УДК 004.853.3

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДЕТЕКЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ АНОМАЛИЙ В СЕТЯХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И БПЛА

AUTOMATED DETECTION AND CLASSIFICATION OF THERMAL ANOMALIES IN HEAT SUPPLY NETWORKS BASED ON COMPUTER VISION METHODS AND UAVS

Сацюк Александр Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
заведующий научно-исследовательской лабораторией искусственного интеллекта,
Донецкий институт железнодорожного транспорта
alexandrsatsuk@gmail.com

Аннотация. Актуальной задачей является повышение надежности железнодорожных систем теплоснабжения. Данная работа представляет методику, основанную на интеграции дистанционного тепловизионного сканирования с беспилотных авиационных систем и методов глубокого обучения для автоматизированной детекции и классификации тепловых аномалий. Автономное следование БПЛА по траектории обеспечивает быстрый сбор данных, которые затем обрабатываются нейронными сетями для точной идентификации дефектов. Предложенный подход позволит перейти к проактивному техническому обслуживанию, оптимизируя эксплуатационные расходы и значительно повышая безопасность функционирования теплосетей.

Ключевые слова: предиктивная диагностика, БПЛА, компьютерное зрение, тепловизионное сканирование, железные дороги, автономный полет, сверточная нейронная сеть, CNN.

Satsyuk Alexander Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head of the Artificial Intelligence Research Laboratory,
Donetsk Institute of Railway Transport
alexandrsatsuk@gmail.com

Annotation. The critical challenge in railway infrastructure is enhancing the reliability of heat supply systems. This paper presents a methodology integrating remote thermal scanning data collected by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with deep learning algorithms for the automated detection and classification of thermal anomalies. Autonomous UAV navigation along the route ensures rapid data acquisition, which is subsequently processed by neural networks for precise defect identification. The proposed approach facilitates a shift towards proactive maintenance, significantly optimizing operational costs and substantially increasing the safety and integrity of the heat supply networks.

Keywords: predictive diagnostics, UAV, computer vision, thermal imaging scanning, railways, autonomous flight, convolutional neural network, CNN.

Надежное и бесперебойное функционирование систем теплоснабжения является критически важным условием для обеспечения безопасности и операционной готовности железнодорожной инфраструктуры, включая путевое хозяйство, стрелочные узлы и вспомогательные объекты. Традиционные методы инспекции тепловых сетей, основанные на периодическом визуальном осмотре или контактных измерениях, характеризуются высокой трудоемкостью, низкой оперативностью и, что наиболее важно, неспособностью к раннему выявлению скрытых дефектов и утечек на ранних стадиях их развития [1]. Это приводит к значительным эксплуатационным расходам, неэффективным плановым ремонтам и повышенному риску внезапных аварий, которые могут вызвать остановку движения и серьезные экономические потери.

В последние годы наблюдается устойчивый тренд к переходу от реактивного обслуживания к проактивному управлению активами, где ключевую роль играет предиктивная диагностика. Применение беспилотных авиационных систем (БПЛА) [2–4], оснащенных высокоточными тепловизионными камерами, открывает новые возможности для быстрого и бесконтактного сбора обширных наборов данных о тепловом состоянии протяженных объектов.

Однако эффективность дистанционного сканирования существенно возрастает при условии автоматизированной обработки полученных изображений. Ручной анализ тысяч снимков не решает проблему масштабируемости. Интеграция методов компьютерного зрения (КЗ), в частности алгоритмов глубокого обучения [5], позволяет трансформировать сырые тепловые данные в структурированную информацию, автоматически идентифицируя и классифицируя аномальные температурные паттерны, характерные для различных типов повреждений изоляции или утечек.

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки интегрированной, высокоэффективной и автоматизированной системы контроля состояния железнодорожных теплосетей.

Целью работы является разработка и апробация методики автоматизированной детекции и классификации тепловых аномалий в сетях теплоснабжения железных дорог. Данная методика бази-

руется на интеграции высокоточных данных дистанционного тепловизионного сканирования, собранных автономными БПЛА, со специализированными алгоритмами компьютерного зрения, что позволит перейти к проактивному управлению состоянием инфраструктуры и повышению ее операционной безопасности.

Реализация заявленной цели по автоматизированной детекции и классификации тепловых аномалий достигается посредством комплексного подхода, интегрирующего аэрофотосъемку и передовые алгоритмы машинного обучения. Предлагаемая методика реализуется в три последовательных, но тесно связанных этапа:

1. Высокоточное планирование и сбор данных.
2. Интеллектуальная обработка методами компьютерного зрения.
3. Классификация выявленных явлений для формирования предиктивных рекомендаций по обслуживанию.

Сбор данных начинается с разработки детального полетного задания, которое учитывает геометрию трассы теплоснабжения, наличие естественных и искусственных препятствий, а также требует заданной пространственной разрешающей способности для адекватного захвата тепловизионных данных. БПЛА функционирует в автономном режиме, строго следуя заданному трехмерному маршруту, что достигается за счет непрерывного позиционирования и использования алгоритмов сопровождения, позволяющих аппарату «цепляться» за линейные объекты контроля – сами теплотрассы, даже при наличии незначительных отклонений от начальной траектории. Для обеспечения точности привязки и минимизации ошибок позиционирования в ходе миссии используются GNSS-приемники с функцией высокоточной кинематической коррекции. Тепловизионные датчики настраиваются на оптимальную температурную чувствительность, необходимую для фиксации даже незначительных градиентов тепла, характерных для повреждений изоляции (рис. 1), которые могут находиться на значительной глубине под грунтом. После сбора данных выполняется их ортотрансформация и сшивка в единую карту теплового поля, которая точно соответствует цифровой модели местности исследуемой теплотрассы.

Ключевым элементом системы является этап интеллектуальной обработки, где потенциал дистанционного сканирования раскрывается через автоматизированный анализ. Традиционные алгоритмы, основанные на пороговой обработке, заменяются моделями глубокого обучения.

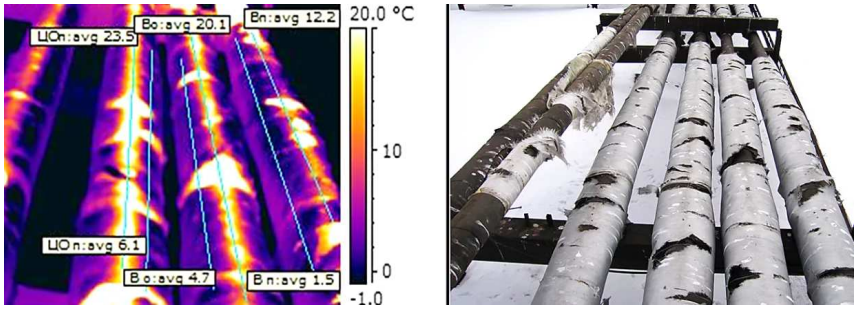

Рисунок 1– Пример выявления аномалий в теплотрассе

На этом этапе используется сверточная нейронная сеть, предварительно обученная на обширном аннотированном датасете, содержащем изображения как нормальных, так и дефектных участков теплосетей. Применяется архитектура, оптимизированная для задач семантической сегментации, что позволяет системе автоматически выделять тепловые паттерны, характерные для повреждений, игнорируя при этом фоновые тепловые помехи от окружающей среды. После точной локализации система переходит к классификации. Алгоритм анализирует морфологические и термические характеристики выделенной аномалии – форму, площадь, максимальную и среднюю температуру – соотнося их с эталонными профилями повреждений. Классификация позволяет разделить выявленные тепловые аномалии на категории, такие как незначительное тепловое искажение, умеренное повреждение изоляционного слоя и критическая утечка. Результатом работы алгоритмов становится структурированный отчет, содержащий точные координаты и верифицированный тип потенциального дефекта, что обеспечивает возможность перехода служб эксплуатации к точечному и заблаговременному техническому обслуживанию.

Таким образом, предложенная методика, интегрирующая автономный сбор тепловизионных данных с помощью БПЛА и глубокое обучение для их анализа, позволит кардинально трансформировать подходы к эксплуатации систем теплоснабжения железных дорог. Внедрение этого комплексного решения обеспечит переход к предиктивному обслуживанию, значительно сократив время инспекционных работ и минимизируя риски внезапных отказов инфраструктуры. В результате, будет достигнуто существенное повышение общей надежности тепловых сетей, снижение операционных затрат и

минимизация аварийного ущерба, что подтвердит высокую эффективность применения технологий Компьютерного Зрения в области мониторинга критической инфраструктуры.

Список литературы:

1. Воденников Д.А., Жилкина Ю.В. Сравнительно-оценочный анализ зарядно-защитных станций для беспилотных летательных аппаратов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2025. – Т. 17. – № 1(65). – С. 51–70. – EDN GFYWQK.
2. Сацюк А.В. Мониторинг инфраструктуры на основе искусственного интеллекта // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 9. – С. 32–34. – DOI: 10.62994/AT.2025.9.9.005. – EDN OXBPFP.
3. Сацюк А.В., Воевода Е.Г. Система автоматического контроля безопасности на железнодорожных переездах // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2024. – № 2(73). – С. 39–45. – EDN LDLPWU.
4. Сацюк А.В., Воробьев А.А. Особенности разработки беспилотных летательных аппаратов для отрасли железнодорожного транспорта // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2023. – № 68. – С. 13–21. – EDN GSWIPU.
5. Filatova D., Punko U.V., El-Nouty Ch. High-Throughput Deep Learning Algorithm for Diagnosis and Defects Classification of Waterproofing Membranes // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2020. – Vol. 16. – № 2. – P. 26–38. – DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-2-26-38. – EDN CGFQEW.

List of references:

1. Vodennikov D.A., Zhilkina Yu.V. Comparative and Evaluation Analysis of Charging and Protective Stations for Unmanned Aerial Vehicles // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. – 2025. – Vol. 17. – № 1 (65). – P. 51–70. – EDN GFYWQK.
2. Satsyuk A.V. Infrastructure Monitoring Based on Artificial Intelligence // Automation, Communications, Informatics. – 2025. – № 9. – P. 32–34. – DOI: 10.62994/AT.2025.9.9.005. – EDN OXBPFP.
3. Satsyuk A.V., Voevoda E.G. Automatic Safety Control System at Level Crossings // Collection of Scientific Papers of the Donetsk Institute of Railway Transport. – 2024. – № 2(73). – P. 39–45. – EDN LDLPWU.
4. Satsyuk A.V., Vorobyov A.A. Features of the development of unmanned aerial vehicles for the railway transport industry // Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport. – 2023. – № 68. – P. 13–21. – EDN GSWIPU.
5. Filatova D., Punko U.V., El-Nouty Ch. High-Throughput Deep Learning Algorithm for Diagnosis and Defects Classification of Waterproofing Membranes // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2020. – Vol. 16. – № 2. – P. 26–38. – DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-2-26-38. – EDN CGFQEW.