше массы гирлянд изоляторов для ЛЭП соответствующего класса напряжения. Это позволяет получить существенные преимущества при транспортировке, монтаже и эксплуатации ЛЭП. Полимерные изоляторы обладают большой механической прочностью и не разрушаются при обстреле их дробью и даже пулями. Линейные изоляторы из полимерных материалов практически не пробиваемы при воздействии грозových и коммутационных перенапряжений. Их применение в качестве изолирующих межфазовых распорок позволяет ограничить пляску проводов.

В настоящее время выпускаются два типа полимерных изоляторов по действующему ГОСТ 28856-90 «Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия» [47]. В качестве несущего компонента изолятора применяется однонаправленный стеклопластиковый стержень, состоящий из десятков тысяч тончайших стеклянных волокон, обладающих высокой механической прочностью.

Стеклопластиковый стержень защищен от внешних воздействий защитной оболочкой, стойкой к ультрафиолетовому излучению и химическим воздействиям. Это необходимо в связи с тем, что связующее вещество стеклопластикового стержня не обладает достаточной стойкостью к атмосферным воздействиям. На концах несущего стержня крепятся металлические оконцеватели, которые должны обеспечивать высокую прочность и надежность изолятора. Для этого применяются два способа оконцевания – клиновое и прессуемое заделки. За счет применения оконцевателей с клиновым заделкой длина изолятора может быть несколько сокращена.

Пробой изоляции. Линии электропередачи подвергаются трем типам напряжений, которые могут вызвать пробой изоляции: напряжение промышленной частоты, коммутационные скачки и грозвые скачки. Пробои из-за напряжений промышленной частоты в первую очередь являются проблемой в условиях загрязнения электрической сети, в том числе за счет возрастающей нагрузки нелинейных источников, драйверов мощных светодиодных прожекторов и общей тенденции роста загрязнения электрической сети. Из оставшихся двух причин перекрытий молния является наиболее серьезной для линий напряжением 220 кВ и ниже [48].

Механизм перекрытия молнии состоит в следующем. В момент удара в линию электропередачи молния может поразить либо заземляющую конструкцию, либо фазовый провод. При ударе по фазному проводнику почти наверняка произойдет пробой изоляции. Чтобы свести к минимуму вероятность возникновения пробоя, для перехвата ударов молнии

используется провод заземления. Чтобы снизить вероятность выхода из строя экранирования, угол экранирования (угол, измеренный от вертикали между фазными проводниками) должен составлять 30° или меньше.

В H-образных конструкциях, где используются два воздушных провода заземления, центральная фаза может считаться должным образом экранированной, даже если угол экранирования с ней больше 30° . Для конструкций, высота которых превышает 28 метров, следует использовать углы экранирования менее 30° . В случае необычно сильного воздействия молнии, например, на переходах через реки, может потребоваться еще меньший угол экранирования.

Если молния ударяет о провод заземления, возникает волна бегущего тока, которая вызывает бегущую волну напряжения. Эта волна напряжения обычно будет увеличиваться по величине по мере продвижения по проводу, пока не достигнет структуры, где отражение бегущей волны от земли предотвращает дальнейшее увеличение напряжения (воздушный провод заземления заземлен на каждой конструкции). Если бегущая волна напряжения в конструкции достаточно мощная, произойдет «обратный пробой» через изоляцию от провода заземления конструкции или от воздушного провода заземления к фазовому проводу. Факторами, определяющими произойдет ли обратный пробой, являются: наличие изоляции, сопротивление фундамента (чем выше сопротивление фундамента, тем выше повышение напряжения на конструкции) и длина пролета (рис. 15).

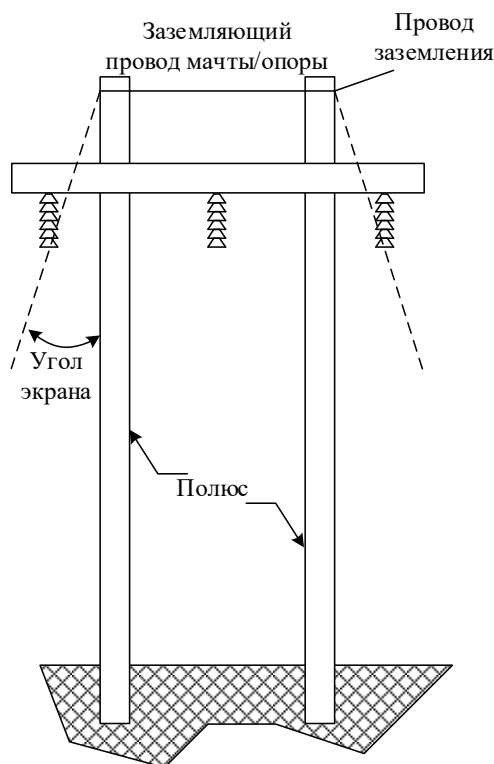


Рисунок 15 – Угол экрана, полюс и провод заземления

Заземленная конструкция имеет хорошие шансы противостоять пробоем молнии при условии, что изоляция проводника и сопротивление заземления были должным образом проанализированы и согласованы. Приемлемой частотой грозовых отключений считается от 1 до 4 отключений на 100 км ЛЭП в год. Что касается сопротивления грунта и фундамента, то сопротивление фундамента отдельных конструкций линии, особенно в пределах 1 км от подстанции, должно быть менее 25 Ом в высокоуровневых зонах. Сопротивление заземления на подстанции должно быть менее 4 Ом.

Проблема пробоев, вызванных загрязнением, также должна быть учтена, особенно если линия должна быть построена недалеко от побережья, промышленного района или в других местах, где переносимые по воздуху пыльные массы могут скапливаться на поверхностях изоляторов. Когда слой загрязнений на изоляторе увлажняется туманом, росой, легким дождем или снегом, он становится более проводящим, и ток утечки по поверхности изолятора значительно увеличивается. Там, где плотность тока наибольшая (для подвесных изоляторов возле штыря и для опорных изоляторов в точках наименьшего диаметра), тепло, вызванное повышенным током утечки, испарит влагу, вызывая образование сухой полосы. Эта полоса обычно имеет более высокое сопротивление, чем прилегающая увлажненная область, что означает, что полоса выдерживает почти все напряжение на ней. Это приведет к пробоем воздуха и образованию электрической дуги. Пленка влаги на краях сухой ленты высыхает, увеличивая сухую полосу в конечном итоге до точки, где напряжение на полосе чуть ниже значения пробоя воздуха.

Применение газозащитных разрядников. В местности, где заземление конструкции затруднено или необходимо улучшить молниестойкие характеристики существующей линии электропередачи, возможна установка металлооксидных варисторных (MOV-варистор) линейных разрядников. Для обеспечения надлежащей работы, данные устройства должны быть согласованы с устройствами такого же класса напряжения на подстанции. Выбор параметров должен округляться в большую сторону максимального непрерывного перенапряжения на линии передачи, чтобы не допустить перегрузок от пробоя.

В трехпроводной треугольной конструкции добавление разрядника к верхней фазе каждой конструкции обычно обеспечивает некоторую угловую защиту экрана для других фаз. Для достижения наилучших характеристик разрядник должен быть подключен к системе заземления с сопротивлением до 10 Ом. Если хорошее заземление отсутствует, то следует рассмотреть возможность добавления грозозащитных разрядников на все три фазы.

Грозозащитные разрядники также могут быть установлены на экранированных линиях, чтобы свести к минимуму вероятность

возникновения обратного пробоя, если хорошее заземление затруднено. В этом случае необходимо спроектировать межфазные зазоры между вышедшим из строя разрядником, разомкнутым положением и другими фазными проводами, поскольку разрядник может упасть рядом с другим положением фазы под напряжением.

Арматура воздушных линий электропередачи. Арматура (фитинги) ЛЭП делится на сцепную, соединительную и защитную. Сцепная арматура служит для крепления проводов к гирляндам изоляторов и крепления гирлянд изоляторов к траверсам опор. Сцепную арматуру обычно изготавливают из оцинкованной стали.

На ЛЭП с гирляндами изоляторов провода укладываются в специальные зажимы. Зажимы, как и гирлянды, подразделяются на поддерживающие и натяжные. Поддерживающие глухие зажимы обеспечивают жесткое крепление провода за счет нажимных плашек и U-образных болтов. Иногда применяются поддерживающие зажимы с ограниченной прочностью заделки провода. Такие зажимы при обрыве провода допускают его проскальзывание, уменьшая тем самым одностороннее стяжение провода на промежуточные опоры [45].

На анкерных опорах применяются натяжные зажимы, воспринимающие полное стяжение провода. В этих зажимах провод крепится наглухо. Различают болтовые, прессуемые и клиновые натяжные зажимы. В болтовых зажимах крепление провода осуществляется с помощью нажимных плашек и U-образных болтов (рис. 16). Такие зажимы используются для проводов сечением до 500 мм² [49].

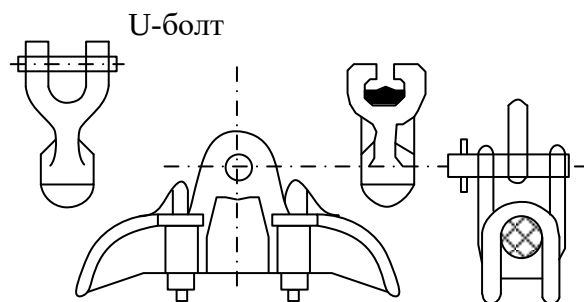


Рисунок 16 – Поддерживающий зажим

Контурные подвесные зажимы разрабатываются с учетом диаметра провода для защиты от формирования овального профиля и чрезмерно высоких сжимающих нагрузок. Подвесные зажимы могут быть изготовлены из ковкого оцинкованного чугуна или ковкой стали. Для алюминиевых проводов рекомендуются алюминиевые футеровки. Медные футеровки рекомендуются только для медных проводников. Фитинг соединителя обычно представляет собой гнездо или скобу.

При использовании зажимов с вкладышами на проводниках, покрытых броневыми стержнями, проектировщики должны выбирать зажимы, которые имеют соответствующий посадочный диаметр для эффективного диаметра проводника и броневого стержня. Можно ожидать, что вкладыши увеличат диаметр проводника на 0,25 см. Есть несколько зажимов, предназначенных для больших углов линии (до 120°). Однако эти зажимы доступны только для проводов малых размеров. Если линия электропередачи с большими проводниками должна сделать поворот на своем пути, следует использовать тензодатчики. В случае средних углов (более 30° линейного угла) могут потребоваться двойные подвесные зажимы, соединенные с пластиной траверсы для постепенного поворота.

Прямолинейные зажимы предназначены для удержания проводов без повреждений на касательных и линейных углах примерно до 15° . Максимально допустимый вертикальный угол (каждая сторона зажима) считается приблизительно 15° относительно горизонтали. Поскольку удерживающая деталь хомута не предназначена для обеспечения поддержки при восходящей нагрузке, этот хомут не следует использовать там, где могут возникнуть условия подъема. Доступны угловые зажимы, которые рассчитаны на линейный угол до 60° . Однако, если линейные углы превышают $15\text{--}20^\circ$, следует использовать подвесные изоляторы. Мягкие подвесные зажимы иногда используются для поддержки проводника и уменьшения статических и изгибающих напряжений в проводнике.

Фитинги, используемые для крепления изолятора к конструкции, могут включать в себя: крючки, Y-образный шар/скобу, шаровые проушины, шаровые вилки или цепь, анкерные или клиновидные скобы. Крючки «С-образные» являются самоблокирующимися крюками. Когда изолирующий колпачок установлен, открытие крючка ограничено для того, чтобы исключить случайное отсоединение. Фитинги должны соответствовать требованиям нормативной документации и параметров изоляторов. Различные типы фитингов показаны на рис. 17. На рис. 17 слева направо: самоблокирующийся С-образный крючок, шаровой крючок, крюк с тросиком. На рис. 18 изображены типы соединений шара и ключа «Y».

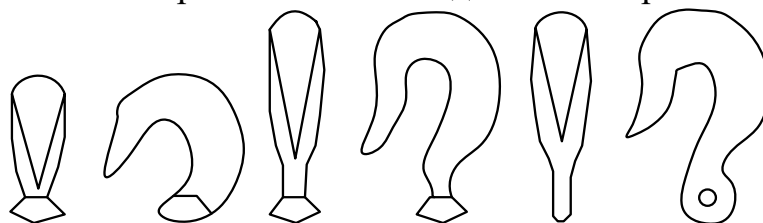


Рисунок 17– Различные типы фитингов (арматуры) ЛЭП

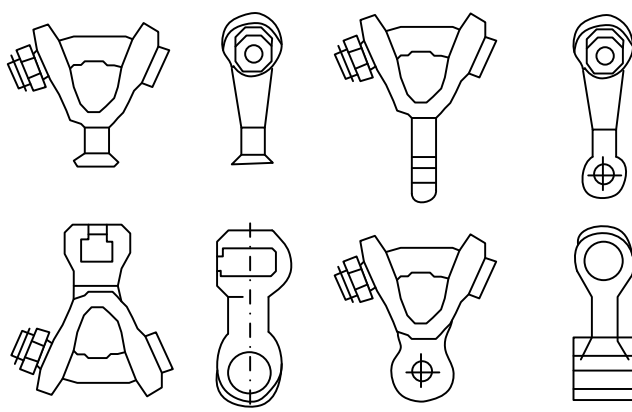


Рисунок 18 – Различные типы соединений шара и ключа «Y»

Соединительная арматура ЛЭП предназначена для соединения отдельных частей провода при его монтаже и эксплуатации. Сталеалюминевые провода сечением до 185 мм^2 соединяются с помощью овальных соединителей, представляющих собой алюминиевую трубку овального сечения. В эту овальную трубку с разных сторон вставляются концы соединяемых проводов и с помощью специальных переносных клещей производится скручивание соединителя (рис. 19, а) или его обжатие (рис. 19, б). Скручивание соединителя применяется для проводов сечением до 95 мм^2 , обжатие – для проводов сечением до 185 мм^2 .

Для повышения надежности соединения и обеспечения должного электрического контакта короткие концы соединяемых проводов, выходящие из соединителя, сваривают с помощью термитной сварки (рис. 19, г).

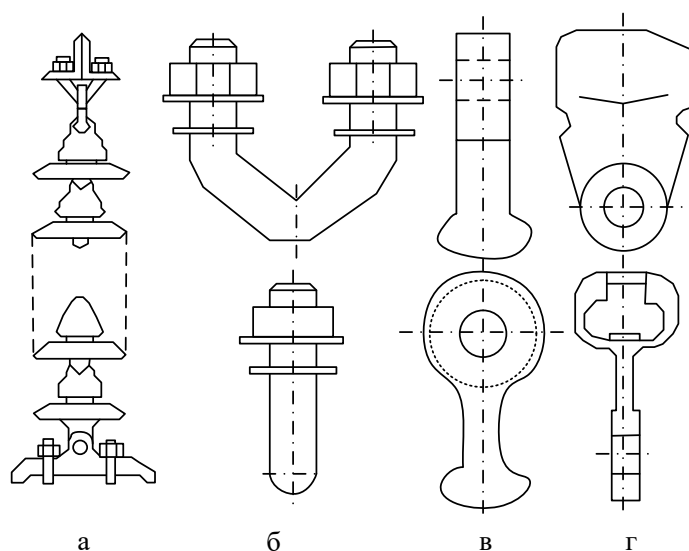


Рисунок 19 – Гирлянда изоляторов (а) и элементы цепной арматуры (б, в, г)

Заглушка проводника может быть выполнена с использованием концевиков формованного типа, автоматических концевиков, болтовых концевиков или концевиков компрессионного типа (рис. 20, а, б). Из-за ограничений прочности формованных и автоматических заглушек эти типы выпускаются в основном для проводов с небольшими размерами. Двумя основными методами заглушки проводника ЛЭП являются использование зажимов глухой части с болтовым соединением и зажимов глухих концов компрессионного типа.

Сращивания проводников могут быть с автоматическим сжатием, формованного типа или с обжимным сжатием. Для большинства проводников используется гофрированный соединитель компрессионного типа из-за его высокой прочности. Соединения должны соответствовать тем же требованиям к прочности, коррозионной стойкости и циклическому нагреву, что и зажимы для глухих концов.

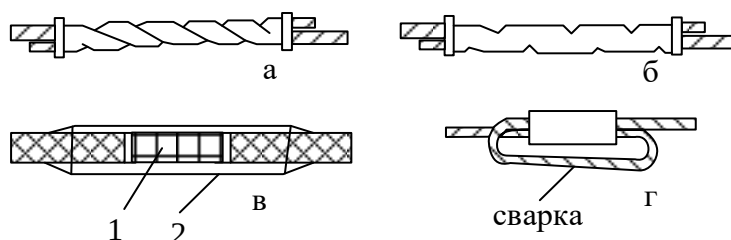


Рисунок 20 – Соединение проводов

Сталеалюминевые провода сечением 240 мм^2 и более соединяются с помощью прессуемых соединителей, состоящих из двух трубок – стальной и алюминиевой (рис. 20, в). С помощью стальной трубки 1 опрессовываются концы стальных сердечников соединяемых проводов, с помощью алюминиевой трубки 2, накладываемой поверх стальной, опрессовываются алюминиевые части соединяемых проводов. На анкерных опорах соединение шлейфов, идущих от натяжных зажимов, осуществляется с помощью термитной сварки, обеспечивающей надежный электрический контакт (рис. 20, г).

Вибрация проводов. В результате воздействия ветра на провод при определенных условиях возникают колебания провода с большой частотой (50-60 Гц) и малой амплитудой (2-3 см). Это явление называется вибрацией проводов. Вибрация приводит к периодическим изгибам провода в месте его крепления в зажиме и, как следствие, к излому отдельных проволок и обрыву провода.

Для предотвращения опасных последствий вибрации применяют гасители вибрации, поглощающие энергию вибрирующих проводов. Гаситель вибрации представляет собой два стальных груза, укрепленных на стальном тросике. Гаситель крепится к проводу болтовым зажимом.

Устанавливаются гасители вибрации по обе стороны от гирлянды изоляторов на расстоянии 0,5 – 1м [50].

Рассмотрим современное состояние исследований в области электроэнергетических систем. Системы распределения электроэнергии становятся все более сложными из-за внедрения возобновляемых источников энергии, что постепенно приводит к увеличению рисков для работы сети электроснабжения. Усиление мониторинга и контроля систем распределения электроэнергии приобретает все большую необходимость. Рассмотрим некоторые зарубежные исследования, посвященные мониторингу систем распределения электроэнергии. Так, например, американские исследователи предлагают комплексный линейный оценщик состояния с учетом параметрического шума (Complex Linear State Estimator Parameter Noise «CLSE-PN») для систем распределения мощности [51]. Прикладные исследования продемонстрировали эффективность алгоритма и доказали, что CLSE-PN обеспечивает более точные результаты, чем CLSE (Complex Linear State Estimator), который не учитывает погрешность измеряемых параметров. Для отслеживания долговременных перегрузок и выравнивания дисбаланса мощностей в фазах используется CLSE-PN, что позволяет отслеживать мгновенные значения пропускаемой мощности, ее напряжение и частоту. Причиной дисбаланса может быть явление двунаправленного потока энергии, когда энергия течет от потребителя к основному источнику питания сети, когда возобновляемые источники энергии генерируют больше энергии, чем необходимо потребителю. Явление двунаправленного потока мощности может вызвать ложное срабатывание и даже неисправность защитных устройств, что в конечном итоге может привести к эксплуатационным рискам (например, непреднамеренному сбросу нагрузки) [52,53].

Оценка состояния энергосистемы является одной из ключевых задач системы управления энергией в сети электроснабжения для оперативной работы и управления. Однако ситуация в системах распределения электроэнергии довольно сильно отличается от систем передачи. Есть две основные причины, по которым в системах распределения электроэнергии до сих пор не получили широкого распространения технологии оценки состояния. Одна из них заключается в том, что системы распределения обладают относительно ограниченной наблюдаемостью по сравнению с системами передачи. Другая причина заключается в том, что достоверность параметров распределительной сети может быть недостаточной, учитывая, что точность параметров, как правило, намного ниже, чем у систем передачи. Таким образом, практическая реализация оценки состояния уровня распределения является большой проблемой для распределительных систем.

Многие авторы [51,54,55] предлагали решения, направленные на решение проблемы неэффективного резервирования путем включения псевдо-измерений и виртуальных измерений в фактические измерения из данных диспетчерского управления и сбора данных (SCADA), которые

состоят из напряжений фидерной шины, реальных и реактивных мощностей и т.д. Однако несмотря на то, что псевдоизмерения повышают наблюдаемость, они могут вносить ошибки в результаты оценки состояния. Кроме того, это решение работает с низкой скоростью, так как данные SCADA не могут наблюдать динамику распределительной системы, вызванную ветровой нагрузкой или изменениями нагрузки.

Для решения проблемы неточных параметров многие авторы дополняют работы так называемыми данными переменного состояния. С помощью данных переменных ошибочный параметр может быть исправлен за счет вывода оценки состояния при достаточной избыточности измерений. Данное решение позволяет уменьшить объем параметров, однако при большом количестве переменных дополненного состояния возрастает вероятность возникновения сложности вычислений в наблюдаемых областях [54].

Ученые из Бразилии [55] предложили альтернативное решение определения неточных параметров: адаптивная обучаемая система на основе искусственных нейронных сетей для уменьшения влияния внешних факторов на оценку параметров электрической системы. На основе фильтров Фурье, Уолша и Калмана производится фильтрация сигналов и моделирование системы электроснабжения по полученным данным. Данный метод позволяет производить отключение компонентов системы только при необходимости, исключая ошибочные срабатывания, вызванные помехами и погрешностью измерений.

Одним из существенных факторов, влияющих на работу ЛЭП, являются ветровые нагрузки. Ветровые нагрузки оказывают негативное влияние на техническое состояние ЛЭП и опор. Экстремальные ветры могут подвергать воздушные линии электропередачи нагрузкам, которые могут привести к обрушению опор, что приведет к серьезным экономическим потерям. Ветровая несущая способность опор соответственно определяется трехмерной выпуклой кривой поверхностью с тремя компонентами ветровой нагрузки в качестве основных осей. Соответственно, функция предельного состояния будет предполагать отказ опоры, если эффект ветровой нагрузки превысит критическую нагрузку опоры [56].

Если известны конфигурация линии, интенсивность и направление ветра, то можно оценить компоненты ветровой нагрузки. Сравнение расчетных составляющих ветровой нагрузки с моделируемыми поверхностями образцов характеризуется кривой хрупкости. Структура, предложенная исследователями из Китая, демонстрируется численным примером, а также приложением к анализу сценария тайфуна, в котором оценивается вероятность отказа реальной линии электропередачи на большие расстояния [57]. Это исследование дало представление о моделировании хрупкости опор ЛЭП, подверженных экстремальным ветрам. Ветровая нагрузка на башенную конструкцию определяется тремя

ключевыми параметрами: величиной скорости ветра, углом атаки ветра и горизонтальным пролетом линии электропередачи. Каждый параметр может, в зависимости от обстоятельств, стать критическим фактором, угрожающим безопасности опоры. В отличие от предыдущих исследований, в предложенной здесь модели хрупкости башни три ключевых параметра учитываются совместно.

При анализе ветровой нагрузки и уязвимости инженерных сооружений используются методы, основанные на надежности и вероятности. Различные типы конструкций имеют специфические инженерные требования и конструктивные характеристики, что приводит к различным проблемам при моделировании. Влияние ветра на качество электроснабжения связано с реакциями не только конструкции опоры, но и проводов (проводников и заземляющих проводов). По данным полевых мониторинговых и экспериментальных исследований, более 50 процентов ветровой нагрузки на передающую опору поступает от поддерживаемых передающих проводов и значительно зависит от горизонтального пролета линии электропередачи. Поэтому пространственная конфигурация линии электропередачи является необходимым условием для модели хрупкости опоры.

Помимо скорости ветра, угол атаки ветра, определяемый направлением ветра и направлением линии, также показывает ветровую нагрузку опоры, поскольку силы сопротивления как опоры, так и проводов значительно изменяются в зависимости от угла атаки ветра. Из-за большой пространственной протяженности электрической сети скорость ветра, угол атаки ветра и горизонтальный пролет линии электропередачи значительно варьируются в зависимости от положения опоры. Учитывая, что экстремальное ветровое событие обычно является зависящим от времени и пространства процессом, локальное ветровое поле постоянно изменяется со временем [55].

Эстонские исследователи [58] занимаются изучением параметров коронирования и потерь в ней. Эффект коронирования возникает на ЛЭП, напряжение которых 220 кВ и выше. На основании экспериментов были выведены эмпирические формулы, позволяющие оценить эти потери. Формулы потерь активной мощности на корону обычно принимают одну из следующих двух форм, выраженных через напряжения:

$$\Delta P_{C,U} = f_1(U, U_c),$$

$$\Delta P_{C,E} = f_2(E, E_c),$$

где U – напряжение на проводнике;

U_c – критическое или коронное значение по заданному напряжению;

f_1 – эмпирическая функция, выражается в терминах напряженности электрического поля;

E – поверхностная напряженность электрического поля;

E_c – критическая или коронная напряженность электрического поля по заданной;

f_2 – эмпирическая функция.

Эмпирические функции и заданные значения определяются экспериментально и зависят от широкого спектра факторов. К ним относятся: конструкция проводника и свойства его поверхности, давление воздуха, температура, влажность, количество осадков, степень замерзания на проводниках, толщина стенок гололедно-изморозных образований и т.д.

Существует несколько эмпирических формул [58], однако их трудно применять на действующих линиях электропередачи, поскольку без экспериментальной проверки трудно определить их неизвестные параметры. Кроме того, проведение экспериментальных измерений коронных потерь на действующих линиях электропередачи требует специализированного испытательного оборудования [59,60].

Другой способ оценки потерь на корону заключается в применении статистических методов. Переменная доля потерь при возникновении эффекта короны обусловлена изменением погодных условий, в то время как зависимость этих потерь от свойств проводника и конфигурации линии более постоянна во времени. Собирая достаточно большие объемы метеорологических данных и применяя статистические методы, можно разработать модели, позволяющие оценивать и прогнозировать потери короны. Однако даже в этом случае необходимо получить хотя бы некоторую информацию об исторических значениях потерь короны, чтобы определить эти корреляции с погодными условиями [57].

В США [61] ведутся исследования влияния температуры и стрелы провеса линии на ее техническое состояние. Исходя из расчетного сопротивления линии, средняя температура проводника ЛЭП может быть определена следующим образом:

$$T = \frac{\left(\frac{R}{R_{ref}}\right)^{-1}}{\alpha} + T_{ref},$$

где T – расчетная температура линии;

R – расчетное сопротивление;

R_{ref} – сопротивление линии при эталонной температуре T_{ref} ;

α – коэффициент терморезистивности проводника.

Сопротивление проводника при эталонной температуре может быть отнесено к характеристикам проводника и таким образом может быть рассчитан коэффициент терморезистивности. Точность оценки температуры линии напрямую связана с точностью оценки сопротивления линии.

Оценка провисания линии.

Предложен следующий метод для определения стрелы провеса линии для выбранной длины пролета [61]. Сначала при опорной температуре T_{ref} для длины пролета ρ вычисляется опорная линия D_{ref} :

$$D_{ref} = \frac{\omega \rho^2}{8H}.$$

Затем определяется фактическая длина проводника LT_{ref} при провисании:

$$LT_{ref} = \rho + \frac{8 \cdot D_{ref}^2}{3\rho}.$$

Расчетная температура T_{est} вычисляется из расчетного сопротивления линии R_{est} на основе метода оценки температуры линии. После этого определяется длина проводника LT_{est} при провисании:

$$LT_{est} = LT_{ref} + [1 + \alpha_{AS}(T_{est} - T_{ref})].$$

Стрела провеса D_{est} может быть определена в соответствии с полученными данными LT_{est} . В исследовании [61] рассчитывается только провес пролета, а длина пролета может быть задана в соответствии с реальными данными.

Для оценки стрелы провеса используется следующее уравнение:

$$D_{ref} = \sqrt{\frac{3\rho(LT_{est}-\rho)}{8}},$$

где ω – масса проводника на единицу длины;

ρ – длина пролета уровня;

H – горизонтальная составляющая натяжения, пропорциональная номинальной прочности проводника;

α – коэффициент линейного теплового удлинения, который может быть рассчитан применительно к характеристикам проводника [58].

В Китае ведутся исследования режима работы распределительной сети, изменяющимся в реальном времени в зависимости от коммутационных действий, в результате которых меняют соединения между фидерами, шинами, нагрузками и источниками питания [62]. В отличие от передающих сетей, распределительные сети часто корректируют свои режимы работы из-за сбоев, проверок, ремонтов оборудования или передачи нагрузки. Поэтому режим работы следует рассматривать как основной фактор при оценке параметров линии.

В то же время изменяющиеся во времени внешние условия окружающей среды также резко влияют на параметры распределительной линии. Исследование ученых из Китая о влиянии климатических условий на состояние электрооборудования [62] показало, что сопротивление линии летом имеет более высокое значение, чем зимой при той же температуре, т.к. линия поглощает влагу из окружающей атмосферы, и ее сопротивление

тем самым уменьшается (в регионах, где зимой и летом температуры могут быть равны). Поэтому повышение температуры окружающей среды приведет к существенному увеличению сопротивления. Помимо температуры, другие факторы, такие как относительная влажность атмосферы, скорость ветра и солнечная освещенность, могут вызывать колебания импедансов распределительных линий. Взяв за основу руководство по эксплуатации электрооборудования, исследователи качественно анализируют взаимосвязи между линейными импедансами ЛЭП и условиями окружающей среды.

Экспериментальные результаты показывают, что предложенный авторами [62] метод мониторинга ЛЭП на основе модели дискретной динамической байесовской сети «DDBN» может обеспечить значительное улучшение оценки импеданса распределительной линии. По сравнению с современными методами управления данными эта модель демонстрирует удовлетворительную производительность для оценки параметров тестовых ЛЭП с учетом режимов работы, условий окружающей среды, ошибок данных. На результаты работы метода также могут влиять:

- 1) Включение географических переменных в модель DDBN для оценки параметров линий распределения;
- 2) Идентификация результатов оценки параметров линии в качестве эталонов для определения места сбоев распределительной сети;
- 3) Повышение обобщающей способности модели DDBN и обеспечение возможности прогнозирования параметров распределительной линии для предупреждения сбоев в распределительных сетях [18].

В США ведут исследования влияния грозových разрядов на линии электропередачи [54]. ЛЭП подвергаются трем видам напряжения, которое может вызвать перекрытие изоляции: напряжение промышленной частоты, коммутационные и гроззовые скачки. Пробои из-за напряжения промышленной частоты в первую очередь являются проблемой, возникающей при загрязненных условиях окружающей среды. Из двух оставшихся причин пробоев гроззовые разряды являются самыми опасными для линий 220 кВ и выше.

Для предотвращения ударов молнии воздушный заземляющий провод используют во всех местах, где количество грозových дней в году выше 20. Заземляющий провод должен быть прикреплен с обеих сторон пролета. В сетях с П-образной опорой грозотросы должны быть соединены с проводом заземления конструкции и друг с другом так, чтобы при обрыве одного заземляющего провода оба воздушных останутся заземленными. В местах, где количество грозových дней в году составляет 20 или меньше, следует использовать воздушный провод заземления на расстоянии 0,8 км от подстанции [62,63].

Раннее выявление несоответствий параметров ЛЭП может быть выполнено путем внедрения систем мониторинга в структуру

электроэнергетической системы, что позволит добиться значительного снижения факторов, оказывающих негативное влияние на элементы линии, и косвенно обеспечения безопасности эксплуатации. Многие мировые организации, такие как CIGRE (Conseil International des Grands Reseaux Electriques) или EPRI (Исследовательский институт электроэнергетики), проводят интенсивные исследования по этой теме [64].

Применимость систем мониторинга должна оцениваться в соответствии с индивидуальными характеристиками каждой линии в связи с существующим разнообразием конструкций ЛЭП. Тенденция к росту числа инцидентов, отказов и простоев в последние годы стала основной причиной для поиска решений по внедрению систем мониторинга [65].

Важной задачей, которую должно преследовать управление электрическими системами, является преобразование классических электрических сетей в интеллектуальные сети [59,62,63]. До полной замены классических сетей современными интеллектуальными сетями обеспечение качества электроэнергии осуществляется системами мониторинга с получением данных. Проектирование структуры полной системы мониторинга является сложной задачей из-за следующих причин: необходимость проведения работ во внешней среде; возникновение ограничений, налагаемых электромагнитной совместимостью и обширных географических областей, занятых воздушным пространством линий. Большинство ЛЭП на территории РФ эксплуатируются более 40 лет, и тенденция к увеличению количества происшествий и аварий в последние годы определенно связана с их возрастом.

Системы мониторинга должны обеспечивать оператора подробными данными о текущем состоянии ЛЭП. Классическая система мониторинга содержит в себе семь измерительных блоков, которые связаны по каналам связи с диспетчерским оборудованием. Измерительные блоки распределяют вдоль трассы ЛЭП и монтируют на опорах либо непосредственно на высоковольтных проводах. Диспетчерские пункты расположены в узловых точках сетей распределения энергии. В настоящее время в них, как правило, используются системы SCADA, обеспечивающие обработку и интерпретацию полученных от измерительных блоков данных. Стандартный состав измерительного блока включает в себя следующие базовые компоненты:

- датчики измерения текущих параметров ЛЭП;
- процессорный модуль обработки данных;
- система передачи данных;
- модуль автономного питания.

В зависимости от функционального назначения в системах мониторинга могут использоваться различные типы датчиков для измерения:

- тока в проводе;

- температуры провода в пролете;
- механического напряжения провода в точках подвеса (тензодатчики);
- затухания в оптических волокнах грозозащитного троса или фазного провода;
- критических стрел провеса;
- климатических условий (метеостанция);
- вибрационных характеристик проводов (акселерометры).

Измерение тока осуществляется бесконтактным методом, для чего используются датчики на основе эффекта Холла или катушки Роговского. Система мониторинга ЛЭП обеспечивает повышение надежности передачи электроэнергии и способствует уменьшению расходов на обслуживание линий электропередачи.

Рассмотрим современные средства диагностики ЛЭП.

Различают периодическую, плановую и аварийную диагностику ЛЭП. Диагностика и мониторинг должны проводиться на всех стадиях технологического развития оборудования ЛЭП (проектирования, строительства, реконструкции, модернизации и реновации). Комплексная диагностика ЛЭП включает следующие виды диагностических операций:

- магнитометрический контроль состояния металлических конструкций опор;
- контроль внешней изоляции проводов;
- измерение расстояний по вертикали от проводов (грозозащитных тросов) до поверхности земли вдоль трассы ЛЭП;
- ультразвуковой контроль анкерных креплений фундаментов;
- сейсмоакустический контроль состояния фундаментов и железобетонных конструкций;
- дефектоскопия оттяжек промежуточных опор;
- тепловизионный контроль соединений проводов, арматуры и изоляции ЛЭП;
- мониторинг температуры проводов, оснащенных установками плавки гололеда и при наличии специальных обоснований для ВЛ, которые систематически работают с нагрузкой близкой к длительно допустимой [68,69];
- контроль проявлений высоковольтного пробоя;
- измерение сопротивления контура заземления;
- измерение удельного сопротивления грунта.

Рассмотрим основные аспекты диагностики ВЛ.

Контроль качества заземления опор ЛЭП. Основным критерием качества заземления является измерение сопротивления контура заземления. Целью проведения измерений является проверка соответствия заземляющего устройства требованиям нормативных документов.

Объектами испытаний и измерений являются заземляющие устройства и грунт в районе установки заземляющих устройств. При испытаниях заземляющих устройств ЛЭП проводится выборочная проверка со вскрытием грунта не менее, чем у 2 % опор от общего числа опор с заземлителями. Проверку следует производить в населенной местности на участках с наиболее агрессивными выдуваемыми и плохо проводящими грунтами. Для измерения сопротивления заземлителей создается искусственная цепь протекания тока через испытываемый заземлитель. Для этого на некотором расстоянии от испытываемого заземлителя располагается вспомогательный заземлитель (токовый электрод), подключаемый вместе с испытываемым заземлителем к источнику напряжения.

Магнитометрический контроль состояния металлических конструкций опор и телеметрический контроль параметров проводов ЛЭП. Метод бесконтактной магнитометрии основывается на проведении анализа аномалий напряженности магнитного поля, которые возникают в зонах концентрации продольных и поперечных напряжений, в зонах пластической деформации, изменения структуры металла на участках предразрушения и разрушения металла. Цель данного контроля состоит в обнаружении дефектных мест металлоконструкции и сварных швов, а также общего напряженного состояния металлических конструкций опор. Данный метод хорош тем, что не зависит от положения и ориентации, которые могли бы повлиять на обнаружение дефектов, обеспечивает обнаружение и регистрацию дефектных участков, а также позволяет классифицировать зарождающиеся и развивающиеся дефекты по степени опасности. Метод рекомендуется использовать для контроля состояния металлических опор во время периодического технического обследования и для оптимизации объемов при капитальном ремонте. Магнитометрический метод обнаружения и регистрации дефектов не гарантирует выявления повреждений, не вызывающих изменение уровня напряженно-деформированного состояния металла (сквозные дефекты, питтинговые коррозионные поражения) [70].

Мониторинг погодных условий вдоль линий электропередачи. На качественные и количественные параметры ЛЭП постоянно оказывают воздействие погодные условия. Температура, осадки, атмосферное давление, влажность, скорость и направление ветра являются важными параметрами, измерение которых необходимо для мониторинга погодных условий на ЛЭП. Помимо аварийных ситуаций из-за агрессивных погодных явлений, в процессе эксплуатации могут возникать также случаи загрязнения изоляторов, которые могут приводить к эффекту короны и полному пробое изоляторов. В таких случаях возникает вероятность наличия межфазных утечек и замыкания на землю. Также возможны случаи

критического провисания и касания проводов посторонних объектов. Метеорологические данные могут быть использованы для предотвращения аварийных ситуаций по причине неблагоприятных погодных условий, сопровождающиеся сильным ветром и падающими ветвями с деревьев. Также обработанные данные с пиранометров (прибор для измерения плотности суммарной солнечной радиации) можно использовать для расчета энергии, производимой фотовольтаикой в различных регионах. Кроме того, записанные данные могут быть дополнительно изучены для разработки новой сети, включающей ледовую нагрузку и погодные условия. Информация о ледовых нагрузках затем может быть использована для дальнейшего анализа и составления карт обледенения и стандартов для проектирования воздушных линий. Для этих целей используется прибор типа PMS 39 (станция метеорологического мониторинга), который обычно подключается к системе диспетчерского контроля и сбора данных (SCADA), собирающей данные для дальнейшего принятия решений.

Пропускная способность ЛЭП ограничивается нагревом проводов и устойчивостью электропередачи. Причем с увеличением длины линий второй фактор (устойчивость) определяет предел передаваемой мощности. Провисание провода, характеризуемое стрелой провеса, в пролете ЛЭП возникает вследствие удлинения провода при нагревании и зависит как от температуры воздуха, так и от нагревания самого провода вследствие протекания по нему тока. Стрела провеса может определяться как с помощью тензодатчиков, расположенных на опорах в точках подвеса проводов, так и косвенно, по данным датчиков акселерометров измерительных модулей, смонтированных непосредственно на проводе. Наличие таких данных позволяет прогнозировать допустимые критические нагрузки при эксплуатации проводов в пролетах, а также управлять запасом устойчивости и при необходимости изменять ресурс допустимой токовой нагрузки.

Агрессивные погодные условия, обледенение, снежный буран являются условиями тяжелой эксплуатации ЛЭП. Гололедно-изморозевые отложения на проводах и тросах ЛЭП проявляются при температуре от -4°C и скорости ветра 5–10 м/с. Помимо обрывов, гололед также является одной из причин возникновения эффекта пляски проводов, что может приводить к схлестыванию. Оценка совокупности погодных условий позволит избежать многих аварийных случаев. Внедрение новых технологий мониторинга и анализа больших данных, полученных от метеодатчиков, тензодатчиков подвеса и акселерометров, с применением облачных технологий и технологий нейронных сетей позволит значительно упростить решение задач подобного рода [62,63,67].

Для предупреждений и разрешения проблемы, связанной с образованием гололеда на ЛЭП, руководствуются рекомендациями, изложенными в п. 2.5.16 [1]. Согласно данному пункту, плавка гололеда

(ПГ) предусматривается на проводах и тросах ЛЭП, эксплуатируемых в районах с величиной стенки гололедообразования более 25 мм, в районах с частыми гололедообразованиями при сильном ветре и в районах с частой и интенсивной пляской проводов.

Также для борьбы с пляской проводов перспективным является применение инновационных композитных проводов, поливы проволок которых выполнены из алюминий-циркониевых и других сплавов. На ЛЭП с предусмотренной плавкой гололеда должен быть обеспечен мониторинг гололедообразования, при этом рекомендуется применять сигнализаторы начала гололедообразования и контрольные устройства окончания плавки [63].

Ледяной дождь и сильный снегопад также могут быть причинами и обледенения изоляторов. Данные явления также могут быть причинами пробоя или обрыва электрической сети. Поэтому очень важно вовремя и точно распознать ситуацию обледенения изолятора. В сложившейся критической ситуации такого рода оперативное решение проблемы обледенения изоляторов ЛЭП должно быть принято в режиме реального времени. Для этого может использоваться технология распознавания обледенения изолятора на линиях электропередачи методом обработки изображений. Отображение обледенения линии передачи методом онлайн-мониторинга на основе 3D-распознавания является весьма перспективным направлением и позволяет повысить точность определения обледенения изоляторов. Для исследования изображения изолятора, способного преодолеть воздействие сложных экологических циклов и своевременного точного расчета толщины льда, скопившейся на поверхности изолятора, возможно использование алгоритмов морфологического изображения и определение коэффициента операции замыкания.

Наличие нескольких методов обнаружения льда является наиболее перспективным направлением для определения обледенения систем передачи электроэнергии не только на ЛЭП, но и для систем переработки энергии ветра. Комплексный подход будет более удобным для определения общих ледовых нагрузок, условий обледенения, устойчивости и другой информации в зависимости от того, какой фактор является наиболее важным при использовании датчиков и в какой географической и климатической среде находится система передачи электрической энергии.

Использование современных технологий 3D-распознавания, анализа и новых сверхчувствительных сенсоров позволяет вычислять информацию о степени тяжести (ледовая нагрузка) или интенсивности (скорость обледенения) на ЛЭП.

Методы обнаружения позволяют производить прогнозирование на метеорологическое обледенение, то есть продолжительность активного обледенения, и / или инструментальное обледенение, то есть период времени, когда лед присутствует на конструкции, инструменте или объекте.

Современные ветроэнергетические турбины оснащены механизмом защиты от обледенения и активируют профилактическое отключение в случае сильного обледенения. Обе стратегии полезны в борьбе против потерь, связанных со льдом, и делают систему более рентабельной и надежной. На рынке уже появляются различного рода устройства, которые делают мониторинг погодных образований более доступным, например, детекторы льда Ice Monitor, Goodrich, Labkotech и Holo optics с наличием камеры и анемометра с нагревателем [71,72].

Коронный разряд на проводах, влияние гармоник. Потери электроэнергии при ее передаче по длинным проводам напряжением выше 110 кВ возрастают вследствие наличия коронного разряда, который возникает в резко неоднородных электромагнитных полях, в которых ионизационные процессы могут происходить в узкой области вблизи электродов [63]. Эта высокочастотная составляющая тока короны является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, который создает дополнительных помехи в диапазонах теле-радио частот. Наличие коронного разряда может определяться посредством спектрального анализа совокупности токовых сигналов, синхронизированных с временными метками системы глобального позиционирования (GPS).

Одной из основных проблем при транспортировке электроэнергии является влияние высших гармоник напряжения и тока на элементы систем электроснабжения. Несинусоидальные токи в элементах электрической сети вызывают добавочные потери мощности и электроэнергии. Величина этих потерь зависит от степени искажения синусоидальности. Основной вклад в потери вносят 3-я, 5-я и 7-я гармоники. Величина добавочных потерь в линии определяется такими факторами, как: гармонический состав и величина токов высших гармоник, их распределение вдоль трассы линии, сопротивления проводов и тросов. Высокий уровень добавочных потерь активной мощности и энергии говорит о наличии резонансных процессов в линиях, что приводит к ухудшению качества передаваемой электроэнергии и снижению срока службы электрооборудования сети. Анализ гармоник тока позволяет выявлять утечки и замыкания, а также локализовать их на уровне сегментов сети. Выявление резонансных явлений в топологии сети позволяет принять меры для лучшего согласования с нагрузкой и уменьшить потери энергии в сетях при транспортировке.

Рассмотрим далее **параметры оценки технического состояния функциональных узлов ЛЭП.** Согласно приказу Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» проводится мониторинг следующих параметров:

1. Состояние фарфоровой, стеклянной и полимерной изоляции, а также линейной арматуры;

2. Состояние опоры и портала, заземления, решетчатой и многогранной стойки (для металлических опор), железобетонных и деревянных приставок, металлических и железобетонных траверс, подтраверсного бруса, ветровой связи, тросостойки и оттяжки;

3. Состояние фундамента оттяжки (при наличии) и опоры;

4. Состояние фазных изолированных и неизолированных проводов, соединителей, гасителей вибрации, гасителей пляски;

5. Состояние грозотроса, соединителей, гасителей вибрации и пляски, состояние трассы и габариты проводов.

Далее будут рассмотрены основные виды мониторинга более подробно.

Контроль под напряжением состояния подвесных тарельчатых фарфоровых изоляторов в изолирующих подвесках. Контроль осуществляется с помощью изолирующих штанг различной конструкции. При контроле проверяется электрическая прочность изоляторов [1,36,37]. В зависимости от конструкции измерительной головки штанги подразделяются на: штанги с постоянным искровым промежутком, штанги с переменным искровым промежутком, штанги с измерительным прибором. В первом случае выявляются «нулевые» изоляторы. Конец штанги представляет собой два изолированных друг от друга бакелитом захвата. Оба захвата соединены с регулируемыми по расстоянию шаровыми электродами. При некотором воздушном зазоре и напряжении он пробивается. В зависимости от расстояния между электродами изменяется напряжение пробоя. Чем больше расстояние между электродами, тем большее напряжение требуется для пробоя. Во время измерения расстояние между электродами установлено на таких значениях, при котором напряжение пробоя составляет 50-70% от номинального значения напряжения, приходящегося на исправный изолятор подвески. Захваты накладываются на два смежных изолятора и если изолятор исправен – между электродами возникает искра, в противном случае искры не возникает. Во втором случае используются штанги типа ШИ-220 или ШИ-110. К щупам этих штанг присоединен прибор, измеряющий напряжение. Предел измерений от 0 до 25 кВ. Измерение производится поочередно на каждом изоляторе, начиная с изолятора траверсы путем прикладывания измерительной головки к шапке изолятора. При этом необходимо следить за тем, чтобы был обеспечен контакт между щупами и металлическими деталями изоляторов. Показания прибора умножаются на повышающий коэффициент. Отбраковка изоляторов производится в соответствии с отраслевыми нормами по значению напряжения, приходящегося на каждый изолятор [43].

Контроль состояния проводов и грозозащитных тросов. В процессе эксплуатации ЛЭП контроль проводов и грозовых тросов осуществляется во время осмотра линии без подъема на опоры, однако необходимы также выборочные проверки при высотных осмотрах, во время которых должно проверяться состояние проводов и тросов в зажимах и распорках [1,36,37]. С помощью дополнительных приближающих средств, например бинокля, производится контроль следующих неисправностей: обрыв проволочных соединений, остатки следов перекрытия или схлестывания, оплавления или вспучивания верхних повивов или возникновение узлов; фиксируются число оборванных, перегоревших проволок, характер их обрыва, степень коррозии стальной части проводов и тросов. Верховые осмотры проводов и грозозащитных тросов проводятся как на отключенных ЛЭП [65,73], так и на ЛЭП, находящихся под напряжением, с применением специальных изолирующих устройств [66,67]. Оценка состояния проводов и грозозащитных тросов должна проводиться в соответствии с отраслевыми нормами. Данный этап может быть автоматизирован при помощи мониторинга ЛЭП посредством БпЛА и дальнейшей обработки и анализа изображений.

Контроль прессуемых соединителей сталеалюминиевых проводов с помощью индикатора ИПС. Контроль качества соединения сталеалюминиевых проводов сечением от 240 до 800 мм² на отключенных ЛЭП осуществляется с помощью индикатора положения соединительных проводов (ИПС) путем определения положения стального сердечника прессуемых соединительных зажимов [1,36,37,64]. Работа индикатора основана на изменении магнитного поля постоянного магнита в месте наложения стальной части соединительного зажима на стальной сердечник соединяемых сталеалюминиевых проводов. При контроле соединительного зажима с помощью индикатора ИПС магнит освобождают, вывернув фиксирующий винт до упора. Индикатор плотно накладывается сверху на алюминиевый корпус зажима (при этом продольная большая ось его совпадает с осью зажима) и перемещается вдоль него от торцов к середине с одной и другой стороны. При пересечении месторасположения торца стальной гильзы зажима магнит индикатора притягивается и стрелка закрывает смотровые отверстия в корпусе. Операция повторяется два-три раза с каждой стороны. На поверхности зажима каждый раз делается отметка, указывающая место срабатывания индикатора. Середина (половина) расстояния между двумя ближайшими отметками будет соответствовать положению торца стальной части зажима. Измерив и сравнив расстояния от концов алюминиевого корпуса зажима до полученных в результате контроля отметок, можно судить о положении стального сердечника внутри зажима. Если стальной сердечник

спрессованного соединительного зажима расположен несимметрично по отношению к алюминиевому корпусу, то зажим считается дефектным и должен отбраковываться [64]. Одновременно следует измерить геометрические размеры (длину и диаметр спрессованной части) зажима. Они должны соответствовать требованиям [64].

Контроль состояния контактных болтовых соединений проводов с помощью измерительной штанги. Контроль состояния контактных болтовых соединений проводов в петлях и пролетах ЛЭП осуществляется на линиях, находящихся под нагрузкой, посредством электрических измерений [1,36,37]. Измерения производят измерительной штангой с головкой, имеющей милливольтметр. Головка включает в себя два металлических электрода, присоединенных к милливольтметру, которые накладываются на участок провода. На участке провода или болтовом соединении замеряется падение напряжения. Отношение падения напряжения на соединении к падению напряжению на участке провода является коэффициентом дефектности. Падение напряжение на участке провода измеряется на расстоянии более метра от места соединения. Контактные болтовые соединения проводов бракуются, если падение напряжения на участке соединения более, чем в 2 раза превышает падение напряжения на участке целого провода той же длины [43]. В случае установки на проводах ЛЭП контактных болтовых соединений с несколькими переходными контактами в одном соединении, например, болтовых прессуемых соединений, при проверке таких соединений падение напряжения измеряется на каждом участке (контакте) такого соединения и коэффициент дефектности каждого контакта должен быть не более двух. Контактные болтовые соединения, измерения по которым показали их неудовлетворительное состояние, должны быть отремонтированы или заменены [67].

Контроль состояния узлов и частей деревянных опор. Основной целью данного вида контроля является проверка древесины опоры на подгнивание. При этом необходимо производить качественную и количественную оценку древесины с применением методов простукивания всех частей опоры и замера глубины подгнивания в опасных сечениях. С помощью визуального осмотра необходимо определять локальные трещины, наружное и местное подгнивание. С помощью простукивания необходимо выявлять внутренние дефекты – при наличии подгниваний древесины звук постукивания будет становиться более глухим. Следует также учитывать, что в зависимости от влажности и температуры воздуха возможны искажения звука. Измерения глубины загнивания производится в трех точках окружности детали под углом 120° – для деталей, расположенных вертикально или наклонно (приставки, стойки, подкосы,

раскосы), и в двух точках окружности (сверху в месте наибольшего загнивания и внизу против первого) – для деталей, расположенных горизонтально (траверсы, распорки и т.п.). Первое измерение по окружности вертикально расположенных деталей производится в месте предполагаемой после осмотра и простукивания наибольшей глубины загнивания. Измерение можно производить тремя способами: с помощью шила, пружинных приборов или прибора ОЗД-1. В первом случае поверхность древесины протыкается шилом с делениями через каждые 5 мм. Шило проникает в древесину до тех пор, пока не упрется в здоровую ее часть. Измерения проводятся несколько раз и высчитывается среднее арифметическое значение глубины прокола, что соответствует глубине наружного загнивания древесины. Диаметр здоровой части древесины определяется разницей диаметра исследуемой детали и удвоенного значения подгнивания [36]. Во втором случае для измерения внутреннего и наружного подгнивания древесины применяются бурава различной конструкции или пружинные приборы [44]. Средняя глубина наружного загнивания детали в каждом сечении определяется как среднее арифметическое трех измерений. Как и в первом случае, диаметр здоровой древесины при наружном загнивании определяется вычитанием удвоенного значения средней глубины загнивания из значения фактического диаметра детали. Отбраковку древесины необходимо производить в соответствии с отраслевыми нормами путем сравнения диаметра равнопрочного сечения с минимально допустимым диаметром для данной части опоры. Для контроля наличия загнивания в деталях деревянных опор часто используется прибор ОЗД-1 – определитель загнивания древесины. Данное устройство позволяет производить качественную оценку состояния древесины частей опоры, обеспечивая при этом дополнительную проверку безопасности при производстве работ непосредственно на деревянной опоре. Однако, согласно требованиям нормативных документов, качественная оценка древесины прибором ОЗД-1 не исключает необходимости измерения ее подгнивания, которое должно производиться по одному из выше способов. Данный этап может быть частично автоматизирован при помощи визуального мониторинга посредством БпЛА и дальнейшей обработки и анализа изображений.

Контроль состояния металлоконструкций и антикоррозионного покрытия частей конструкции ЛЭП. Во все периоды технической эксплуатации ЛЭП необходимо проводить обследование металлических частей опор. Данный контроль обычно осуществляется путем их осмотров [1,45,49]. Осмотры проводятся с целью качественной оценки состояния металлоконструкций и защитного лакокрасочного покрытия. Во время осмотра могут быть выявлены следующие неисправности и дефекты:

- деформация элементов опоры;

- дефекты сварных швов;
- коррозия деталей опоры;
- дефекты болтовых и заклепочных соединений;
- разрушение лакокрасочного или цинкового покрытия;
- неплотное прилегание элементов опоры, несоответствие диаметров гаек диаметрам анкерных болтов, отсутствие гаек на анкерных болтах;
- повреждения металлоконструкций.

По результатам визуального осмотра определяется необходимость проведения дальнейших обследований металлических узлов и частей опоры. При обследовании кроме качественной оценки производится определение количественных характеристик неисправностей путем измерений выявленных дефектов и повреждений.

Измерение прогибов поясных уголков, находящихся в пределах панели, может быть проведено при помощи штангенциркуля. Расстояние определяется и сравнивается с наибольшим расстоянием от тонкой стальной струны диаметром 1 мм, натянутой вдоль контролируемого элемента и закрепленной струбцинами, до его грани. Техническое состояние погнутого элемента определяется путем сравнения отношения f / l (где l – длина погнутого элемента) со значением предельно допустимого прогиба по нормативно-техническим документам.

Измерение местных искривлений элементов опоры проводится аналогично. Вместо струны можно применять деревянные ровные рейки, которые накладываются на искривленную полку уголка. С помощью линейки или рулетки измеряется наибольшее расстояние между искривленной полкой уголка и рейкой.

Контроль состояния болтовых соединений необходимо осуществлять с целью выявления недотянутых болтов или отвинтившихся гаек. Для этого применяется молоток массой 0,5 кг. При ударе незатянутые болты издают глухой дребезжащий звук, а при прикосновении к ним рукой ощущается дрожание.

Контроль состояния металлоконструкций, ослабленных сквозными отверстиями, осуществляется с целью выявления элементов, поперечное сечение которых ослаблено сквозными отверстиями. Для измерения используется штангенциркуль. С его помощью измеряется ширина полки уголка, его толщина и максимальная ширина отверстия. Определяется фактическая площадь поперечного сечения элемента в месте повреждения и сравнивается с площадью поперечного сечения в целом месте. Техническое состояние поврежденного элемента определяется путем сравнения значения с предельно допустимым значением, приведенным в нормативно-технических документах [1,49].

Контроль за образованием трещин в сварных швах осуществляется с целью выявления элементов, имеющих трещины в швах или околошовной

зоне, оторванных частично или полностью с одной стороны. Трещины в сварных швах могут привести к отрыву уголков и, как следствие, к травматизму или несчастным случаям. Для выявления трещин могут использоваться лупа семикратного увеличения или молоток массой 0,5 кг. При ударе молотком звук дребезжащий, ширина раскрытия трещины увеличивается, она становится видимой невооруженным глазом. Наличие трещин в сварных швах, соединяющих отдельные элементы металлоконструкций опор, недопустимо, узлы крепления в таком случае бракуются и требуют усиления.

Контроль коррозионного состояния металлоконструкций производится с целью определения вида коррозии, характера разрушения защитного покрытия и степени коррозионного износа путем внешнего осмотра металлоконструкций. Коррозия как распространенное повреждение влияет на целостность и безопасность конструкций и может привести к катастрофическим отказам. Для получения пространственно-временного волнового поля используется бесконтактный сканирующий лазерный доплеровский виброметр. При этом методе анализа полученное пространственно-временное волновое поле сначала обрабатывается для генерации локальной функции волнового числа. Полученная функция волнового числа далее анализируется с помощью шага регрессии дисперсионной кривой, который ищет в наборе теоретических дисперсионных кривых частотно-волнового числа для различных толщин пластин и определяет оптимальную толщину пластин, теоретическая кривая которой наилучшим образом соответствует соотношению частотно-волнового числа, содержащемуся в локальной функции волнового числа. Таким образом, 3D-профиль, включающий в себя как плоские, так и объемные размеры конструкции, может быть построен для визуализации коррозии и количественной оценки. Коррозия металлоконструкций бывает поверхностная и щелевая. Поверхностная коррозия подразделяется на сплошную и язвенную. Сплошная равномерная коррозия характеризуется равномерным по всей поверхности постепенным проникновением в глубь металла. После механического удаления продуктов коррозии до чистого металла его поверхность оказывается шероховатой, но без очевидных глубоких точек коррозии и трещин. Этому виду коррозии подвержены все элементы опор, расположенные выше 1,5-2 м от уровня земли. Язвенная коррозия характеризуется появлением на поверхности конструкций отдельных или множественных повреждений, иногда даже сквозных отверстий. Наиболее подвержены ей элементы, расположенные на расстоянии 1,5-2 м от уровня земли. Щелевая коррозия характеризуется наличием значительных коррозионных поражений металла в щелях, зазорах, полузакрытых полостях и накоплением в них уплотненных продуктов коррозии, что вызывает образование трещин в сварных соединениях, разрывы болтов и заклепок, отрывы элементов друг от друга.

Этому виду коррозии подвергаются в основном узлы соединений элементов, выполненных внахлестку. Данный этап может быть частично автоматизирован при помощи визуального мониторинга посредством БпЛА и дальнейшей обработки и анализа изображений.

Контроль состояния железобетонных опор и приставок. Контроль включает следующие технические мероприятия: осмотры, проверки состояния опор и приставок, обследования, испытания для определения механических характеристик конструкций [1,36,37,63]. При осмотрах выявляются следующие неисправности и дефекты железобетонных опор и приставок:

- наклоны вдоль и поперек ВЛ;
- кривизна (прогиб) стоек;
- оседание или выдавливание из грунта;
- недозаглубление;
- отсутствие защиты от песковыдувания и от действия агрессивных вод;
- деформация отдельных частей;
- раковины, щели, трещины, сколы, выколы, пробоины, шелушение, осыпание, выщелачивание бетона, обнажение арматуры, отсутствие гидроизоляции;
- повреждение металлических частей.

По результатам осмотра решается вопрос о необходимости обследования опор и приставок. Это необходимо для определения количества неисправностей, их тяжести, разработки мер по ремонту и восстановлению поврежденного оборудования для дальнейшей эксплуатации. Для диагностирования и измерений трещин, раковин, щелей и сколов осуществляется визуальный осмотр с предварительной откопкой на 0,5 м стойки в земле. Осмотр опоры производится путем поднятия по приставке или телескопической вышки. Подъем на опору после откопки ее на 0,5 м не допускается. Для измерения габаритов трещин и раковин используют специальное оборудование: микроскоп Бринелля и лупы Польди. Глубина дефекта измеряется при помощи щупа или линейки. При этом фиксируются также их характер, размеры, продольное или поперечное направление, количество в одном сечении. Измерение кривизны стойки производится методом натягивания стальной струны диаметром 1 мм, вдоль прогнутой стойки в плоскости прогиба. Концы струны при этом закрепляются бандажами наверху и внизу стойки. Значение кривизны измеряется линейкой, прикладываемой в месте наибольшего прогиба стойки, между натянутой струной и осью опоры. Измерения могут производиться как с подъемом непосредственно по самой стойке опоры при достаточной ее прочности, так и с применением подъемных механизмов. Оценка допустимой кривизны стойки опоры производится на основании

норм и допусков, приведенных в отраслевых нормативно-технических документах [1,64]. При отклонении свободностоящих опор от вертикальной оси, просадке грунта в месте заделки стойки опоры, наличии зазоров между стойкой и стенкой котлована производится контроль качества заделки опоры в грунте, плотности засыпанного в котловане грунта, наличия ригелей. Оценка заделки опоры в грунте, в том числе и наличие ригелей, должна производиться с учетом проектных решений по конкретной опоре. Контроль состояния оголенной арматуры начинается с очистки металлическими щетками от ржавчины, измерением степени ее коррозии с помощью штангенциркуля, глубиномеров, измеряется длина и диаметр оголенной арматуры. Измерения производятся не менее, чем в трех точках по сечению арматуры, где обнаружена коррозия. Выявленные в результате обследования дефекты и неисправности железобетонных опор и приставок фиксируются в листах осмотра или специальных ведомостях. На основе этих данных производится анализ технического состояния опор и приставок и решается вопрос о методе их ремонта или замене [52]. Данный этап может быть частично автоматизирован при помощи визуального мониторинга посредством БПЛА и дальнейшей обработки и анализа изображений.

Контроль тяжения в оттяжках опор ЛЭП. В течение всего срока службы ЛЭП натяжение проводника может изменяться от 10 до 60 % и более от номинальной прочности проводника из-за изменения нагрузки и температуры. Однако в большинстве случаев напряжение будет колебаться в относительно узких пределах. Поскольку лед, сильный ветер и экстремальные температуры относительно редки во многих областях, среднестатистические нормальные напряжения могут быть более важными для определения срока службы проводника, чем высокие напряжения, которые возникают нечасто. Контроль тяжения в оттяжках опор линий электропередачи осуществляется с помощью метода свободных колебаний. Его принцип основан на зависимости между величиной тяжения в ней T и периодом свободных однополуволновых поперечных колебаний оттяжки (τ) [62]:

$$\tau = 2 \sqrt{\frac{lG}{gT}},$$

где l – длина оттяжки, м;

G – масса оттяжки, кг;

g – ускорение свободного падения, равное 9,8 м/с.

Данная зависимость используется для построения графика до начала измерений, а также подсчитывается таблица зависимости тяжения в оттяжке от времени десяти колебаний оттяжки при ее диаметре до 50 мм и длине 15-35 м. Для оттяжки каждого типа будет строиться индивидуальная

зависимость. Длина оттяжки l принимается равной расстоянию от верхней скобы до точки крепления оттяжки к анкерным болтам. В массу G тросовых оттяжек входит масса самой оттяжки и смазки, если оттяжки смазаны. Масса стержневых оттяжек устанавливается по данным, приведенным в рабочих чертежах. Анкерные болты и детали крепления оттяжек при расчетах не учитываются. Оттяжки должны быть свободны от гололеда. Тяжение в оттяжке для построения графика или составления таблицы задается произвольно, например, 1,0 т, 1,5 т, 2,0 т, 2,5 т, ... 5,0 т. Операции по определению тяжения в оттяжках выполняются в следующей последовательности:

1. Возбуждаются в оттяжке свободные однополуволновые колебания;
2. Определяется секундомером время десяти полных колебаний;
3. Определяется по этому времени, с помощью графика или таблицы, значение тяжения в оттяжке.

На открытых участках, где встречаются устойчивые ветры, эоловая вибрация может быть проблемой, особенно если напряжение в проводниках велико. Как правило, более низкое напряжение в условиях, при которых вероятно возникновение эоловой вибрации, может уменьшить проблемы с вибрацией.

Контроль с помощью индикатора напряжения (ИН) предназначен для регулирования натяжения оттяжек опор воздушных линий электропередачи при строительстве и эксплуатации их в различных климатических зонах. Принцип действия ИН основывается на измерении упругости натянутого каната. Если участок каната оттяжки прогибать сосредоточенной силой P на постоянную величину стрелы прогиба l , то существует прямая зависимость между натяжением каната N и силой P :

$$P = f(N)$$

Измеряя силу P динамометром, можно определить натяжение каната оттяжки. Захваты индикатора позволяют его устанавливать и производить измерения не только на оттяжках, выполненных из одного каната, но и сдвоенных скрученных. Интервал диаметров стальных канатов контролируемых оттяжек – 12,0+25,5 мм; диапазон усилий натяжения – 4000+60000 Н. Полученные результаты сравниваются между собой и с расчетными значениями тяжений в оттяжках [74,75].

Контроль габаритов, стрел провеса проводов и тросов. Стрела провеса проводов и тросов, габариты линии до земли или пересекаемых объектов измеряют при приемке линии в эксплуатацию для проверки правильности монтажа и в процессе эксплуатации в том случае, когда стрелы провеса и габариты могут изменяться за счет вытяжки проводов, проскальзывания проводов в подвесных и натяжных болтовых зажимах в результате изменения длины гирлянды при замене дефектных изоляторов,

наклонов опор, изменения конструкции опор при ремонтных и реконструктивных работах на линии. При измерениях расстояний от проводов до поверхности земли и различных объектов, а также стрел провеса следует фиксировать температуру воздуха. Полученные при измерениях фактические значения путем расчетов или с помощью специальных таблиц приводятся к температуре, при которой получаются наибольшие стрелы провеса, сопоставляемые с проектными данными и допусками, приведенными в нормативно-технических документах. Существуют различные способы измерения стрел провеса и габаритов [1,36,37]. При измерении габарита без отключения пользуются изолирующей штангой. Габарит в месте пересечения с другой ЛЭП определяется в виде разности расстояний до земли каждой ЛЭП. Для этого необходимо измерить габарит каждой линии описанным ранее способом.

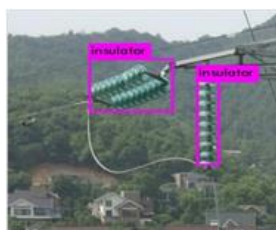
Измерение габарита или стрелы провеса провода приспособлением для определения высоты элементов (ПОВЭ) является самым удобным. Прибор представляет собой плоскую коробку, имеющую форму равностороннего треугольника. В основание треугольника вставлено стекло, на котором нанесены две риски. В вершине треугольника имеются два отверстия, через которые производится визирование. Погрешность измерений ПОВЭ при высоте объектов или габаритах до 50 м не превышает 4%, что является допустимым.

Измерение стрелы провеса провода (троса) визированием с помощью двух реек производится путем закрепления горизонтальных реек на расстоянии от точки провеса, которое зависит от температуры окружающего воздуха и длины пролета. Расположившись на опоре таким образом, чтобы глаз оказался на уровне одной из реек, монтер смотрит на рейку соседней опоры. При расчетной стреле провеса низшая точка провода должна находиться на прямой линии, соединяющей обе визирные рейки.

Наиболее точно стрелы провеса могут быть измерены с помощью теодолита. Теодолит устанавливается на расстоянии 50-60 м от линии так, чтобы расстояния от прибора до вертикальных проекций низшей точки провода и точки подвеса провода на опоре были примерно одинаковы. Вертикальная визирующая ось теодолита направляется на точку подвеса провода на опоре и производится отсчет превышения этой точки над горизонтальной осью прибора (угол β). Аналогично производится отсчет превышения низшей точки провода над горизонтальной осью прибора (угол α). По полученным отсчетам определяется стрела провеса провода как разность подсчитанных значений [76]. Данный этап может быть частично автоматизирован при помощи визуального мониторинга посредством БпЛА и дальнейшей обработки и анализа изображений. Рассмотрим методы и подходы к детектированию элементов ЛЭП и их дефектов средствами технического зрения.

3. Обзор методов и подходов детектирования дефектов элементов ЛЭП на изображениях в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах

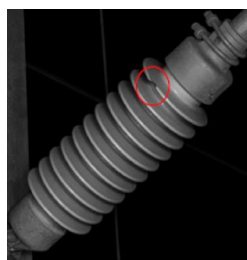
Детектирование элементов конструкции ЛЭП и их дефектов. На основе проведенного обзора основных компонентов конструкции ЛЭП выделим те элементы, которые можно анализировать средствами технического зрения: провода (в том числе грозозащитный трос), изолятор, опора и арматура. Наиболее распространенные дефекты компонентов ЛЭП представлены на рис. 21.



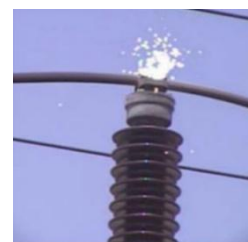
Изолятор



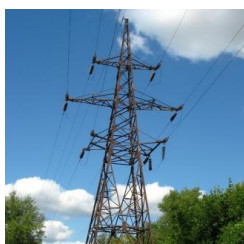
Отсутствие тарелки



Сколы



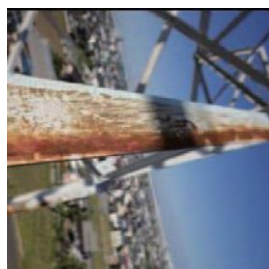
Коронный разряд



Опора



Падение



Коррозия



Гнездо



Провод



Обрыв проволок



Посторонний предмет

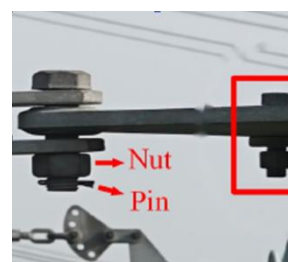
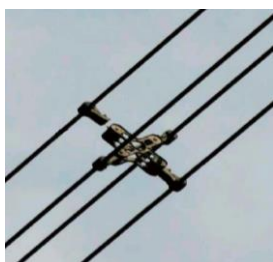


Рисунок 21 – Наиболее распространенные дефекты компонентов ЛЭП

Мониторинг состояния элементов ЛЭП при помощи ИК и УФ камер позволяет выявить неисправности элементов конструкций линии, которые не заметны при визуальном осмотре. Для дистанционного выявления коронного разряда на проводах применяется методы обработки УФ-изображений [61,62]. Для обнаружения дефектов изоляции, измерения температуры проводов ЛЭП с целью выявления сверхнормативных потерь энергии используется инфракрасная термография. Термограммы представляют собой изображения в инфракрасных лучах, показывающие картину распределения температурных полей. Трещины, загрязнение и следы перекрытия изоляторов, нарушение целостности провода, а также ослабление арматуры представлены на ИК-снимках горячими точками, что позволяет использовать методы обработки изображений для выявления дефектов [79]. Детектирование дефектов элементов ЛЭП средствами технического зрения позволяет оценить состояние проводящей линии и на основании результатов анализа составить план технического обслуживания по ликвидации повреждений. Рассмотрим подробнее используемые для этого методы распознавания различных элементов конструкции ЛЭП.

Методы распознавания элементов ЛЭП. С развитием технологий управления БПЛА и обработки изображений проверка состояния элементов ЛЭП сводится к разработке специализированных методов анализа аэрофотоснимков. Наиболее перспективными для использования в целях мониторинга ЛЭП представляются методы извлечения и анализа отличительных признаков объектов (feature-based methods), в частности, при помощи методов машинного обучения, включая методы глубокого обучения [80]. В качестве визуальных признаков для этой цели, как правило, используют: цвет [81,82], форму [83], границы (edge) [84], градиент яркости [82,85], текстуру [86], так называемые ключевые признаки (keypoint features) [87,88] и др. Кроме того, для детектирования компонентов линии могут использоваться преобразования Хафа [89], модели нечеткой логики [90] и рецептивного поля [91]. Показатели эффективности рассмотренных методов приведены в табл. 4.

Детектирование изоляторов на изображениях. Для детектирования изолятора на изображении может применяться гистограмма направленных градиентов (Histogram of Oriented Gradients, HOG) [92], которая представляет собой дескрипторы особых точек. Дескрипторы подсчитывают количество направлений градиента в локальных областях изображения. Для фильтрации яркостной составляющей изображения

используется фильтр, скрытые переменные (latent variable) которого определяются при помощи машины опорных векторов (support vector machine, SVM). Совместное использование HOG и SVM позволяет достичь полноты детектирования 93,81% [85].

Детектор Deformable Part Model (DPM) [93] расширяет возможности HOG, так как позволяет работать с объектами, которые имеют высокую степень изменчивости по внешнему виду внутри одного класса, благодаря комбинации нескольких подмоделей. Оригинальный DPM основан на методе скользящего окна и имеет высокую вычислительную сложность, поскольку применяется ко всему изображению, а не к его части. Для уменьшения вычислительной сложности метода сначала осуществляется поиск фрагментов изображений, содержащих опору, затем на полученных фрагментах детектируются изоляторы. По результатам тестирования [85], полнота улучшенного метода составила 98,97%.

Для детектирования изолятора, который частично заслонен другим изолятором, авторы работы [82] разработали метод на основе расчета салиентности (saliency value). Салиентность рассчитывается для двух признаков: цвета и градиента. Для этого сначала пространства признаков разделяются на 12 (для цвета) и 8 (для градиента) областей при помощи метода k-средних. Затем рассчитывается салиентность для обоих признаков и их суммарная салиентность, после чего полученное значение сравнивается с пороговой величиной для локализации фона и изолятора. В работе [94] для локализации стеклянных и керамических изоляторов авторы разработали алгоритм определения признаков цвета и ключевых точек. После построения гистограмм распределения цветов и нахождения ключевых точек к полученным данным применялась пороговая обработка. Результаты экспериментов подтверждают эффективность и надежность алгоритма. Средний показатель обнаружения дефектов в керамике может достигать более 91%, а средний показатель обнаружения дефектов стекла более 92%. В Предлагаемое решение может быть использовано в системе контроля крупномасштабных инфраструктур, например, высоковольтных линий электропередачи электроэнергетических предприятий.

В работе [95] для бинаризации изображения использовался метод Оцу [96], который позволил получить области изображения, в которых расположены изоляторы. После чего для выделения границ применялся метод максимумов модулей вейвлет-преобразования (Wavelet transform modulus maxima method) [97] и преобразование Хафа. Такое решение характеризуется простотой реализации и малой временной сложностью $O(n)$ (где n – количество пикселей). Однако пороговая обработка чувствительна к неравномерной яркости изображения, что может затруднить распознавание изоляторов на сложном фоне. Разработанный метод может использоваться для выявления неисправностей изоляторов, но не способен локализовать их дефекты.

Низкая эффективность методов, основанных на определении признаков цвета, объясняется сложностью определения диапазона цветов при работе со сложным фоном. Кроме того, цветовые признаки в большей степени содержат информацию о глобальных областях, нежели о локальных.

Признаки текстуры изображения были использованы в работах [98,99]. Предложенные решения позволяют локализовать изоляторы с учетом изменения их ориентации. Так метод [99] включает в себя три этапа: корректировку положения изолятора в горизонтальной плоскости, извлечение признака текстуры при помощи дескриптора Local Directional Pattern (LDP) и классификацию полученных признаков на основе SVM. При тестировании предложенного метода значение полноты достигло 94,24%. В последующем исследовании [98] авторы разработали дескриптор RI-LDP (rotation invariant local directional pattern), который инвариантен к вращению изолятора. При этом сократилось количество шагов метода в связи с отсутствием необходимости в корректировке ориентации изолятора. Использование разработанного дескриптора позволило повысить полноту до 95,74%.

В качестве ключевых признаков в работах [87,88] использовались SURF (Speeded up robust features) и разность гауссианов (Difference of Gaussians, DoG) соответственно. Алгоритм локализации изоляторов [88] состоит из трех этапов: обнаружение локальных объектов, описание локальных объектов и сопоставление объектов. Для обнаружения и описания объектов использовался детектор Харриса (Harris affine region detector), после чего полученные признаки сравнивались с признаками из визуального словаря изоляторов (visual vocabulary of insulator), который был сгенерирован на основе обучающей выборки при помощи метода k-средних. Точность распознавания достигла 87%.

Для повышения точности распознавания изоляторов авторы [100] использовали комбинацию нескольких признаков: цвета, формы и текстуры. Однако такое решение привело к высокой вычислительной сложности алгоритма, что не позволяет использовать его в системах инспектирования реального времени. Кроме того, данный алгоритм применим для распознавания только соседних изоляторов.

Помимо вышеперечисленных, для распознавания изоляторов используются классификаторы на основе AdaBoost [101], SVM [102], каскадного классификатора (Cascade classifier) [103] и метода k-ближайших соседей (k-nearest neighbors algorithm, k-NN) [104]. В [101] перед применением классификатора на основе AdaBoost для улучшения изображения проводится выравнивание гистограммы (histogram equalization), после чего изображение преобразуется в бинарное при помощи оптимального порога энтропии (optimal entropy threshold, OET). OET позволяет выделить изолятор на изображении, однако после обработки

изображение остается зашумленным. Для уменьшения шума на изображении применяются стандартные морфологические операции: эрозия, наращивание, замывание и размыкание.

В работе [102] авторы предложили метод обнаружения изоляторов, основанный на слиянии признаков (feature-fusion) при помощи HOG и локальных бинарных паттернов (local binary pattern). После извлечения признаков размерность данных уменьшается при помощи метода главных компонент (principal component analysis), затем для классификации используется SVM. Тестирование на 500 изображениях показало точность классификации 89,1%, что выше, чем при использовании признаков по отдельности: 75,3% и 76,9% для HOG и LBP соответственно.

В работе [103] признаки Хаара (Haar-like feature), интегрального графа (integral graph feature) и признак гистограммы направленного градиента (directional gradient histogram feature) были объединены для обучения каскадного классификатора и SVM. Затем две модели классификаторов использовались для определения местоположения изоляторов на изображении.

Авторы статьи [104] используют в качестве ключевых признаков DoG. На основании DoG определяется круговой (Circular GLOH-like, CGL) дескриптор. Данный дескриптор основан на градиентах изображения, которые вычисляются при помощи оператора Шарпа (Schar operator). После этого размерность данных уменьшается при помощи метода главных компонент. Дескрипторы DoG используются для обучения классификатора k-NN.

Популярным решением в области распознавания образов является использование сверточных нейронных сетей (СНС), например, R-CNN [105], Fast R-CNN [106], Faster R-CNN [42], YOLO [107], R-FCN [108], SSD [109], в сочетании с классификаторами VGG-Net [110] и Inception-V4 [111]. Такие методы осуществляют поиск объектов на изображении путем извлечения многомерных семантических признаков. Например, СНС для распознавания изоляторов, представленная в [112], состоящая из 7 слоев (1 входного, 2 слоев свертки, 2 пулинга, 1 полносвязного слоя и 1 выходного слоя) позволила достичь доли верных распознаваний 89,04%.

Авторы работы [113] предложили оригинальный метод детектирования изоляторов на изображении. Помимо камеры, БПЛА, инспектирующий ЛЭП, оснащен лазером, который генерирует пучок определенной длины волны. Предложенный метод основан на анализе кривых интенсивности пикселей, считываемой между парами спроецированных на изолятор лазерных точек/маркеров (laser spots). В качестве исходных данных используются RGB-изображения с лазерными точками и без них. Локализация лазерных точек на изображении осуществляется при помощи бинаризации. Классификация выполняется посредством обработки кривых интенсивности: усреднения сигнала,

удаления линейного тренда, поиска максимума и минимума. Точность распознавания изоляторов при использовании данного метода составляет 98,982%.

Для повышения эффективности СНС в задаче инспектирования ЛЭП авторы [114] разработали специализированную каскадную архитектуру СНС, которая содержит три ветви, предназначенные для извлечения карты признаков, изменения канала свертки и обеспечения взаимодействия между каналами. По результатам экспериментов, предложенное решение превосходит по точности YOLOv2 (89,83%) и YOLOv3-tiny (52,78%), однако не достигает точности YOLOv3 (90,05%)

В [115] представлен метод детектирования изоляторов на основе сети Faster R-CNN, которая состоит из двух СНС: Region Proposal Network (RPN) и Fast R-CNN. Для предварительного обучения сети использовалась модель Цайлера и Фергуса (Zeiler and Fergus net) [116]. Исходное изображение поступает на вход RPN для определения областей, в которых расположены изоляторы. Полученные области являются входными данными Faster R-CNN, которая рассчитывает вероятность нахождения изолятора в каждой области. По результатам тестирования, время работы предложенного метода составило 0,131 с, средняя точность детектирования – 92,6%. Сеть Faster R-CNN также использовалась в [117] для обнаружения дефектов поверхности изоляторов на высокоскоростной железной дороге и в [118] для обнаружения самопроизвольно взрывающихся стеклянных изоляторов.

В целом, методы на основе СНС не требуют корректировки параметров поиска компонент на изображении после обучения сети, однако для обучения СНС необходимо сформировать репрезентативную выборку, которая содержит изображения различных масштабов и ракурсов, снятые при различных условиях освещения. Создание таких наборов данных является отдельной достаточно трудоемкой задачей.

Детектирование элементов опор на изображениях. Распознавание опор является, пожалуй, наиболее сложной задачей при автоматизированном инспектировании ЛЭП, поскольку конструкции опор отличаются по типу и внешнему виду, что требует разработки специализированных подходов для каждого вида, и могут быть спутаны с похожими на них элементами окружения. Так, например, метод, представленный в [119], применим для распознавания только одностоечных опор типа «Свечка». Для последующего распознавания исходное RGB-изображение конвертируется в пространства HSI и YCbCr. После преобразования снимка каналы цветовых пространств B, S и Cr передаются на вход искусственной нейронной сети, которая выполняет классификацию цветовых признаков на четыре группы: стойка опоры (pole), траверса (crossarm), древесно-кустарниковая растительность. По результатам тестирования, предложенное решение достигло 70% верных распознаваний.

Детектирование металлических опор на изображении может быть основано на определении признаков формы ввиду их характерной конструкции. Так, для детектирования опор воздушных линий электропередач в [120] авторы использовали оператор Кэнни обнаружения границ на изображении и преобразования Хафа для поиска прямых линий. Метод также был дополнен специализированными правилами, которые позволили сократить число ложных распознаваний.

Рассмотрим некоторые методы детектирования опор при помощи машинного обучения. В частности, авторы метода на основе бустинга [121,122] предложили для локализации и сегментации опоры сильный классификатор, полученный в результате обучения 2048 слабых деревьев решений. Для обучения и объединения деревьев решений применялись алгоритмы Aggregate Channel Features (ACF), AdaBoost и RealBoost [123]. Разработанный алгоритм был обучен и протестирован на 1400 кадрах. Средняя ошибка детектирования опор составила 3,25%, а доля ложных распознаваний – 1,5%, что означает, что 3 из 200 фоновых изображений были детектированы как опоры. При этом 4 из 200 изображений опор были детектированы как фон.

Метод распознавания опор, представленный в [124], состоит из трех шагов: предварительной обработки изображения, классификации и постобработки. Предобработка, как и в [120] заключается в бинаризации и обнаружении вертикальных линий при помощи преобразования Хафа. Для классификации используется алгоритм Region Proposal, основанный на методе скользящего окна, гистограмма направленных коэффициентов HOG и многослойный перцептрон (Multi-Layer Perceptron).

Метод распознавания опор на основе глубокого обучения представлен в [125]. Авторы использовали YOLO v3. На вход сети подается RGB-изображение, из которого извлекается карта признаков. Далее изображение делится на квадратные ячейки. В случае, если ячейка имеет координаты центра объекта, которые входят в контрольный набор данных, она является кандидатом для потенциального детектирования опоры. В ней строятся три рамки (bounding boxes) размером 13×13 , 26×26 и 52×52 , для каждой из которых при помощи коэффициента Жаккара (Jaccard index) определяется вероятность присутствия опоры. Точность обнаружения этого алгоритма составляет 90%. Этот метод может быть применен для быстрой оценки потерь электросети после аварии, а также для быстрого обнаружения опор ЛЭП.

Детектирование проводов на изображениях. При детектировании проводов ЛЭП часто вводится допущение, что они представляют собой прямые, которые параллельны друг другу. Это приводит к ограничению, накладываемому на ракурс съемки: съемка должна провалиться только верху. Так, метод, основанный на определении признаков формы, показан в

работе [126]. Для выделения границ авторы использовали алгоритм Edge Drawing, который позволили определить прямые линии. Затем для окончательного детектирования применялся набор правил/шагов (hand-craft rules): разделение изображения на вертикальные и горизонтальные сегменты, удаление малых сегментов, группировка сегментов и определение сегментов, на которых присутствует требуемое число параллельных прямых. Новый алгоритм обнаружения линии электропередачи на основе технического зрения (PLineD), способен повысить надежность обнаружения даже при наличии фонового шума. Алгоритм протестирован на изображениях набора данных с различными фонами и погодными условиями. Результаты экспериментов показали, что данный подход успешно идентифицирует линии электропередачи даже при наличии опор.

В работе [127] для распознавания опор использовались операторы Кэнни и Собеля для выделения границ, а также преобразования Хафа для поиска прямых линий. Кроме того, авторы представили формулы для расчета оптимальных параметров выделения границ, которые позволяют ослабить фоновые помехи. Система обеспечила полностью автоматизированное отслеживание линий электропередач в Далласе протяженностью 15 км со скоростью до 30 км/ч.

Метод детектирования грозозащитных тросов на основе глубокого обучения представлен в [128]. Авторы разработали генеративно-сопоставительную сеть с условием (Conditional Generative Adversarial Network, cGAN). Использование генеративной сети позволило увеличить обучающую выборку до 1000 изображений. Доля верных распознаваний решения составила 94,8%, при этом cGAN превзошла по точности сети PCANet (86,8%) и ENet (95,4%).

Таким образом, существующие методы детектирования проводов ЛЭП позволяют автоматически в реальном времени отслеживать и обнаруживать их на изображениях.

Детектирование элементов арматуры на изображениях. В современных исследованиях зачастую в качестве арматуры рассматриваются распорки проводов в расщепленной фазе и виброгасители. Метод распознавания арматуры на основе определения признаков формы описан в [129]. Данный метод содержит три уровня обработки изображения: сегментацию, поиск параллельных и перпендикулярных линий для распознавания проводов и опоры, а также локализация арматуры. Участок разрыва двух прямых линий считался местом расположения виброгасителя или распорки. Результат распознавания изолятора показывает, что он в значительной степени достигается за счет ограничения положения и локального контура.

Авторы [130] разработали метод локализации виброгасителя на основе определения признаков текстуры интегрального изображения. Для

извлечения признаков Хаара из скользящего окна использовался классификатор Adaboost. Обучающая выборка включала в себя 1518 изображений с виброгасителями и 2999 фоновых изображений. По результатам тестирования на 100 изображениях, доля истинно-положительных классификаций составила 92,48%.

К методам глубокого обучения относится решение, представленное в работе [131]. Сверточная нейронная сеть (CNN) превосходно работает в области распознавания объектов. При обнаружении объектов сверточные нейронные сети на основе областей (RCNN) извлекают область, которая может содержать объект, из изображений. Однако вычисления такие вычисления являются весьма дорогостоящими, что не могут использоваться в практических проектах. С помощью Fast R-CNN и Faster R-CNN можно решить эту проблему, изменяя способ поиска объекта. Fast R-CNN и Faster R-CNN экономят много времени и могут выполнять обнаружение объектов в реальном времени. Для детектирования виброгасителей, распорок и дугогасящих колец (arcing ring) на изображении авторы использовали Faster R-CNN. Также в данном исследовании были проанализированы такие методы, как SPPNet и DPM. Результаты тестирования показали, что метод Faster R-CNN может одновременно обнаруживать различные электрические устройства на одном изображении в течение 80 мс и достигать точности 92,7% на стандартном тестовом наборе, что имеет большое преимущество при проверке ЛЭП. Тестирование, проведенное на 1500 изображениях, показало полноту метода 84,03%.

В качестве показателей эффективности представленных решений используется несколько показателей: доля верных детектирований (accuracy), полнота (recall), точность (precision), среднее значение точности (mAP) доля истинно-положительных классификаций (false positive per image).

Таблица 4 – Сравнительная таблица методов детектирования различных элементов ЛЭП

Метод	Выборка	Accuracy, %	Recall, %	Precision, %	False positive per image, %
Изолятор					
HOG+SVM [85]	Test: 1755		93,81		0,84
DPM [93]	Test: 1755		98,97		2,72
[99]	Test: 325		92,24		

[98]	Test: 395		95,74		
[88]	Test: 100 Train: 300		92	87	
HOG+LPB [102]	Test: 500 Train: 2800	83,5		89,1	2,1
[104]	Test: 400			92,6	99,7
[113]	Test: 2386	96,101	96,317	98,982	
[107]	Test: 1166	86,667	89,412	89,412	
SSD [109]	Test: 1166	89,629	92,941	90,804	
CNN [112]	Test: 1305 Train: 1220	89,04	89,25	71,35	
CNN [114]	Test: 1356 Train: 2675	mAP:89,96			
Faster R-CNN [43]	Test: 1166	94,074	98,823	90,308	
Faster R-CNN [115]	Test: 300 Train: 1000			mAP: 92,6	
Faster R-CNN [117]	Test: 12000 Train: 6000			mAP: 99,8	
Faster R-CNN [118]	Test: 208 Train: 412		96,6	97,1	
Опора					
[122]	Test: 1400	96,75			1,5
[119]	Test: 700			70	
Canny [120]	Test: 2 videos			100	
[Martinez C. et al.]	Test: 3655 Train: 14620	95,63			59
YOLO v3 [59]	Test: 1478 Train: 11951			mAP: 90,45	

Провода					
PLineD [126]	Test: 82				
cGAN [128]	Test: 1000 Train: 5000	94,8			
Арматура					
MLP [129]	Test: 2000	80,42			0,934
Harr+AdaBoost [130]	Test: 100 Train: 4517			True positive rate:92,48%	
Faster R-CNN [131]	Test: 1500 Train: 4500		84,03		

Использование методов машинного обучения позволяет повысить точность детектирования элементов ЛЭП по сравнению с методами, основанными на определении признаков. Методы глубокого обучения обеспечивают высокие показатели точности распознавания по сравнению с альтернативными методами. Далее рассмотрим методы детектирования дефектов элементов ЛЭП.

Методы детектирования дефектов элементов ЛЭП. Детектирование дефектов элементов ЛЭП позволяет оценить их состояние и на основании результатов анализа составить план технического обслуживания по устранению повреждений. В соответствии с используемым двухэтапным подходом к мониторингу ЛЭП, фрагменты изображений, содержащие компоненты линии, используются для выявления дефектов данного компонента. Задача разработки методов детектирования дефектов более сложная по сравнению с распознаванием элементов ВЛ, поскольку каждый элемент может иметь несколько разных характерных дефектов. Характеристики методов детектирования дефектов показаны в табл. 5.

Таблица 5 – Методы детектирования дефектов элементов ЛЭП

Метод	Выборка	Accuracy, %	Recall, %	Precision, %	Average runtime /s
Отсутствие тарелки изолятора					
Computer vision+ DPM [85]	Test: 480			false alarm rate: 9,63%	
ML+Mathematical morphology [82]	Test: 100	92,4	43	67,2	0,525

ML+Mathematical morphology [94]	Test: 100	90,6	52,1	77,8	0,677
Grab cut	Test: 90		91,7	95,6	0,127
U-net	Test: 55 Train: 165		95,5		
R-FCN	Test: 822 Train: 2626			mAP: 90,5	
cascading CNN	Test: 264 Train: 7092		96	91	
Сколы изолятора					
LBP-HF+SVM	Test: 80	93,33			
VGG-19	Test: 2080 Train: 50560	92,69			
Inception-v3	Test: 2080 Train: 50560	83,41			
ResNet-50	Test: 2080 Train: 50560	26,01			
DMNN	Test: 1000 Train:		98,6	92,2	
Обледенение изолятора					
LBP+ULBP					0,015
Падение опоры					
YOLO v3	Test: 1478 Train: 11951		91	90 mAP: 90,45	
Faster RCNN	Test: 1478 Train: 11951		67	75 mAP: 71,94	
Коррозия опоры					
DELM+LRF	Test: 560 Train: 2237			F1 score: 79,6	
DELM+LRF	Test: 603 Train: 2414			F1 score: 88,8	
Гнезда птиц на опоре					
SVM	Test: 200 Train: 2972	97,33	96	98,63	
Повреждение/обрыв проводов провода					
[132]	Test: 100			Recognition rate: 100%	
GVN	Test: 400	85,5			
Посторонний предмет на проводе					
HOG+SVM	Test: 335 Train: 301	84,3			0,539
SSD	Test: 1500 Train: 4500			mAP: 85,2	
Деформация арматуры					

Faster R-CNN	Test: 500 Train: 1000		83,4		
Отсутствие деталей арматуры					
CNN	Test: 752 Train: 1900	96,54			
Растительность на трассе					
PLAMEC		93,2			

Детектирование дефектов изоляторов. Разрушения тарелки изолятора и наличие постороннего предмета между тарелками является наиболее распространенными дефектами. Поверхность фарфорового изолятора имеет высокую отражающую способность, что позволяет анализировать яркость пикселей на изображении в оттенках серого. Так авторы работы [85] исследовали период функции изменения яркости пикселей (local intensity period estimation) для детектирования двух упомянутых ранее дефектов. В зависимости от значения изменения периода яркости можно определить отсутствие тарелки изолятора или наличия постороннего. Метод оценки показал наилучшие результаты с самым низким уровнем ложных срабатываний на уровне 9,63% (44 из 457 хороших изоляторов были ошибочно классифицированы как дефективные).

Метод детектирования отсутствия тарелки (стеклянного) изолятора представлен в [82]. Для определения расстояния между тарелками и локализации дефекта авторы использовали операции математической морфологии (Mathematical morphology): эрозию (Erosion), наращивание (dilation) и замыкание (closing). Изменение расстояния между тарелками свидетельствовало о наличии дефекта. Операции математической морфологии также использовались в работе [94]. Такое решение позволило достичь точности детектирования 90,6% и может применяться для инспектирования стеклянных и фарфоровых изоляторов.

Морфологические операторы применялись в работе [114]. Авторы представили метод, который состоит из трех этапов. На первом этапе используется алгоритм Grab cut для сегментации изображения и локализации изолятора. Затем для выделения границ предположительно поврежденных изоляторов применяются морфологические операторы. Последний этап заключается в окончательной проверке кандидатов на наличие дефектов при помощи метода k-средних. Предложенный метод показывает результаты обнаружения неисправностей, которые достигают показателя точности 98,3%. Таким образом, метод обеспечивает более высокую точность и меньшее время работы в отличие от работ [94] и [82].

В [118] отсутствие тарелки изолятора основано на использовании полностью сверточной нейронной сети (Fully Convolutional Network, FCN). Авторы разработали сеть U-net, которая представляет собой усовершенствованную модель VGGNet-16. Тестирование на 55 изображениях показало полноту метода 95,5%.

Авторы [133] для детектирования данного дефекта использовали сеть Region-based Fully Convolutional Networks (R-FCN). R-FCN состоит из двух моделей RPN для поиска областей и FCN Resnet101 для получения карты признаков. Для тестирования метода была сформирована выборка размеров 822 изображений разного размера. Среднее значение доли верных распознаваний составило 90,5%.

Для детектирования отсутствия тарелки изолятора авторы [134] разработали каскадную нейронную сеть. Первая СНС предназначена для локализации изолятора на изображении и основана на VGGNet. Вторая сеть используется для распознавания дефекта и использует модель ResNet. Точность предложенного решения достигает 96%.

Другим распространенным дефектом изоляторов является наличие сколов на поверхности тарелок. Для оценки состояния изоляторов со сколами авторы [135] разработали метод на основе многоцелевого программирования (MOP). Метод k-средних применялся для поиска изоляторов на изображении ЛЭП. Затем осуществлялось извлечение признаков при помощи гистограммы локальных бинарных шаблонов (Local Binary Pattern Histogram Fourier, LBP-HF). Далее для классификации полученных признаков использовался MOP. Предложенное решение предназначено для классификации изоляторов на три группы: без повреждений, с незначительными и опасными повреждениями. Эффективность данного метода составляет 93,33%.

В работе [136] для классификации изоляторов и распознавания сколов на поверхности изолятора использовались СНС. Были рассмотрены четыре класса штыревых изоляторов ЛЭП 15 кВ: фарфоровый одноцветный, фарфоровый двухцветный, полимерный и стеклянный. Обучающая выборка состояла из 2560 изображений изоляторов, полученных в реальных условиях и лаборатории. Для расширения выборки был использован генератор, который позволили увеличить количество изображений на 48 000. Процесс генерации синтетических данных включал в себя сегментацию изображения для выделения изолятора, провода и спиральной вязки (спиральных зажимов) и детализацию изображения, которая

заклучалась в наложении масок зажимов и проводов, изменении яркости, масштаба, угла наклона и смещении. С целью определения наиболее подходящей СНС для работы с изоляторами были протестированы три модели: VGG-19 [137], Inception-v3 [138] и ResNet-50 [139]. VGG-19 имеет 19 полносвязных слоев и малую размерность фильтров сверточных слоев (3×3), что позволяет уменьшить количество параметров и, соответственно, время из обработки. Inception-v3 также характеризуется уменьшенной размерностью фильтра, а также наличием пакетной нормализацией (batch normalization) для предобработки подаваемых в слой данных. ResNet-50 построена по аналогии с архитектурой VGG-19, но имеет короткие пути (пропуски соединений), которые позволяют решить проблемы исчезающего градиента (vanishing gradient) и взрывающегося градиента (exploding gradient) при обучении. По результатам тестирования, наибольшую точность распознавания имеет СНС VGG-19. При решении задачи классификации изолятора точность данной модели составила 92%, при классификации изолятора и детектирования его дефектов – 85%.

С целью повышения точности детектирования СНС авторы статьи [117] объединили глубокий классификатор материалов (deep material classifier, DMC) и глубокий шумоподавляющий автокадировщик (deep denoising autoencoder, DDAE), которые были интегрированы в многозадачную глубокую нейронную сеть (deep multitask neural network, DMNN). DMC предназначен для распознавания изолятора на изображении. Далее автокадировщик восстанавливает сегменты изображения и рассчитывает карту ошибок восстановления. На основе карты ошибок восстановления и ошибок классификации определяются аномалии. Повреждения изолятора выявляются путем сравнения результатов работы классификатора и полученных аномалий. По словам авторов, при обучении DMNN не требуются изображения поврежденных изоляторов.

Наличие гололеда на изоляторах приводит к дополнительным механическим нагрузкам. В результате увеличения массы изоляторов повышается риск деформации арматуры, кроме того ухудшаются защитные свойства изоляторов. В [140] представлен метод детектирования обледенения изолятора на основе определения признаков текстуры. Для извлечения признаков использовались унифицированные (Uniform Local Binary Patterns) и усовершенствованные локальные бинарные шаблоны (Improved Uniform Local Binary Patterns). Метод позволяет определить шесть типов обледенения: прозрачный лед, непрозрачный лед, сильная,

средняя и слабая изморозь, а также иней и снег. Для определения типа обледенения рассчитывался коэффициент корреляции между гистограммами признаков текстуры изображения тестовой выборки и изображения контрольной выборки. При применении IULBP результаты коэффициента корреляции определили определенные типы льда. Результаты показали, что IULBP больше подходит для распознавания типов льда на изоляторах, чем ULBP, так как обеспечивает большую точность.

Авторы [141] для детектирования наледи использовали алгоритм сегментации GrabCut. Детектирование дефекта основано на расчете геометрических параметров изолятора: расстояния между тарелками и расстояния от крайней точки до шапки изолятора. Тестирование проводилось с использованием метеорологических данных и показало работоспособность решения.

Детектирование дефектов опор. Падение опоры приводит к обрыву проводов ЛЭП и отключению потребителей от электросети. Падение опоры может служить последствием развития других неисправностей, например, загнивания деревянных частей, коррозии металла. В [128] для детектирования упавших опор использовались две модели нейронных сетей YOLO v3 и Faster RCNN. Тестирование на 1478 изображениях показало, что YOLO v3 превосходит Faster RCNN по точности на 15%.

Предотвратить падение опоры возможно путем своевременного распознавания коррозии металлических элементов опоры. Для решения данной задачи авторы работ [142,143] разработали метод на основе экстремального глубокого машинного обучения (Deep Extreme Learning Machine). Извлечение признаков осуществляется при помощи локального рецепиентного поля (Local Receptive Field), которое сочетает свойства слоев свертки и пулинга. Такое решение позволяет использовать небольшие обучающие выборки. Результаты экспериментов показывают, что эффективность DELM-LRF была выше, чем у других сравнительных методов ELM-LRF, DELM, KELM, ELM, SVM и CaffeNet-CNN. В [143] авторы добавили в модель скрытый слой, который позволил помимо изображений использовать для обучения текстовые данные инспектирования.

Также к дефектам опор ЛЭП относят наличие птичьих гнезд. Контакты птиц или материала гнезд с элементами ЛЭП могут являться причиной короткого замыкания, которые приводят к отключению

потребителей. В [144] описан алгоритм детектирования гнезд, который состоит из нескольких этапов. Первый этап заключается в бинаризации изображения путем применения динамического порога. Далее извлекаются признаки: доля белых областей, доля белых пикселей, признаки проекции и улучшенные признаки неровностей. После полученные признаки классифицируются при помощи SVM. Выбранные признаки обеспечивают большую точность детектирования по сравнению с методом на основе HOG (65,91% precision).

Детектирование дефектов проводов. В современных исследованиях освещены методы детектирования двух дефектов проводов: повреждение проволок и наличие постороннего предмета на проводах. Зачастую данные методы основаны на сегментации изображения и последующего определения аномального сегмента при помощи правил (handcraft rules). Так, в [132] для обнаружения границ использовался оператор Кэнни. Затем при помощи улучшенного правила Фримена (Improved Freeman Rule, IFR) детектировались оборванные проволоки провода. Метод был протестирован на 100 изображениях. Процент правильно распознанных дефектов составил 100%.

Метод, представленный в [145], основан на определении признаков текстуры изображения. исходное изображение преобразуется в изображение в оттенках серого при помощи нормализации (Grayscale Variance Normalization, GVN). Затем провод локализуется на основе адаптивной пороговой сегментации с морфологическими операторами. Детектирование обрыва проволок проводов осуществляется путем анализа формы кривых распределения уровня яркости (Gray value distribution). Изображение провода без повреждений имеет кривую прямоугольной формы. При наличии дефекта кривая становится пилообразной. Средняя точность обнаружения неисправностей при идентификации обрыва проводника может достигать 90,45%, в то время как средняя точность обнаружения неисправностей при идентификации дефектов поверхности проводника 92,05%.

Для детектирования постороннего предмета на проводе авторы [146] разработали метод на основе HOG и SVM. Для предварительной обработки изображения использовался медианный фильтр. Затем извлекались и классифицировались признаки HOG при помощи построения ориентированного ациклического графа (Directed Acyclic Graph) и SVM. С

помощью экспериментальных результатов было определено, что пиксельные ячейки HOG имеют размер 32×32 , при этом скорость обработки каждого изображения составила 0,539 с, а средняя точность распознавания составила 84,3%.

Авторы [147] для обнаружения постороннего предмета на проводе использовали CHC SSD. Результаты экспериментов показывают, что метод SSD может достигать точности 85,2% при скорости 26 кадров в секунду.

Детектирование дефектов арматуры. Существует несколько работ, посвященных детектированию дефектов арматуры. Основными дефектами являются поломка и отсутствие деталей. В для обнаружения деформированных деталей распорок проводов авторы [148] разработали метод на основе оператора Кэнни и преобразования Хафа. После выделения границ определялись области-кандидаты при помощи скользящего окна. Определение поврежденной детали основано на правиле: если количество частей распорки больше 1, то деталь считается поврежденной. Результаты экспериментов успешно продемонстрировали эффективность предложенного метода.

В работе [149] для детектирования поврежденных виброгасителей авторы использовали Faster R-CNN. По результатам тестирования на 500 изображениях, полнота предложенного решения составила 83,4%.

Для детектирования отсутствия соединительных деталей арматуры (болтов) авторы [150] разработали метод на основе СНС. Для локализации арматуры на изображении применялся классификатор Adaboost. Затем полученные фрагменты использовались в качестве входных данных восьмислойной СНС для классификации их по трем категориям: арматура с повреждениями, арматура без повреждений и фон. Разработанный метод имеет точность детектирования 96,54%.

Детектирование древесно-кустарниковой растительности на трассе. При вводе ЛЭП в эксплуатацию и периодически в процессе работы на трассе ЛЭП проводится измерение ширины просеки, высоты деревьев и кустарников под проводами, расстояний от элементов линии до стволов деревьев и их кроны. Зачастую для детектирования деревьев в качестве исходных данных используется стереопара. Методы детектирования растительности [151,152] включают несколько шагов: предобработки изображений, распознавания проводов линии и обнаружение растительности (фона). После обнаружения растительности вычисляется

расстояние от проводов до деревьев на основании трехмерной реконструкции окружения. Главным недостатком такого решения является потребность в дополнительной камере, что приводит к утяжелению аппаратной части БПЛА и повышает стоимость системы мониторинга. Далее приведем методы детектирования дефектов элементов ЛЭП на УФ-изображениях.

Методы детектирования дефектов элементов ЛЭП на УФ-изображениях. Изображения в УФ-спектре используются для выявления коронных разрядов на проводах и изоляторах. Излучаемые коронным разрядом частицы имеют длину волны, характерную для УФ-части спектра света 230–405 нм [153]. Солнечное излучение вызывает помехи, поэтому пригодна только часть спектрального диапазона для получения чистого сигнала в диапазоне 240–280 нм. Однако в данной части спектра интенсивность излучения короны слабее, чем в диапазоне 290–400 нм, поэтому для получения высококонтрастных изображений используются УФ-усилители (UV solar blind image intensifiers), а также солнечно-слепой полосный фильтр (solar blind band pass filter) [154]. Высокий коэффициент усиления (обычно 10⁶ ph/ph) значительно затрудняет обработку изображения, поскольку приводит к представлению всех разрядов в виде ярких белых пятен одинакового размера (blobs), что не позволяет оценить интенсивность излучения и степень повреждения [155]. Кроме того, усиление сигнала не гарантирует отсутствие фонового шума, в том числе темнового тока (dark current) и утечки фотонов (leakage photons) [156].

Тем не менее существуют методы классификации повреждений элементов ЛЭП, вызывающих коронный заряд. Данные методы зачастую основаны на извлечении признаков из серии изображений короны при помощи алгоритмов машинного обучения. Так в работе [157] представлен алгоритм детектирования разрядов, основанный на модифицированном преобразовании Хафа (modified Hough transform) и предназначенный для мониторинга тяговых электросетей при помощи поездов (railway inspection) [158]. В качестве входных данных использовалось изображение короны в градациях серого. Так как размер ярких пятен (blobs) не позволяет отличить излучение короны от фонового шума, проводится предобработка изображения в виде расчета центров (centroids) данных пятен. Детектирование коронных разрядов основано на сравнении положений центров пятен на изображениях и отслеживании их траекторий при помощи

преобразования Хафа. Пятна с прямолинейными траекториями помечаются как коронный разряд. Для уменьшения вероятности ложного распознавания вводятся ограничения на расстояние от начала координат до прямой, угол между х-осью и нормальную к прямой, а на направление движения центра пятна. Разработанный алгоритм позволил сократить в 5 раз число ложных распознаваний короны (в час) по сравнению со стандартным распознаванием Хафа. Главным недостатком предложенного решения является возможность его применения только при прямолинейном движении камеры вдоль трассы ЛЭП.

Аналогично преобразованию Хафа алгоритм детектирования разрядов на УФ-изображении [155] содержит процедуру голосования точек. На вход алгоритма поступает серия изображений в оттенках серого с обнаруженными пятнами, а также информация о калибровке камеры. Точки пятен проецируются на трехмерное пространство как отрезки с фиксированной *depth of interest*. Затем точки полученных отрезков проецируются обратно на изображение, сопоставляются с исходные точками с заданной точностью (допустимым отклонением) и накапливают голоса по всем кадрам серии. Такое решение позволяет отследить развитие короны во времени. Однако полученный результат зависит от величины допустимого отклонения, принятой при сопоставлении проекций и исходного изображения.

В исследовании [159] авторы также разработали алгоритм обнаружения разрядов на УФ-изображении. Исходный кадр был преобразован в изображение в оттенках серого, после чего для устранения фонового шума использовался медианный фильтр (*median filter*). Далее к полученному изображению применялась бинаризация, что позволило определить критерий детектирования разряда. Данный критерий представляет собой отношение суммарного числа пикселей со значением «1» (светящаяся область УФ-разряда) к общей наблюдаемой площади (в пикселях). При превышении критерия порогового значения разряд считался дефектом оборудования. Эффективность использования данного критерия для выявления дефекта объясняется его согласованностью с амплитудным значением тока разряда.

Помимо отношения числа пикселей (*UV image area ratio*) для диагностики неисправностей по УФ-изображению могут использоваться площадь и диаметр разряда (*ultraviolet flare area and flare diameter*) [160]. В этом случае как и ранее представленных алгоритмах исходное изображение

преобразуется в изображение в оттенках серого при помощи адаптивной пороговой сегментации (dynamic threshold segmentation), а затем в бинарное изображение. При этом для выделения границ и повышения резкости изображения был использован дискретный оператор Лапласа (Laplacian image enhancement / Discrete Laplace operator). Кроме того, были определены пороговые значения площади разряда, которые позволяют определить состояние изоляции: нормальное, хорошее, наличие микротрещин, деградация, старение (normal good Micromark, degradation Serious aging).

Также в качестве показателя интенсивности короны может применяться число фотонов излучения в минуту, которое измеряется УФ-камерой [161]. Число фотонов до 1000 (1 класс) свидетельствует о необходимости наблюдения за будущей активностью каждые два года. При числе фотонов 1000-5000 необходима постоянная проверка. Число фотонов свыше 5000 говорит о потребности в срочном ремонте или замене поврежденных элементов. Однако результат регистрации фотонов зависит от влажности воздуха, температуры окружающей среды, давления, расстояния обнаружения и коэффициента усиления камеры. Главным недостатком представленных исследований является отсутствие количественной оценки работы алгоритмов и методов, что не позволяет выбрать наиболее предпочтительное решение.

В работе [162] авторы анализируют состояние изоляторов и проводов на основе величины интенсивности разряда. Для оценки данного параметра была разработана модель регрессии опорных векторов (support vector regression, SVR), которая учитывает параметры УФ-камеры. Для оптимизации параметров ядер и величины вознаграждения использовался генетический алгоритм. Погрешность оценки интенсивности разряда составила менее 9%.

БПЛА могут служить платформой для автономного обнаружения и определения местоположения высоковольтного коронного разряда. Например, при помощи обработки изображений можно автоматизировать локализацию разряда и своевременно устранять серьезные последствия. Методы обработки УФ-изображений представлены в небольшом количестве. Тем не менее, инспектирование состояния ЛЭП с помощью данной технологии является многообещающей и перспективной областью исследования. Методом детектирования с наибольшей эффективностью для УФ-спектра является метод SVR. Рассмотрим также детектирование дефектов элементов ЛЭП на ИК-изображениях.

Методы детектирования дефектов элементов ЛЭП на ИК-изображениях. Съемка в ИК-спектре позволяет выявить дефекты элементов ЛЭП, которые не могут быть детектированы на изображениях в видимом спектре. Обработка таких изображений является важным инструментом для прогнозирования и предотвращения дефекта ЛЭП в виде горячей точки. Наличие горячих точек свидетельствует о нарушении температурных режимов работы провода, изоляторов и соединительных деталей (рис. 22).

В [163] для детектирования горячих точек использовалась пороговая обработка. При этом метод не позволяет определить поврежденный элемент и тип дефекта.

Метод поиска горячих точек на ИК-изображении, предложенный в [164], включает в себя несколько этапов. Первый этап заключается в преобразовании исходного изображения в изображение в оттенках серого. Далее для ослабления действия фоновых помех используется фильтр Гаусса. Затем осуществляется бинаризация полученного изображения при помощи метода Оцу с целью выделения элементов ЛЭП. Последний этап заключается в пороговой обработке для локализации горячих точек. Метод на основе бинаризации и пороговой обработки также показан в [165]. Для тестирования алгоритма использовался набор ИК-изображений, полученных при обследовании ЛЭП. Из полученных результатов можно сделать вывод, что в большинстве случаев горячие точки были обнаружены правильно.

Приведенные методы могут сочетаться с методом распознавания элементов ЛЭП на ИК-изображении на основе модели СНС YOLO [81]. Представленный подход определяет координаты, угол ориентации и тип класса каждой части оборудования. Эксперименты с набором данных показывают, что метод устойчив к шуму, а средняя точность распознавания такого решения достигает 93,7% (mAP).

Метод распознавания изоляторов на термограммах показан в работе [166]. Авторы использовали метод скользящего окна для поиска регионов-кандидатов. Из каждого региона извлеклись признаки при помощи пулинга бинарных признаков (Binary Feature Pooling). После этого проводилась классификация признаков с использованием SVM. Окончательный выбор регионов, в которых расположены изоляторы, осуществлялся на основании проверки отношений геометрических параметров изоляторов. Точность (precision) предложенного метода составила 89,1%.

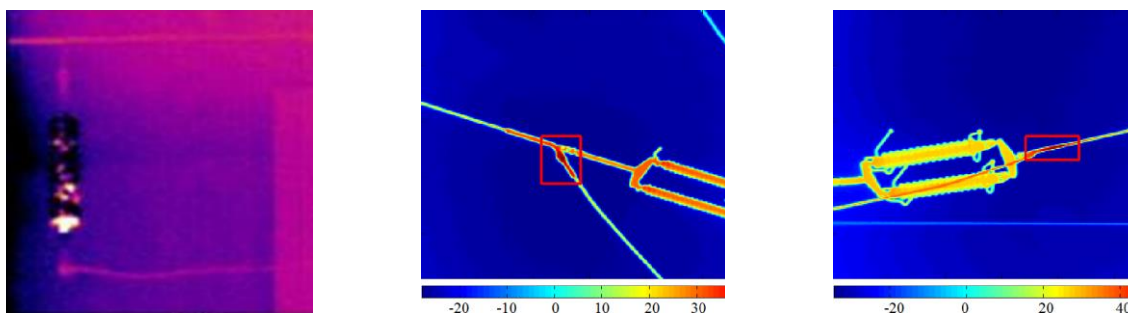


Рисунок 22 – Примеры визуализации дефектов на ИК-изображениях

Для детектирования горячих точек, первым делом необходимо определить линии электропередач. Для этого можно использовать видимые изображения для извлечения ЛЭП и проржавевших изоляторов, а следующим шагом при помощи ИК-изображений выявлять горячие точки.

На основе анализа всех рассмотренных подходов к детектированию дефектов элементов ЛЭП были выбраны наиболее эффективные из них на основе приведенных в источниках данных о показателях их эффективности (табл. 6).

Таблица 6 – Наиболее эффективные методы детектирования дефектов ЛЭП.

Дефект	Спектр съемки	Метод/подход к детектированию	Причины возникновения дефекта
Коронный разряд на проводах и изоляторах	УФ	SVR	Атмосферные перенапряжения, атмосферные осадки, повреждения поверхностей провода и арматуры изоляторов
Провода и тросы			
Обрыв проводов и тросов	В	GVN	Сильный ветер, гололед, падение деревьев
Оплавление проволок провода	ИК	Оцу + пороговая обработка	Коммутационные перенапряжения
Нарушение целостности провода	ИК	Оцу + пороговая обработка	Усталость металла вследствие вибраций
Наличие посторонних объектов	В	HOG+SVM, SSD	Природный и человеческий факторы
Изоляторы			
Загрязнение поверхности изоляторов	УФ ИК	SVR Оцу + пороговая обработка	Продукты отработки промышленных предприятий, пыль почвы и морской воздух, содержащий соли
Отсутствие тарелки	В	Grab cut, cascading CNN	Атмосферные перенапряжения, коммутационные перенапряжения
Сколы	В	LBP-HF+SVM, DMNN, VGG-19	

Обледенение	В	LBP+ULBP	Погодные условия
Опоры			
Наклон, смещение в грунте, падение	В	YOLO v3	Ветровые нагрузки, гололед
Коррозия металла	В	DELM+LRF	Высокая влажность воздуха, примеси и твердые частицы в атмосфере
Птичьи гнезда	В	SVM	—
Арматура			
Трещины, перетирания и деформация отдельных частей	В ИК	Faster R-CNN Оцу + пороговая обработка	Износ, старение металла, ветровые нагрузки
Отсутствие деталей	В	CNN	
Трасса			
Наличие посторонних объектов: строений, стогов сена, деревьев	В	Стереозрение+PLAMEC	Посторонние воздействия, стихийные явления

Проведенный обзор методов детектирования элементов ЛЭП на изображениях в видимом спектре показал, что большинство методов, основанных на определении признаков, и методов машинного обучения чувствительны к сложным фоновым помехам, ракурсу и дальности съемки. Такие решения характеризуются высокой трудоемкостью реализации, однако не они не требуют больших обучающих выборок. Методы глубокого обучения имеют большую точность распознавания, тем не менее, данные методы также имеют ограничения в применении, поскольку в открытом доступе представлено мало наборов данных аэрофотоснимков.

Среди методов распознавания элементов ЛЭП преобладают исследования, посвященные детектированию изоляторов. Это связано с тем, что вне зависимости от класса напряжения линии и материала все изоляторы имеют одинаковую форму. Кроме, того длина гирлянды изоляторов высоковольтной ЛЭП превышает 1 м, поэтому в отличие от крепежных элементов данный элемент конструкции можно распознать на большом расстоянии. Детектирование опор ЛЭП существенно осложняется многообразием их форм и материалов. В пределах одного участка линии используются опоры различных типов. Поэтому большинство существующих методов детектирования опор основаны на поиске пересечений вертикальных (стоек) и горизонтальных (траверсы) линий. Такое решение не позволяет распознавать металлические и композитные опоры сложных форм. Методы распознавания проводов также основаны на их представлении в виде параллельных прямых. Таким образом, для успешного детектирования съемка ЛЭП должна проводиться только сверху.

Число исследований, посвященных детектированию дефектов ЛЭП, меньше количества работ по обнаружению элементов. Во-первых, это связано с недостатком изображений неисправностей. Во-вторых, несколько типов дефектов соответствуют одному элементу. В-третьих, один и тот же дефект может проявляться по-разному. Упомянутые причины ограничивают использование методов глубокого обучения и делают предпочтительным использование методов машинного обучения или методов на основе определения признаков. Все рассмотренные работы нацелены на распознавание только одного дефекта. При этом многие повреждения элементов ЛЭП не освещены в современной литературе, например, недопустимые изменения стрелы провеса и расстояний между проводами, недопустимое отклонение стоек опор и изоляторов от оси, ожоги изолятора, обгорание деревянных деталей опоры и пр.

Недостаток в методах детектирования некоторых дефектов может компенсировать обработка УФ и ИК-изображений. Однако исследований в данном направлении представлено мало. Большинство методов построено на простых принципах и не имеют количественных показателей эффективности, что не позволяет оценить их эффективность.

Кроме того, для некоторых рассмотренных исследований характерно отсутствие единой системы оценки эффективности методов. В качестве показателей эффективности разработанных решений используется несколько показателей: доля верных детектирований, полнота, точность, среднее значение точности (mAP) доля истинно-положительных классификаций, F-мера, что затрудняет сравнительный анализ методов. Помимо этого, для оценки разработанных решений авторы использовали собственный набор данных.

На основе анализа всех рассмотренных подходов к детектированию дефектов элементов ЛЭП были выбраны наиболее эффективные, на основе наибольших показателей эффективности: для видимого спектра GVN, HOG+SVM, SSD, Grab cut, cascading CNN, LBP-HF+SVM, DMNN, VGG-19, LBP+ULBP, YOLO v3, DELM+LRF, SVM, Faster R-CNN, CNN, стереозрение+PLAMEC. Методом детектирования с наибольшей эффективностью для ИК-спектра является Оцу + пороговая обработка, а для УФ-спектра – метод SVR.

Учет параметров и характеристик электрических сетей позволит вовремя выявлять аварийно-опасные участки для их обслуживания и

своевременного ремонта, что также будет характерно и для городских сетей освещения [49].

Внедрение систем технического зрения, искусственного интеллекта, анализа Big Data, робототехнических комплексов позволит собирать больше информации о техническом состоянии воздушных линий электропередач, грозотросов, изоляторов и опор, анализировать и получать информацию в результате преобразований и модуляций не только о необходимости реновации электрооборудования, но и о проведении дополнительных диагностик для предотвращения аварий, вызываемых перегрузками.

Системы мониторинга воздушных линий электропередачи необходимы для поддержания устойчивой работы и прогнозирования режимов управления электрическими системами. Приведенные сведения представляют текущее состояние системы ЛЭП и имеют цель определения факторов, ответственных за отказы, и поиск лучшего решения по внедрению систем мониторинга для быстрого устранения неполадок и несоответствий в работе электрической сети.

Решения о содержании воздушных линий электропередачи должны приниматься на основании объективных критериев, установленных по их фактическому техническому состоянию. Несмотря на то, что внедрение систем мониторинга требует средних начальных вложений, преимущества технического характера приводят к их быстрой амортизации. Кроме того, внедрение систем мониторинга в структуру классических воздушных линий связи станет важным шагом на пути их преобразования в интеллектуальные электрические сети.

Методы, предназначенные для обработки изображений в видимом спектре, основываются на алгоритмах глубокого и машинного обучения. Ультрафиолетовый спектр (УФ) используется для выявления коронных разрядов на проводах и изоляторах. Методы обработки УФ и ИК-изображений представлены в небольшом количестве работ и не имеют количественной оценки эффективности. Тем не менее, инспектирование состояния ЛЭП является многообещающей и перспективной областью исследования. Съемка в инфракрасном спектре (ИК) позволяет выявить дефекты элементов ЛЭП, которые не могут быть детектированы на изображениях в видимом спектре, например, горячие точки (hotspot). Проанализированные методы обработки УФ- и ИК-изображений не имеют количественной оценки эффективности. В результате проведенного анализа были выбраны методы детектирования дефектов ЛЭП с наибольшей

эффективностью для видимого спектра: GVN, HOG+SVM, SSD, Grab cut, cascading CNN, LBP-HF+SVM, DMNN, VGG-19, LBP+ULBP, YOLO v3, DELM+LRF, SVM, Faster R-CNN, CNN, стереозрение+PLAMEC. Методом детектирования с наибольшей эффективностью для ИК-спектра является «оцу + пороговая обработка», а для УФ-спектра метод – SVR. К нерешенным задачам выявления дефектов ЛЭП можно отнести формирование репрезентативных выборок изображений различных спектров, распознавание элементов конструкции малого размера и разработку единообразной системы оценки эффективности работы методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий [Internet]. [cited 2020 Dec 24]. Available from: <https://en-res.ru/wp-content/uploads/2020/02/pue.pdf>
2. Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г., Кравченко И.И. Способ Повышения Надёжности Воздушных Линий Электропередачи. Успехи Современной Науки. 2016;2(10).
3. Colak I., Sagioglu S., Fulli G., Yesilbudak M., Covrig C.-F. A survey on the critical issues in smart grid technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016 Feb 1;54:396–405.
4. Peng F.Z. Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and Resilient AC Distribution Systems (RACDS) in Smart Grid. Proceedings of the IEEE. 2017 Nov;105(11):2099–115.
5. Zormpas A., Moirogiorgou K., Kalaitzakis K., Plokamakis G.A., Partsinevelos P., Giakos G., Zervakis M. Power Transmission Lines Inspection using Properly Equipped Unmanned Aerial Vehicle (UAV). In: 2018 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). 2018. p. 1–5.
6. Tragulnuch P., Kasetkasem T., Isshiki T., Chanvimaluang T., Ingprasert S. High Voltage Transmission Tower Identification in an Aerial Video Sequence using Object-Based Image Classification with Geometry Information. In: 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2018. p. 473–6.
7. Bian J., Hui X., Zhao X., Tan M. A Novel Monocular-Based Navigation Approach for UAV Autonomous Transmission-Line Inspection. In: 2018

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2018. p. 1–7.
8. Menendez O., Cheein F.A.A., Perez M., Kouro S. Robotics in Power Systems: Enabling a More Reliable and Safe Grid. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2017 Jun;11(2):22–34.
 9. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор). *Математика и математическое моделирование*. 2018 Jan 6;(1):15–58.
 10. Yap P. Grid-Based Path-Finding. In: Cohen R, Spencer B, editors. *Advances in Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2002. p. 44–55.
 11. Wei H. Path Planning Algorithm of Intelligent Vehicle Based on Improved Visibility Graphs. Warrendale, PA: SAE International; 2018 Aug. Report No.: 2018-01–1581.
 12. Xiong C., Chen D., Lu D., Zeng Z., Lian L. Path planning of multiple autonomous marine vehicles for adaptive sampling using Voronoi-based ant colony optimization. *Robotics and Autonomous Systems*. 2019 May 1;115:90–103.
 13. Mohanta J.C., Keshari A. A knowledge based fuzzy-probabilistic roadmap method for mobile robot navigation. *Applied Soft Computing*. 2019 Jun 1;79:391–409.
 14. Wang J., Wu S., Li H., Zou J. Path planning combining improved rapidly-exploring random trees with dynamic window approach in ROS. In: 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2018. p. 1296–301.
 15. Samir M., Sharafeddine S., Assi C.M., Nguyen T.M., Ghrayeb A. UAV Trajectory Planning for Data Collection from Time-Constrained IoT Devices. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020 Jan;19(1):34–46.
 16. Gonzalez R., Kloetzer M., Mahulea C. Comparative study of trajectories resulted from cell decomposition path planning approaches. In: 2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC). 2017. p. 49–54.
 17. Mrudul K., Mandava R.K., Vundavilli P.R. An Efficient Path Planning Algorithm for Biped Robot using Fast Marching Method. *Procedia Computer Science*. 2018 Jan 1;133:116–23.
 18. Koenig S., Likhachev M. Improved fast replanning for robot navigation in unknown terrain. In: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat No02CH37292)*. 2002. p. 968–75 vol.1.

19. Nash A., Koenig S., Tovey C. Lazy theta*: Any-angle path planning and path length analysis in 3D. In: In Proceedings of the Aaai Conference on Artificial In^{TEL}ligence. 2010.
20. Kitamura Y., Tanaka T., Kishino F., Yachida M. 3-D path planning in a dynamic environment using an octree and an artificial potential field. In: Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Human Robot Interaction and Cooperative Robots. 1995. p. 474–81 vol.2.
21. Hwang Y.K., Ahuja N. A potential field approach to path planning. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1992 Feb;8(1):23–32.
22. Poty A., Melchior P., Oustaloup A. Dynamic path planning for mobile robots using fractional potential field. In: First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004. 2004. p. 557–61.
23. Sabudin E.N., Omar R., Che Ku Melor C.K.A.N.H. Potential field methods and their inherent approaches for path planning. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016 Sep;11(18):10801–5.
24. Dai J., Wang Y., Wang C., Ying J., Zhai J. Research on Hierarchical Potential Field Method of Path Planning for UAVs. In: 2018 2nd IEEE Advanced Information Management,Communicates,Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). 2018. p. 529–35.
25. Conn R.A., Kam M. Robot motion planning on N-dimensional star worlds among moving obstacles. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1998 Apr;14(2):320–5.
26. Liu J., Yang J., Liu H., Tian X., Gao M. An improved ant colony algorithm for robot path planning. Soft Comput. 2017 Oct 1;21(19):5829–39.
27. Darwish A.H., Joukhadar A., Kashkash M. Using the Bees Algorithm for wheeled mobile robot path planning in an indoor dynamic environment. Cogent Engineering. 2018 Jan 1;5(1):1426539.
28. Lamini C., Benhlila S., Elbekri A. Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning. Procedia Computer Science. 2018 Jan 1;127:180–9.
29. Wang X., Shi Y., Ding D., Gu X. Double global optimum genetic algorithm–particle swarm optimization-based welding robot path planning. Engineering Optimization. 2016 Feb 1;48(2):299–316.
30. Goel U., Varshney S., Jain A., Maheshwari S., Shukla A. Three Dimensional Path Planning for UAVs in Dynamic Environment using Glow-worm Swarm Optimization. Procedia Computer Science. 2018 Jan 1;133:230–9.

31. Smolyanskiy N., Kamenev A., Smith J., Birchfield S. Toward low-flying autonomous MAV trail navigation using deep neural networks for environmental awareness. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017. p. 4241–7.
32. Kurdi M.M., Dadykin A.K., Elzein I., Ahmad I.S. Proposed system of artificial Neural Network for positioning and navigation of UAV-UGV. In: 2018 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT). 2018. p. 1–6.
33. Arantes M. da S., Arantes J. da S., Toledo C.F.M., Williams B.C. A Hybrid Multi-Population Genetic Algorithm for UAV Path Planning. In: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2016. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2016. p. 853–60. (GECCO '16).
34. Arantes J.D.S., Arantes M.D.S., Toledo C.F.M., Williams B.C. A Multi-population Genetic Algorithm for UAV Path Re-planning under Critical Situation. In: 2015 IEEE 27th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). 2015. p. 486–93.
35. Hui X., Bian J., Zhao X., Tan M. Deep-learning-based autonomous navigation approach for UAV transmission line inspection. In: 2018 Tenth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI). 2018. p. 455–60.
36. Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ. Стандарт организации. Дата введения 30.12.2011, ОАО «ФСК ЕЭС». 2011;86.
37. Сазонов В. Н. Эффективные инженерные решения по повышению пропускной способности ВЛ на основе применения системы мониторинга тока и температуры проводов, математического моделирования поведения элементов линий в различных режимах эксплуатации [Электронный ресурс]/Сазонов ВН //ООО «Тольяттинский Трансформатор». 2013.
38. ГОСТ Р 54906-2012 Системы безопасности комплексные. Экологически ориентированное проектирование. Общие технические требования, ГОСТ Р от 22 мая 2012 года №54906-2012.
39. ГОСТ 839-80 Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с Изменениями N 1, 2), ГОСТ от 23 июня 1980 года №839-80.

40. Костиков И. Система мониторинга САТ-1—повышение пропускной способности и надежности в ЛЭП. Энергетика. 2011;(3);С. 38.
41. Жиленков Н. Новые технологии беспроводной передачи данных. СТА. 2003;(4):44–7.
42. Самарин А. В., Рыгалин Д. Б., Шкляев А. А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП. Естественные и технические науки. Международный научно-исследовательский журнал. 2012;(1):1–7.
43. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35-800 кВ. Издательство НЦ ЭНАС. 2003;С. 200.
44. Тарасов Е.В. Монтаж, наладка, эксплуатация электрооборудования. Часть I. Воздушные и кабельные линии электропередачи: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2010;С.146.
45. Ящура А. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Litres; 2018. 505 p.
46. ГОСТ Р 58087-2018 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электрические сети. Паспорт воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше, ГОСТ Р от 20 марта 2018 года №58087-2018.
47. ГОСТ 28856-90 Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия (с Изменением N 1), ГОСТ от 29 декабря 1990 года №28856-90 [Internet]. [cited 2020 Dec 25]. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200011858>
48. Kuzmenko V.P., Solenaja O.Y., Rysin A.V., Solyonyj S.V., Kvas E. Measurement of the Quality of Electricity in the Power Supply System with LED Lighting Devices. In: 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2020. p. 1–4.
49. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Наука; 2009.
50. РД 34.20.504-94 Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35 - 800 кВ. 2020.
51. Zhang L., Lai K. A novel complex linear state estimator for smart power distribution systems: methodology and implementation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020 Dec 1;123:106312.

52. СТО 70238424.29.240.20.004-2011 Воздушные линии напряжением 35 - 750 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. 2020.
53. Shishlakov V.F., Vataeva E. Yu, Reshetnikova N.V., Shishlakov D.V., Solenaya O.Ya. Synthesis of Nonlinear Impulse Systems. Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics 'Zavalishin's Readings' ER(ZR) 2020, Ufa, Russia, 15–18. April 2020; pp 469-476.
54. Design manual for high voltage transmission lines BULLETIN 1724E-200. [Электронный ресурс].
https://www.rd.usda.gov/files/UEP_Bulletin_1724E-200.pdf.
55. Lana da Silva C.D., Cardoso G., de Moraes A.P., Marchesan G., Kaehler Guarda F.G. A continually online trained impedance estimation algorithm for transmission line distance protection tolerant to system frequency deviation. Electric Power Systems Research. 2017 Jun 1;147:73–80.
56. Shishlakov V.F., Solenaya O.Y., Solyonyj S.V., Rysin A.V., Kvas E.S., Kuzmenko V.P. Modeling of the operation modes of the electric power system to improve its sustainability of functioning. J Phys: Conf Ser. 2020 Apr;1515:052083.
57. Cai Y., Xie Q., Xue S., Hu L., Kareem A. Fragility modelling framework for transmission line towers under winds. Engineering Structures. 2019 Jul 15;191:686–97.
58. Tuttelberg K., Kilter J. Estimation of transmission loss components from phasor measurements. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018 Jun 1;98:62–71.
59. Бобрышов А.П., Давудян А.У., Солёная О.Я., Кузьменко В.П., Солёный С.В. Внедрение машинного зрения в процесс поверки измерительного оборудования. In Донецкий национальный технический университет; 2020 [cited 2020 Dec 25]. p. 365–70. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42970117>
60. Куликов А.Д., Кузьменко В.П., Солёная О.Я., Солёный С.В., Демченко Г.В. Разработка алгоритма автоматизации движения робота в пространстве на базе инфракрасных датчиков. In Донецкий национальный технический университет; 2020 [cited 2020 Dec 25]. p. 423–7. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42970132>

61. Du Y., Liao Y. On-line estimation of transmission line parameters, temperature and sag using PMU measurements. *Electric Power Systems Research*. 2012 Dec 1;93:39–45.
62. Jiang W., Tang H. Distribution line parameter estimation considering dynamic operating states with a probabilistic graphical model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020 Oct 1;121:106133.
63. Ерошенко Г.П., Коломиец А.П., Кондратьева Н.П., Медведько Ю.А., Таранов М.А. Эксплуатация электрооборудования. М.: КолосС. 2007;С. 344.
64. Костин В.Н. Монтаж и эксплуатация оборудования систем электроснабжения: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ. 2004;С. 184.
65. Лукьянов М.М., Коношенко А.В. Техническая эксплуатация электроустановок. 2010.
66. Гологорский Е., Кравцов А., Узелков Б. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4–750 кВ. Litres; 2018. 617 р.
67. СТО 56947007-29.240.55.111-2011 Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ.
68. Солёная О.Я., Важник В.С., Пруссак Н.И. Инновационные Методы Повышения Энергоэффективности Электротехнических Комплексов Объектов Социальной Инфраструктуры. In Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 2020. р. 272–7.
69. Солёная О.Я., Дранникова В.Р. Анализ Влияния Гололедных Нагрузок На Надежность Воздушных Линий Электропередач. In Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 2020. р. 285–91.
70. СТО 34.01-23.1-001-2017 Объем и нормы испытаний электрооборудования.
71. Solyonyj S., Solenaya O., Rysin A., Kuzmenko V., Kvas E. Robot for Inspection and Maintenance of Overhead Power Lines. In: Ronzhin A, Shishlakov V, editors. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics ‘Zavalishin’s Readings’*. Singapore: Springer; 2021. p. 487–97. (Smart Innovation, Systems and Technologies).
72. Solyonyj S.V., Shishlakov V.F., Solenaya O.Y., Kuzmenko V.P., Kvas E.S., Rysin A.V. Robotic power line maintenance systems. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*. 2020 Jan;734:012200.

73. Грозозащитные тросы для воздушных линий электропередачи 35-750 кВ. Технические требования. М.: Альвис. 2014;С.146.
74. Алексеев В.А. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт электрооборудования СЭС. Иркутск. 2006;С. 80.
75. Сибикин Ю. Д., Сибикин М. Ю. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок. Учебное пособие. Directmedia; 2014. 463 р.
76. Куценко Г. Ф. Монтаж, эксплуатация и ремонт электроустановок. Практикум/ГФ Куценко. Минск: Дизайн ПРО. 2003.
77. Nguyen P., Dudkin S., Kong C. Automatic diagnostic of transmission lines based on ultraviolet inspection. E3S Web Conf. 2019;140:07008.
78. Juergen B., Fernando P.L., Thomas L. OCM 2017 - Optical Characterization of Materials - conference proceedings. KIT Scientific Publishing; 2017. 248 р.
79. Han S., Hao R., Lee J. Inspection of Insulators on High-Voltage Power Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Delivery. 2009 Oct;24(4):2319–27.
80. Bian J., Hui X., Zhao X., Tan M. A monocular vision–based perception approach for unmanned aerial vehicle close proximity transmission tower inspection. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2019 Jan 1;16(1):1729881418820227.
81. Gong X., Yao Q., Wang M., Lin Y. A Deep Learning Approach for Oriented Electrical Equipment Detection in Thermal Images. IEEE Access. 2018;6:41590–7.
82. Zhai Y., Wang D., Zhang M., Wang J., Guo F. Fault detection of insulator based on saliency and adaptive morphology. Multimed Tools Appl. 2017 May 1;76(9):12051–64.
83. Wang X, Guo K, Wang Y. Detection algorithm of cracked insulator based on statistical shape models. Comput. Meas. Control. 2018.
84. Yin J., Lu Y., Gong Z., Jiang Y., Yao J. Edge Detection of High-Voltage Porcelain Insulators in Infrared Image Using Dual Parity Morphological Gradients. IEEE Access. 2019;7:32728–34.
85. Han Y., Liu Z., Lee D., Liu W., Chen J., Han Z. Computer vision–based automatic rod-insulator defect detection in high-speed railway catenary system. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2018 May 1;15(3):1729881418773943.

86. Zhang J., Liu L., Wang B., Chen X., Wang Q., Zheng T. High Speed Automatic Power Line Detection and Tracking for a UAV-Based Inspection. In: 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering. 2012. p. 266–9.
87. Tomaszewski M., Osuchowski J., Debita Ł. Effect of Spatial Filtering on Object Detection with the SURF Algorithm. In: Hunek WP, Paszkiel S, editors. Biomedical Engineering and Neuroscience. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 121–40.
88. Liao S., An J. A Robust Insulator Detection Algorithm Based on Local Features and Spatial Orders for Aerial Images. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2015 May;12(5):963–7.
89. Cheng H., Zhai Y., Chen R., Wang D., Dong Z., Wang Y. Self-Shattering Defect Detection of Glass Insulators Based on Spatial Features. Energies. 2019 Jan;12(3):543.
90. Ke H., Wang H., Li B. Image Segmentation Method of Insulator in Transmission Line Based on Weighted Variable Fuzzy C-Means. JESTR. 2017;10(4):115–23.
91. Guo L., Liao Y., Yao H., Chen J., Wang M. An Electrical Insulator Defects Detection Method Combined Human Receptive Field Model. Vol. 2018, Journal of Control Science and Engineering. Hindawi; 2018. p. e2371825.
92. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. In: 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05). 2005. p. 886–93 vol. 1.
93. Felzenszwalb P.F., Girshick R.B., McAllester D., Ramanan D. Object Detection with Discriminatively Trained Part-Based Models. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2010 Sep;32(9):1627–45.
94. Zhai Y., Chen R., Yang Q., Li X., Zhao Z. Insulator Fault Detection Based on Spatial Morphological Features of Aerial Images. IEEE Access. 2018;6:35316–26.
95. Hao-ran J, Lin-jun J, Shu-jia Y. Recognition and fault diagnosis of insulator string in aerial images. Journal of Mechanical & Electrical Engineering. 2015. p. 274-278.
96. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. 1979;9(1):5.
97. Mallat S., Hwang W.L. Singularity detection and processing with wavelets. IEEE Transactions on Information Theory. 1992 Mar;38(2):617–43.

98. Jabid T., Ahsan T. Insulator Detection and Defect Classification using Rotation Invariant Local Directional Pattern. *ijacsa*. 2018;9(2).
99. Jabid T., Uddin M.Z. Rotation invariant power line insulator detection using local directional pattern and support vector machine. In: 2016 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET). 2016. p. 1–4.
100. Jiang Y. T., Han J., Ding J. The identification and diagnosis of self-blast defects of glass insulators based on multi-feature fusion. *Electr. Power*. 2015;50(5). p. 52-58.
101. Zhai Y., Wang D., Guo Y., Zhang M., Liu Y. Recognition of Aerial Insulator Image Based on Structural Model and the Optimal Entropy Threshold Segmentation. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. 2016;0(iceta).
102. Tiantian Y., Guodong Y., Junzhi Y. Feature fusion based insulator detection for aerial inspection. In: 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). 2017. p. 10972–7.
103. Zuo D., Hu H., Qian R., Liu Z. An insulator defect detection algorithm based on computer vision. In: 2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). 2017. p. 361–5.
104. Oberweger M., Wendel A., Bischof H. Visual Recognition and Fault Detection for Power Line Insulators. 19th computer vision winter workshop. 2014;1–8.
105. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*; 2017. p. 2961–9.
106. Girshick R. Fast R-CNN. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*; 2015. p. 1440–8.
107. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*; 2016. p. 779–88.
108. Pál D., Póczos B., Szepesvári C. Estimation of Rényi Entropy and Mutual Information Based on Generalized Nearest-Neighbor Graphs. *Advances in neural information processing systems*. 2016;29:379-387.
109. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.-Y., Berg A.C. SSD: Single Shot MultiBox Detector. In: Leibe B, Matas J, Sebe N, Welling M, editors. *Computer Vision – ECCV 2016*. Cham: Springer International Publishing; 2016. p. 21–37. (Lecture Notes in Computer Science).

110. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. 2015 Apr 10;
111. Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A.A. Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning. 2017 Feb 12;7.
112. Yang Y., Wang L. Insulator recognition based on convolution neural network. MATEC Web Conf. 2017;139:00035.
113. Tomaszewski M., Michalski P., Ruszczak B., Zator S. Detection of power line insulators on digital images with the use of laser spots. IET Image Processing. 2019;13(12):2358–66.
114. Han J., Yang Z., Zhang Q., Chen C., Li H., Lai S., Hu G., Xu C., Xu H., Wang D., Chen R. A Method of Insulator Faults Detection in Aerial Images for High-Voltage Transmission Lines Inspection. Applied Sciences. 2019 Jan;9(10):2009.
115. Ma L., Xu C., Zuo G., Bo B., Tao F. Detection Method of Insulator Based on Faster R-CNN. In: 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). 2017. p. 1410–4.
116. Zeiler M.D., Fergus R. Visualizing and Understanding Convolutional Networks. In: Fleet D, Pajdla T, Schiele B, Tuytelaars T, editors. Computer Vision – ECCV 2014. Cham: Springer International Publishing; 2014. p. 818–33. (Lecture Notes in Computer Science).
117. Kang G., Gao S., Yu L., Zhang D. Deep Architecture for High-Speed Railway Insulator Surface Defect Detection: Denoising Autoencoder With Multitask Learning. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019 Aug;68(8):2679–90.
118. Ling Z., Qiu R.C., Jin Z., Zhang Y., He X., Liu H., Chu L. An Accurate and Real-time Self-blast Glass Insulator Location Method Based On Faster R-CNN and U-net with Aerial Images. 2018 Jan 16;
119. Castellucci P.B., Lucca L.C., SantAnna M., Tralalle G., Mustacio V.H., Silva J.F.R. d, Vallin S. Pole and Crossarm Identification in Distribution Power Line Images. In: 2013 Latin American Robotics Symposium and Competition. 2013. p. 2–7.
120. Tragulnuch P., Chanvimaluang T., Kasetkasem T., Ingprasert S., Isshiki T. High Voltage Transmission Tower Detection and Tracking in Aerial Video Sequence using Object-Based Image Classification. In: 2018 International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology International

- Conference on Information and Communication Technology for Embedded Systems (ICESIT-ICICTES). 2018. p. 1–4.
121. Han B., Wang X. Learning for Tower Detection of Power Line Inspection. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*. 2016;0(iccae).
 122. Han B., Wang X. Detection for Power line Inspection. *MATEC Web Conf*. 2017;100:03010.
 123. Friedman J., Hastie T., Tibshirani R. Additive logistic regression: a statistical view of boosting (With discussion and a rejoinder by the authors). *Ann Statist*. 2000 Apr;28(2):337–407.
 124. Martinez C., Sampedro C., Chauhan A., Collumeau J.F., Campoy P. The Power Line Inspection Software (PoLIS): A versatile system for automating power line inspection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2018 May 1;71:293–314.
 125. Chen B., Miao X. Distribution Line Pole Detection and Counting Based on YOLO Using UAV Inspection Line Video. *J Electr Eng Technol*. 2020 Jan 1;15(1):441–8.
 126. Santos T., Moreira M., Almeida J., Dias A., Martins A., Dinis J., Formiga J., Silva E. PLineD: Vision-based power lines detection for Unmanned Aerial Vehicles. In: 2017 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). 2017. p. 253–9.
 127. Zhou G., Yuan J., Yen I., Bastani F. Robust real-time UAV based power line detection and tracking. In: 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2016. p. 744–8.
 128. Chang W., Yang G., Li E., Liang Z. Toward a Cluttered Environment for Learning-Based Multi-Scale Overhead Ground Wire Recognition. *CASIA OpenIR*. 2018 Dec 1;48(3).
 129. Liu Y., Li J., Xu W., Liu M. A Method on Recognizing Transmission Line Structure Based on Multi-level Perception. In: Zhao Y, Kong X, Taubman D, editors. *Image and Graphics*. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 512–22. (Lecture Notes in Computer Science).
 130. Jin L. J., Yan S. J., Liu Y. Vibration damper recognition based on Haar-like features and cascade AdaBoost classifier // *Journal of System Simulation*; 2012. – 24(09). – pp. 1806-1809.
 131. Wang W., Tian B., Liu Y., Li, J. Study on the electrical devices detection in UAV images based on region based convolutional neural networks. *Journal of Geo-information Science*; 2017. – 19(2). – pp. 256-263.

132. Liu K. P., Wang B. H., Chen X. G., Jin L. J. Damaged cables recognition based on improved Freeman rule. *Jidian Gongcheng/ Mechanical & Electrical Engineering Magazine*. 2012. 29(2). – pp. 211-214.
133. Li S., Zhou H., Wang G., Zhu X., Kong L., Hu Z. Cracked Insulator Detection Based on R-FCN. *J Phys: Conf Ser*. 2018 Aug;1069:012147.
134. Tao X., Zhang D., Wang Z., Liu X., Zhang H., Xu D. Detection of Power Line Insulator Defects Using Aerial Images Analyzed With Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2020 Apr;50(4):1486–98.
135. Prasad P.S., Rao B.P. LBP-HF features and machine learning applied for automated monitoring of insulators for overhead power distribution lines. In: 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). 2016. p. 808–12.
136. Prates R.M., Cruz R., Marotta A.P., Ramos R.P., Simas Filho E.F., Cardoso J.S. Insulator visual non-conformity detection in overhead power distribution lines using deep learning. *Computers & Electrical Engineering*. 2019 Sep 1;78:343–55.
137. Wan S., Liang Y., Zhang Y. Deep convolutional neural networks for diabetic retinopathy detection by image classification. *Computers & Electrical Engineering*. 2018 Nov 1;72:274–82.
138. Szegedy C., Wei Liu, Yangqing Jia, Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A. Going deeper with convolutions. In: 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. p. 1–9.
139. Wu Z., Shen C., van den Hengel A. Wider or Deeper: Revisiting the ResNet Model for Visual Recognition. *Pattern Recognition*. 2019 Jun 1;90:119–33.
140. Yang L., Jiang X., Hao Y., Li L., Li H., Li R., Luo B. Recognition of natural ice types on in-service glass insulators based on texture feature descriptor. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017 Feb;24(1):535–42.
141. Hao Y., Wei J., Jiang X., Yang L., Li L., Wang J., Li H., Li R. Icing Condition Assessment of In-Service Glass Insulators Based on Graphical Shed Spacing and Graphical Shed Overhang. *Energies*. 2018 Feb;11(2):318.
142. Maeda K., Takahashi S., Ogawa T., Haseyama M. Automatic estimation of deterioration level on transmission towers via deep extreme learning machine based on local receptive field. In: 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2017. p. 2379–83.

143. Maeda K., Takahashi S., Ogawa T., Haseyama M. Estimation of Deterioration Levels of Transmission Towers via Deep Learning Maximizing Canonical Correlation Between Heterogeneous Features. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2018 Aug;12(4):633–44.
144. Lu J., Xu X., Li X., Li L., Chang C., Feng X., Zhang S. Detection of Bird's Nest in High Power Lines in the Vicinity of Remote Campus Based on Combination Features and Cascade Classifier. *IEEE Access*. 2018;6:39063–71.
145. Zhang Y., Huang X., Jia J., Liu X. A Recognition Technology of Transmission Lines Conductor Break and Surface Damage Based on Aerial Image. *IEEE Access*. 2019;7:59022–36.
146. Mao T., Ren L., Yuan F., Li C., Zhang L., Zhang M., Chen Y. Defect Recognition Method Based on HOG and SVM for Drone Inspection Images of Power Transmission Line. In: 2019 International Conference on High Performance Big Data and Intelligent Systems (HPBD IS). 2019. p. 254–7.
147. Wang B., Wu R., Zheng Z., Zhang W., Guo J. Study on the method of transmission line foreign body detection based on deep learning. In: 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2017. p. 1–5.
148. Song Y., Wang L., Jiang Y., Wang H., Jiang W., Wang C., Chu J., Han D. A vision-based method for the broken spacer detection. In: 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). 2015. p. 715–9.
149. Tang Y., Han J., Wei, W. Research on part recognition and defect detection of transmission line in deep learning. *Electronic Measurement Technology*. 2018. – 41(6). – pp. 60-65.
150. Wang Z. Applied research on deep learning in defect detection of key components on transmission towers. Master's thesis, Civil Aviation University of China. 2018.
151. Li Q., Ma Y., He F., Xi S., Xu J. Bionic Vision-Based Intelligent Power Line Inspection System. *Comput Math Methods Med*. 2017;2017:4964287.
152. Zhang Y., Yuan X., Li W., Chen S. Automatic Power Line Inspection Using UAV Images. *Remote Sensing*. 2017 Aug;9(8):824.
153. Grum F., Costa L. F. Spectral emission of corona discharges. *Applied Optics*. 1976. – 15(1). – pp. 76-79.

154. Lindner M., Elstein S., Lindner P., Topaz J.M., Phillips A. J. Daylight corona discharge imager. In Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. 1999 Jan 1;Vol. 4, 349-349.
155. Komar G., Pischler O., Schichler U., Vieriu R.-L. Performance of UV and IR Sensors for Inspections of Power Equipment. NORD-IS. 2019 Aug 8;(26):82–7.
156. Jianwen Ding, Xiang Li, Xi Zhu, Xun Cao, Feng Yan, Bian X. Solar-irradiated leakage of UV camera for daytime corona inspection. In: 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). 2015. p. 298–301.
157. Li J., Zhou Y., Yi X., Zhang M., Chen X., Cui M., Yan F. An Automatic Corona-discharge Detection System for Railways Based on Solar-blind Ultraviolet Detection. Curr Opt Photon, COPP. 2017 Jun 25;1(3):196–202.
158. Duda R., Hart P. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. CACM. 1972;15(1):11–5.
159. Zhou W., Li H., Yi X., Tu J., Yu J. A criterion for UV detection of AC corona inception in a rod-plane air gap. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011 Feb;18(1):232–7.
160. Lv F., Dai R., Li H., Jin H. Comparison of Two UV Imaging Parameters's in the Insulator Fault Diagnosis. In: 2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application [Internet]. 2012. p. 1400–3. Available from: aaaaaaa.com
161. Chen Q., Li Y., Yang G., Jin T., Zhang Z., Zhang S. Detection and Analysis of Ultraviolet Corona Discharge for Earth Switch Grading Ring. In: 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). 2019. p. 1–3.
162. Li X., Jin L., Xu Z., Jiang T., Jin H. Surface discharge detection method of contaminated insulators based on ultraviolet images' parameters. In: 2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). 2017. p. 155–8.
163. Anbalagan S., Sudhakar T.D. Protection of Power Transmission Lines Using Intelligent Hot Spot Detection. In: 2019 Fifth International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). 2019. p. 1–6.
164. Zaripova A.D., Zaripov D.K., Usachev A.E. Automatic condition monitoring method to find defects in high-voltage insulators using infrared images. E3S Web Conf. 2019;124:03003.

165. Wronkowicz A. Approach to automated hot spot detection using image processing for thermographic inspections of power transmission lines. Diagnostyka [Internet]. 2016 [cited 2020 Dec 14]; Vol. 17, No. 2. Available from: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-8a63ed76-86ea-4c27-8f3e-d02ef692fb7a>
166. Zhao Z., Xu G., Qi Y. Representation of binary feature pooling for detection of insulator strings in infrared images. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2016 Oct;23(5):2858–66.

Апробация результатов реализации Проекта на научных мероприятиях (участие в научных мероприятиях по тематике Проекта за период, на который был предоставлен грант) (каждое мероприятие с новой строки, указать название мероприятия, ФИО члена коллектива и тип доклада)

15th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings” (ER(ZR) 2020), г. Уфа, Россия, 15-18 апреля 2020 г. – очный доклад – Лебедев И.В., Шабанова А.Р., Рысин А.В.

24th International Conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF 2020), г. Санкт-Петербург, 01-05 июня 2020 г. – очный доклад – Кузьменко В.П.

Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных авторами по тематике проекта (например, <http://www.somewhere.ru/mypub.html>)

http://robotics.nw.ru/servis/project_detail.php?ID=455&clear_cache=Y#section

Краткое назначение конечной продукции, технологии или услуг, которые будут производиться с применением полученных результатов

Полученные результаты анализа на данном этапе проекта позволят создать на следующем этапе системы управления БпЛА, а также алгоритмы и методы на базе технического зрения для реализации задач автономного мониторинга элементов линии электропередач.