

Баёв Александр Александрович, преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Уральский

институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург

Журенкова Таисия Дмитриевна, курсант, 3 курс факультет пожарной и техносферной безопасности, Уральский институт ГПС МЧС России, г.

Екатеринбург

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОГО МОНИТОРИНГА С
ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА (ДРОНОВ) ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ОТКРЫТЫХ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ (ОРУ) И НА ВОЗДУШНЫХ
ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Аннотация

В статье рассматривается проблема своевременной диагностики контактных соединений в открытых распределительных устройствах (ОРУ) и на воздушных линиях электропередач (ВЛ). Традиционные методы визуального осмотра обладают низкой эффективностью, высокими трудозатратами и не позволяют выявить дефекты на ранней стадии, что приводит к серьёзным авариям. В качестве перспективного решения предложено внедрение тепловизионного мониторинга с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Проведен сравнительный анализ различных типов дронов, определены их оптимальные сценарии применения в зависимости от поставленных задач. Описан принцип работы тепловизионных датчиков и программного обеспечения для визуализации тепловых полей. Сделан вывод, что интеграция БПЛА с тепловизорами позволяет значительно сократить время поиска повреждений, повысить

промышленную безопасность и снизить эксплуатационные риски за счет автоматизации процесса диагностики.

Abstract

The article addresses the issue of timely diagnostics of contact connections in open switchgear (OSG) and overhead power lines (OPL). Traditional visual inspection methods are inefficient, labor-intensive, and fail to detect defects at an early stage, leading to serious accidents and blackouts. The implementation of thermal imaging monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs) is proposed as a promising solution. A comparative analysis of various drone types (multirotor, fixed-wing, and hybrid) is conducted, and their optimal application scenarios are determined depending on the specific tasks (surveying extended lines vs. detailed inspection of OSG). The operating principle of thermal imaging sensors and software for thermal field visualization is described. It is concluded that the integration of UAVs with thermal imagers significantly reduces faultfinding time, enhances industrial safety, and lowers operational risks through diagnostics automation.

Ключевые слова: БПЛА, открытые распределительные устройства, воздушные линии электропередач, тепловизионный мониторинг, инфракрасная диагностика, мультироторные БПЛА

Key words: UAVs, open switchgear, overhead power lines, thermal imaging monitoring, infrared diagnostics, multirotor UAVs

Введение

Обеспечение надежного и бесперебойного электроснабжения потребителей является одной из приоритетных задач для энергетической отрасли. С этой задачей справляются открытые распределительные устройства (ОРУ), который представляют из себя распределительные устройства, расположенные на открытом воздухе. Обычно в виде ОРУ выполняются распределительные устройства на напряжение от 27,5 кВ.

ОРУ обладает рядом существенных преимуществ, включая возможность интеграции электрических устройств любой мощности, что обуславливает их широкое применение в энергетической отрасли [1]. Кроме того, ОРУ не требует дополнительных капитальных затрат на возведение специализированных сооружений, что делает его экономически выгодным решением для эксплуатации. Однако такой метод имеет и свои недостатки. Например, воздействие внешних факторов на контакты открытых распределительных устройств приводит к ухудшению качества контакта. Это может быть вызвано окислением, ослаблением болтовых соединений или уменьшением площади контакта. В результате увеличивается переходное сопротивление, что вызывает локальный нагрев и дополнительные потери энергии [2].

Ярким примером последствий таких недостатков является инцидент, случившийся в 2016 году на Рефтинской ГРЭС, когда разрушение изолятора показало, что неисправность одного из узлов не была своевременно обнаружена. Это ярко подчеркивает недостатки традиционной системы диагностики, основанной на визуальном осмотре, которая требует значительных трудозатрат и несет риски для сотрудников. Подобные сценарии могут иметь серьёзные последствия, как, например, 16 августа 2024 года в Приморском крае, когда произошёл сбой электроснабжения в Владивостоке, Находке и Уссурийске из-за аварии на Приморской ГРЭС. В результате короткого замыкания отключились три энергоблока, сработала противоаварийная защита, линия ВЛ-500 была отключена, и произошёл массовый блэкаут [3].

Все эти ситуации показывают, что своевременное обнаружение дефектов, особенно на начальной стадии, важно для предотвращения таких серьёзных аварий и обеспечения бесперебойной работы электрооборудования. Решением данной проблемы может стать внедрение технологий мониторинга с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что создаст

новые перспективы для быстрой, безопасной и эффективной диагностики уязвимых узлов и элементов электросетей.

Цель работы – провести всесторонний анализ существующих типов БПЛА, с акцентом на их функциональные характеристики, эксплуатационные преимущества и экономическую эффективность с целью уменьшения рисков критического состояния и аварийных последствий.

Классификация БПЛА по назначениям и техническим характеристикам

Увеличение требований к техническому обслуживанию и диагностированию ОРУ и воздушных линий электропередач связано с внедрением цифровых технологий дистанционного контроля. Текущие традиционные методы, включая визуальный осмотр и точечные термографические проверки, оказываются недостаточно эффективными для обнаружения скрытых дефектов. В связи с этим переход к интеллектуальному мониторингу с применением беспилотных летательных аппаратов видится как разумное решение.

Данный подход значительно повышает уровень промышленной безопасности за счёт своевременного обнаружения потенциальных неисправностей. Применение беспилотных летательных аппаратов для визуального обследования позволит облегчить работу неисправности на ее начальном этапе. На основании полученной информации, неисправное оборудование можно своевременно поставить на плановый ремонт или устранить повреждения на линии [4].

В процессе эксплуатации БПЛА можно понять, из каких именно элементов состоит поиск, обнаружение и возврат оборудования в его нормальное рабочее состояние при возникновении какой-либо неисправности. После того, как будет выявлено наличие отдельной неисправности, оперативно-выездная бригада направляется для осмотра линии для того, чтобы найти проблемное место. Учитывая, что воздушные ЛЭП на территории нашего государства являются

протяженными, а расстояние между населенными пунктами, зачастую достигает несколько десятков километров, то объезд подобной высоковольтной ЛЭП может занять довольно много часов. Подчеркивается, что передвижение специальной бригады может усложняться, как бездорожьем, так и нахождением воздушных ЛЭП на труднодоступных участках (например, болото). В связи с этим нахождение места повреждения ЛЭП может занимать существенно больше времени. Именно благодаря применению специального оборудования для локализации, время, необходимое для возврата воздушных ЛЭП в рабочее состояние, несколько сокращается. Сокращение времени достигается посредством его минимизации на этапах, которые являются довольно длительными. На рисунке 1 проиллюстрированы продолжительные этапы, которые выделены желтым цветом [5].

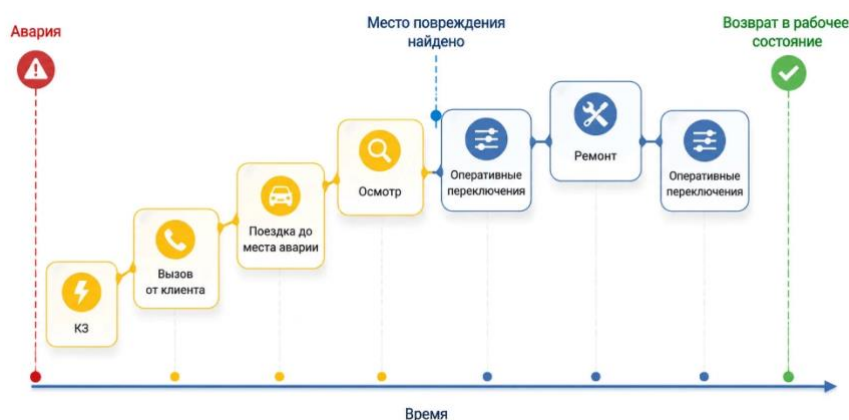


Рис. 1. Этапы восстановления работоспособности ЛЭП после аварии, которые можно ускорить

Для достижения лучших результатов необходимо обеспечить безопасную и удобную рабочую среду для сотрудников, высокую точность и способность обрабатывать большие объемы данных для надежной диагностики, а также проводить обследования в труднодоступных местах с использованием современных технологий. Важным аспектом является снижение затрат за счет автоматизации и эффективного использования ресурсов.

Беспилотные летательные аппараты разделяют на несколько типов: дистанционный тип, автономный тип, гибридный тип.

Беспилотные летательные аппараты различают не только по способу их применения в определённых сферах нашей жизни или различием конструкции, но и по более устойчивым параметрам и характеристикам, например, взлётной массе, дальности, высоте и продолжительности полета, размерам самих аппаратов и т.д. в таблице 1.1. приведена сравнительная характеристика БПЛА.

Таблица 1.1. Сравнительная характеристика БПЛА

Параметр	Дистанционный тип	Автономный тип	Гибридный тип
Принцип управления	Постоянное ручное управление оператором с пульта (радиоканал, видеоканал)	Полёт по заранее загруженному маршруту, вмешательство оператора минимально или отсутствует	Сочетание автономного полёта по маршруту с возможностью дистанционной коррекции задания или ручного вмешательства
Необходимость связи с оператором	Обязательна на всём протяжении полёта	Только для взлёта, посадки и передачи телеметрии (может выполняться автономно)	Частичная: автономный режим при потере связи, дистанционный – при необходимости
Время и дальность полёта	Ограничено дальностью радиосвязи (обычно 3–10 км) и ёмкостью АКБ	До 1–4 часов (самолётные типы), ограничено энергией АКБ/топлива	От 1 до 2,5 часов (в зависимости от режима)
Устойчивость к помехам	Низкая – потеря сигнала ведёт к аварии	Высокая – полёт продолжается по инерциальной системе	Средняя – при помехах переходит в автономный режим
Пример моделей	DJI Phantom 4 RTK (в ручном режиме), Autel EVO II	Supercam S350, Geoscan 201, DJI Matrice 300 RTK (режим «маршрут»)	VTOL-дроны (например, WingtraOne, Zipline), гибриды «самолёт + коптер»

Для эффективного использования беспилотных летательных аппаратов в диагностике и инспекции линий электропередач и контактных соединений важно выбрать наиболее подходящий тип БПЛА в соответствии с поставленными задачами. Ниже представлена таблица 1.2, которая сравнивает основные характеристики различных типов беспилотных летательных аппаратов — мультироторных, самолетных и гибридных — по таким параметрам, как дальность полета, время в воздухе, маневренность и области применения. Эта таблица поможет определить оптимальный тип БПЛА для конкретных условий работы и целей обследования [6].

Таблица 1.2. Типы БПЛА

Типы БПЛА	Дальность полета, км	Время полета, мин	Маневренность	Лучшее применение	Изображение
Мультироторные	До 5 – 10	20 – 40	Высокая	Обследование ОРУ, точечные осмотры	
Самолетного типа	До 100	90 – 240	Низкая	Облет протяженных ВЛ	
Гибридные	До 50 – 70	60 – 120	Средняя	Смешанные задачи	

Таким образом, для осуществления регулярных облётов протяжённых воздушных линий целесообразно использовать автономные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолётного типа, оснащённые возможностью программирования маршрута с высокой степенью точности. В контексте детального обследования открытых распределительных устройств и труднодоступных зон рекомендуется применять дистанционно управляемые мультироторные системы, обладающие высокой манёвренностью и гибкостью в управлении. Гибридные системы, сочетающие преимущества как самолётных, так и мультироторных аппаратов, представляют собой оптимальное решение для выполнения смешанных миссий в районах со сложной электромагнитной обстановкой, где требуется сочетание автономности и оперативного реагирования на изменяющиеся условия [7].

БПЛА и тепловизионные комплексы

Тепловизионные датчики предназначены для дистанционного измерения температуры объектов путём улавливания их собственного теплового излучения. Принцип их действия основан на преобразовании инфракрасного (ИК) излучения в видимый спектр, который отображается на

экране в виде цветового изображения. Этот процесс позволяет детально анализировать температурные характеристики объектов.

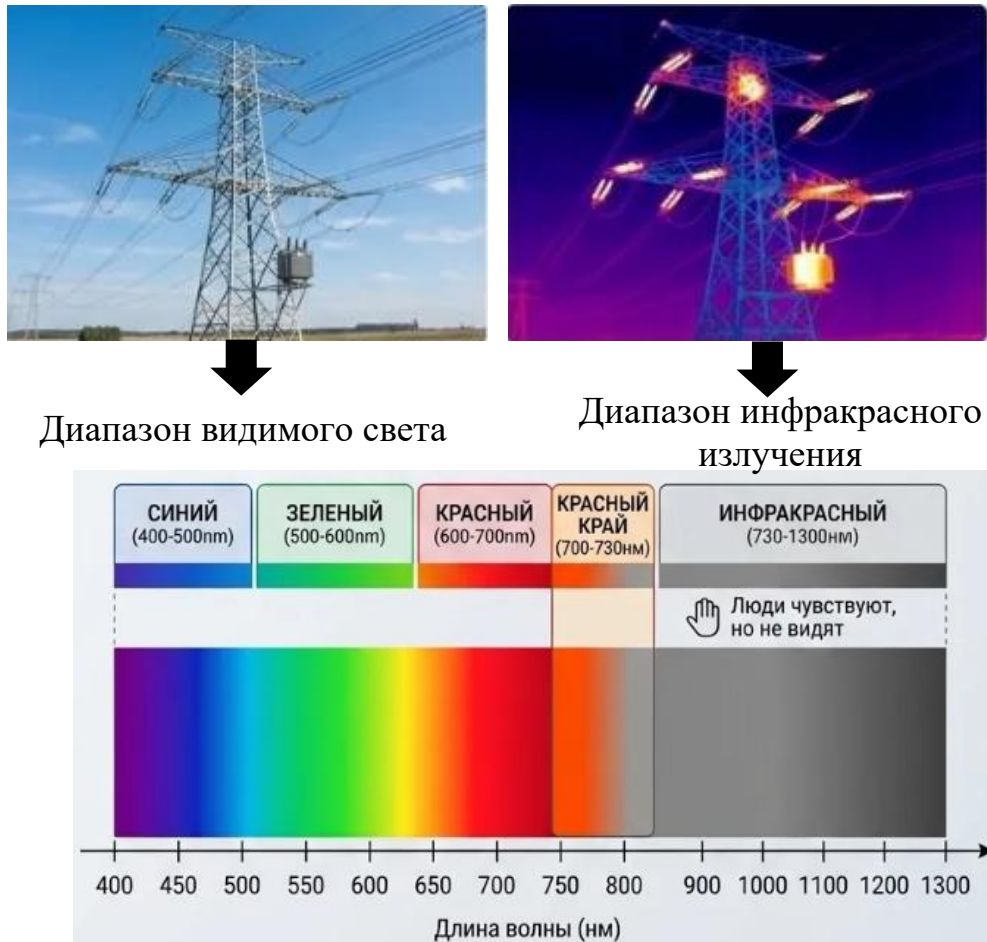


Рис 2.Спектральный диапазон и визуализация

Спектральный диапазон работы таких приборов обычно лежит в окнах прозрачности атмосферы — от 3,5 до 5,5 мкм или от 8 до 13,5 мкм. Современные тепловизоры обладают высокой чувствительностью, позволяя обнаруживать температурные контрасты до сотых долей градуса и формировать изображение в телевизионном стандарте.

Тепловизионные камеры оснащены специальными объективами, улавливающими инфракрасное излучение, тепловыми датчиками и процессорами для обработки изображений. Когда такая камера устанавливается на дрон, она обычно крепится на кардане, стабилизирующем изображение и позволяющем объективу вращаться на 360 градусов.

Эти камеры могут определять температуру поверхности различных объектов. Однако некоторые материалы, такие как полированные, блестящие или отражающие поверхности, имеют низкую излучательную способность и плохо поглощают тепло. Их трудно обнаружить тепловизором. В то же время объекты с высокой излучательной способностью, например, дерево, бетон и люди, сканируются легко. На рисунке 3 представлены общие настройки цветовой палитры тепловизионных камер [8-9].

Программное обеспечение для тепловидения позволяет пользователям выбирать различные цветовые палитры для визуализации теплового режима сцены. Каждая палитра помогает подчеркнуть разные аспекты изображения.

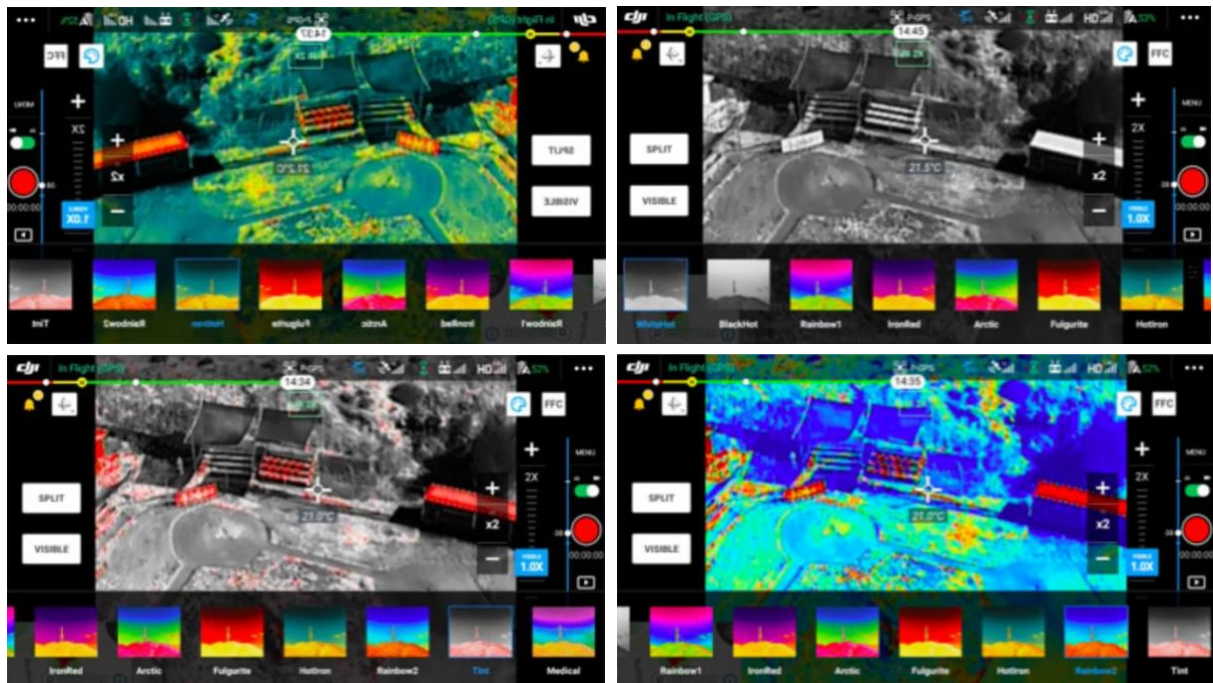


Рис 3. Общие настройки цветовой палитры тепловизионных камер

Среди них:

- Белый горячий: горячие объекты выглядят светлыми, а холодные — тёмными.
- Чёрный горячий: горячие объекты кажутся тёмными, а холодные — светлыми.
- Радуга: температура соответствует цветам, где тёплые оттенки указывают на высокую температуру.

Тепловизионные камеры отличаются типом, который влияет на формат съемки и хранения изображений. Более бюджетные модели фиксируют изображения в виде простых графических файлов. В то же время, продвинутое устройства записывают термографические данные, показатели температуры и координаты GPS.

Большинство современных тепловизоров используют оптико-механическое сканирование. Однако успехи в технологии производства матричных приёмников излучения позволили создать приборы без движущихся частей (без сканирования). Такие устройства не уступают, а по многим потребительским свойствам превосходят традиционные модели. На рисунке 4 представлена обобщённая функциональная схема тепловизора с фокальной ИК-матрицей.

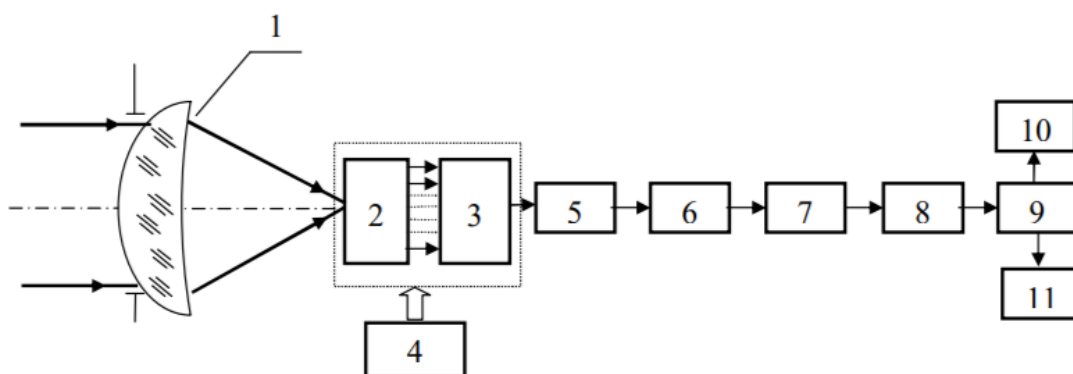


Рис. 4 Обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной матрицей: 1 – оптическая система; 2 – фокальная матрица с предусилителями; 3 – мультиплексор; 4 – система охлаждения; 5 – корректор неоднородности характеристик чувствительных элементов; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – цифровой корректор неоднородности; 8 – корректор неработающих ячеек; 9 – формирователь изображения; 10 – дисплей; 11 – цифровой выход.

Фокальные ИК-матрицы могут иметь различные размеры: 128x128, 256x256 или даже 512x512 пикселей. Каждый пиксель таких матриц имеет площадь около 30x30 мкм². Эти матрицы представляют собой полностью автономные фотоприемные устройства, оснащенные системой охлаждения, предусилителями, мультиплексором, корректором неравномерности характеристик пикселей, аналого-цифровым преобразователем, цифровыми процессорами и формирователем выходных сигналов. Сигналы, поступающие

с этих устройств, могут быть переданы на телевизионные видеоконтрольные устройства или в блоки цифровой обработки в цифровом формате [10].

Заключение

Подводя итог, можно утверждать, что интеграция беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с тепловизионными системами является перспективным и экономически обоснованным решением для модернизации диагностики электрооборудования. Переход от традиционных методов осмотра к интеллектуальному мониторингу позволяет не только повысить точность обнаружения дефектов на ранней стадии, но и существенно сократить время простоя оборудования и финансовые потери от аварийных ремонтов

Эффективность такого подхода напрямую зависит от правильного выбора типа БПЛА: для регулярных облётов протяжённых линий электропередач оптимальны автономные аппараты самолётного типа, тогда как для детального обследования открытых распределительных устройств (ОРУ) незаменимы манёвренные мультироторные системы. Таким образом, внедрение данной технологии обеспечивает надёжный контроль над состоянием энергетической инфраструктуры, повышает промышленную безопасность и снижает эксплуатационные риски.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гуденов В. П. Открытые распределительные устройства (ОРУ) / В. П. Гуденов, И. С. Мятников, М. Айдарбек Уулу // Вестник науки. – 2020. – № 5;
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – Москва: ЭНАС, 2024. – 512 с;
3. Акт № 13-01-16/02-16 расследования причин аварии, произошедшей 22.08.2016 года;
4. Торопов А. С. Применение беспилотных летательных аппаратов для диагностики воздушных линий электропередачи / А. С. Торопов, А. В. Байшев // Вестник – 2017. – Т. 12, № 3;

5. Беспилотные летательные аппараты / С. В. Ганин, А. В. Карпенко, В. В. Колногоров, Г. Ф. Петров. – Санкт-Петербург: Невский бастион, 1999. – 160 с;
6. Теория и практика применения беспилотных летательных аппаратов (дронов) [Электронный ресурс]: метод. пособие для расчетов операторов БПЛА: пер. для армии России и НМ ДНР, и ЛНР. – [Б. м. : б. и.], 2026. – 63 с;
7. Классификация БПЛА по летным характеристикам [Электронный ресурс] //Геоскан Пионер. – Режим доступа: <https://docs.geoscan.ru/pioneer/database/constmodule/classification/classification.html>
8. Балаков Ю. Н. Проектирование схем электроустановок: учебное пособие для вузов / Ю. Н. Балаков, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство МЭИ, 2021;
9. Иванов Н. О. Мониторинг и диагностика воздушных линий электропередачи с применением беспилотных летательных аппаратов / Н. О. Иванов, Д. И. Куляс, Я. В. Шаховцев // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023;
10. Колючкин В. Я. Тепловизионные приборы и системы / В. Я. Колючкин, Г. М. Мосягин. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 244 с.