

Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2024. № 1(139). С. 71–79.

Equipment and technologies for oil and gas complex. 2024;(1(139)):71–79.

Научная статья

УДК 004.93:621.3.073.97

2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

## Алгоритмы компьютерного зрения и искусственного интеллекта для детекции дефектов на энергетическом оборудовании и объектах трубопроводного транспорта

А.И. Величко<sup>1</sup>, В.А. Зубакин<sup>2</sup>, М.Д. Трегубенко<sup>3</sup>, К.Н. Юсупов<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Smartren, Москва, Россия

<sup>2</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

<sup>4</sup>НПО Б энд Б Индастриз, Москва, Россия

<sup>1</sup>arseny\_velichko@smartren.ru, <sup>2</sup>zubakinv@gmail.com, <sup>3</sup>maxim\_tregubenko@smartren.ru,

<sup>4</sup>kiyus@bandbind.ru

**Аннотация.** Данная научная статья рассматривает применение передовых алгоритмов компьютерного зрения и искусственного интеллекта для выявления дефектов в различных видах энергетического оборудования. Области применения включают линии электропередач, ветроэнергетические установки, солнечные панели и объекты трубопроводного транспорта. В ходе исследования детально анализируются основные категории дефектов, свойственных энергетическому оборудованию, и проводится обзор текущих методов обнаружения этих неисправностей. Авторы предлагают инновационный подход, интегрируя беспилотные летательные аппараты и искусственный интеллект для эффективного обнаружения дефектов. В статье представлен технологический процесс детекции дефектов, описаны детали алгоритмов, специально разработанных для широкого спектра энергетического и технологического оборудования. Этот подход совмещает в себе передовые методы анализа данных и автоматизированную систему обнаружения, что обеспечивает надежность и точность в выявлении дефектов, способствуя повышению эффективности обслуживания энергетических объектов.

**Ключевые слова:** трубопроводный транспорт, электропередача, возобновляемые источники энергии, солнечные электростанции, ветровые электростанции, беспилотные летательные аппараты, компьютерное зрение, искусственный интеллект, сверточные нейронные сети

**Для цитирования:** Алгоритмы компьютерного зрения и искусственного интеллекта для детекции дефектов на энергетическом оборудовании и объектах трубопроводного транспорта / А.И. Величко, В.А. Зубакин, М.Д. Трегубенко, К.Н. Юсупов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2024. – № 1(139). – С. 71–79.

Original article

### COMPUTER VISION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS FOR DETECTING DEFECTS IN POWER EQUIPMENT AND PIPELINE TRANSPORT FACILITIES

A.I. Velichko<sup>1</sup>, V.A. Zubakin<sup>2</sup>, M.D. Tregubenko<sup>3</sup>, K.N. Yusupov<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>SmartRen Ltd, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russia

<sup>4</sup>B&B Industries, Moscow, Russia

<sup>1</sup>arsenyvelichko98@mail.ru, <sup>2</sup>zubakinv@gmail.com, <sup>3</sup>maxim\_tregubenko@smartren.ru, <sup>4</sup>kiyus@bandbind.ru

**Abstract.** This scientific article extensively explores the application of advanced computer vision and artificial intelligence algorithms for detecting defects in various types of energy equipment. The areas of application include power transmission lines, wind energy installations, solar panels, and pipeline transportation objects. The research provides a detailed analysis of the main categories of defects inherent in energy equipment and reviews current methods for detecting these malfunctions. The authors propose an innovative approach by integrating unmanned aerial vehicles and artificial intelligence for effective defect detection. The article presents the technological process of defect detection, describing the details of algorithms specifically designed for a broad spectrum of energy and technological equipment. This approach combines advanced data analysis methods with an automated detection system, ensuring reliability and ac-

curacy in defect identification and contributing to the increased efficiency of maintenance for energy facilities.

**Keywords:** pipeline transport, power lines, renewable energy sources, solar power plants, wind farms, unmanned aerial vehicles, computer vision, artificial intelligence, convolutional neural networks

**For citation:** Computer vision and artificial intelligence algorithms for detecting defects in power equipment and pipeline transport facilities / A.I. Velichko, V.A. Zubakin, M.D. Tregubenko, K.N. Yusupov // Equipment and technologies for oil and gas complex. 2024;(1(139)):71–79.

## Введение

Энергетика является базовой отраслью экономики, и бесперебойная работа энергетического оборудования была и остается ключевым фактором эксплуатации. В российских реалиях энергетическое оборудование расположено в местах с различными климатическими условиями и подвергается негативному воздействию со стороны различных факторов.

Так, на лопастях ветрогенераторов могут возникнуть дефекты из-за окисления, сильных ветровых и снежных нагрузок, усталости материалов и др. [1]. Статистический анализ, посвященный отказам шведских ветряных электростанций (ВЭС) в 1997–2005 гг., показал, что повреждение лопастей составляет 13,4 % всех отказов. На редукторы и генераторы приходится 9,8 и 5,5 % повреждений, соответственно [2]. Регулярный мониторинг и, главное, анализ данных являются основным превентивным средством против серьезных повреждений, которые могут привести к выходу из строя ветроэнергетической установки.

Солнечные панели также подвергаются различным видам повреждений и износу, которые можно характеризовать как постоянную потерю мощности.

Для гидроэлектростанций помимо детекций дефектов на основном энергетическом оборудовании актуально использовать технологии компьютерного зрения для мониторинга акватории водохранилищ гидроэлектростанций (ГЭС) и детекции плавающих предметов, несанкционированного проникновения в акваторию вблизи от гидротехнических сооружений и др.

Стенки газонефтепроводов и тепловых сетей во время эксплуатации подвергаются воздействию коррозионной среды, а также больших радиальных и осевых нагрузок, что при отсутствии своевременного ремонта может привести к нарушению целостности трубопровода. Также целостность может быть нарушена из-за несанкционированных врезок, что можно оперативно определять с помощью алгоритмов компьютерного зрения анализа снимков с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Линии электропередач (ЛЭП) играют очень важную роль в энергосистеме, и бесперебойная работа ЛЭП является ключом к обеспечению работы системы электроснабжения. Диагностика и техническое обслуживание ЛЭП являются ключевыми вопросами в работе сектора передачи и распределения электроэнергии. Регулярный осмотр линии с помощью ручного или авто-

матического оборудования позволяет оценить состояние сетевого хозяйства, а также своевременно выявить неисправности, чтобы обеспечить безопасную и эффективную работу ЛЭП и бесперебойное электроснабжение потребителей.

Для своевременного обнаружения дефектов используются контактные и бесконтактные методы, однако для получения большого числа снимков требуется значительный человеческий ресурс, поэтому использование БПЛА и искусственного интеллекта является актуальным и дешевым методом обнаружения дефектов. Технология БПЛА предоставляет новую возможность диагностики ЛЭП. Стоимость процесса детекции БПЛА относительно невелика, он является гибким и расширяемым. Чтобы обеспечить безопасность и стабильность энергоснабжения в существующей большой и сложной энергосистеме, использование БПЛА с помощью технологии компьютерного зрения стало насущной необходимостью для развития современной энергосистемы.

Трубопроводный транспорт играет важную роль в экономике государства. Как и в случае любого технологического процесса, возникают неизбежные потери. Некоторые потери являются преднамеренными, в то время как другие происходят из-за неисправностей оборудования. Недавние исследования показывают [3], что утечки в нефтегазовой промышленности оцениваются в 2,3 % потерь в год. Перспективы и возможности диагностики объектов трубопроводного транспорта нефти и газа, в том числе с использованием БПЛА, изложены в статьях [4–6 и др.].

В этой статье будут рассмотрены следующие методы автоматизации диагностики дефектов энергетического оборудования: на лопастях ветровых турбин, на солнечных панелях, ЛЭП и утечек трубопроводного транспорта с помощью БПЛА.

## Диагностика дефектов на лопастях ветровых турбин

Традиционный подход заключается в периодическом визуальном мониторинге посредством поднятия специалистов на ветроэнергетическую установку. Однако это трудозатратный подход, который представляет собой целый комплекс сложных мероприятий, зависящий от специального оборудования и погодных условий. Поэтому использование удаленной системы поможет решить проблему останова ветрогенератора и необходимости использования человеческого ресурса.

Например, использование БПЛА является актуальным методом диагностики и набирает все большие обороты во всем мире. При этом, помимо минимизации риска для персонала ВЭС, использование дронов дает возможность получать снимки в труднодоступных местах с высоким разрешением. Полученные снимки в видимом, инфракрасном спектре обрабатываются специальными алгоритмами и подаются в нейронные сети для классификации и обнаружения дефектов.

Методы контроля состояния турбины можно разделить на контактный и бесконтактный. При этом большинство контактных методов основано на оценке вибрации. Бесконтактные методы могут быть основаны на анализе инфракрасного спектра, акустических измерений и виброакустических измерений. При этом с развитием цифровизации и искусственного интеллекта контактные методы с использованием человеческого труда заменяются удаленными системами.

Авторы работы [7] обучили нейронную сеть типа Model-Agnostic Meta-Learning (MAML) – тип нейронных сетей, который хорошо обобщается на новые задачи. Признаковое пространство было получено за счет извлечения данных из характеристик спектральной плотности мощности, а не амплитуд каждой частоты сигнала.

Помимо акустических методов возможно определять дефекты с помощью анализа данных, полученных со SCADA и при помощи алгоритмов машинного обучения [8]. Оценивать состояние ветроэнергетической турбины можно, диагностируя различные значения на кривой мощности ветрогенератора (рис. 1), разбивая

значения по кластерам с помощью метода  $k$ -средних, определяя количество кластеров методом локтя (elbow method), который находит оптимальное количество кластеров в зависимости от дисперсии кластеров.

Таким образом, данные, полученные со SCADA, проходят первичную обработку, очищаются от выбросов, затем признаковое пространство будущей модели сужается за счет определения статистически значимых параметров (Борута метод, статистические методы и др.). Далее они подаются в конвейер обучения, где определяются оптимальные параметры модели. В результате определяется лучшая модель с точки зрения прогноза температуры масла в коробке передач, так как при возникновении неисправности в турбине загрязнение масла, а значит, и колебания температуры могут служить ранним сигналом неисправности. Помимо акустического, вибрационного и визуального методов



Рис. 1. Кривая мощности ветрогенератора

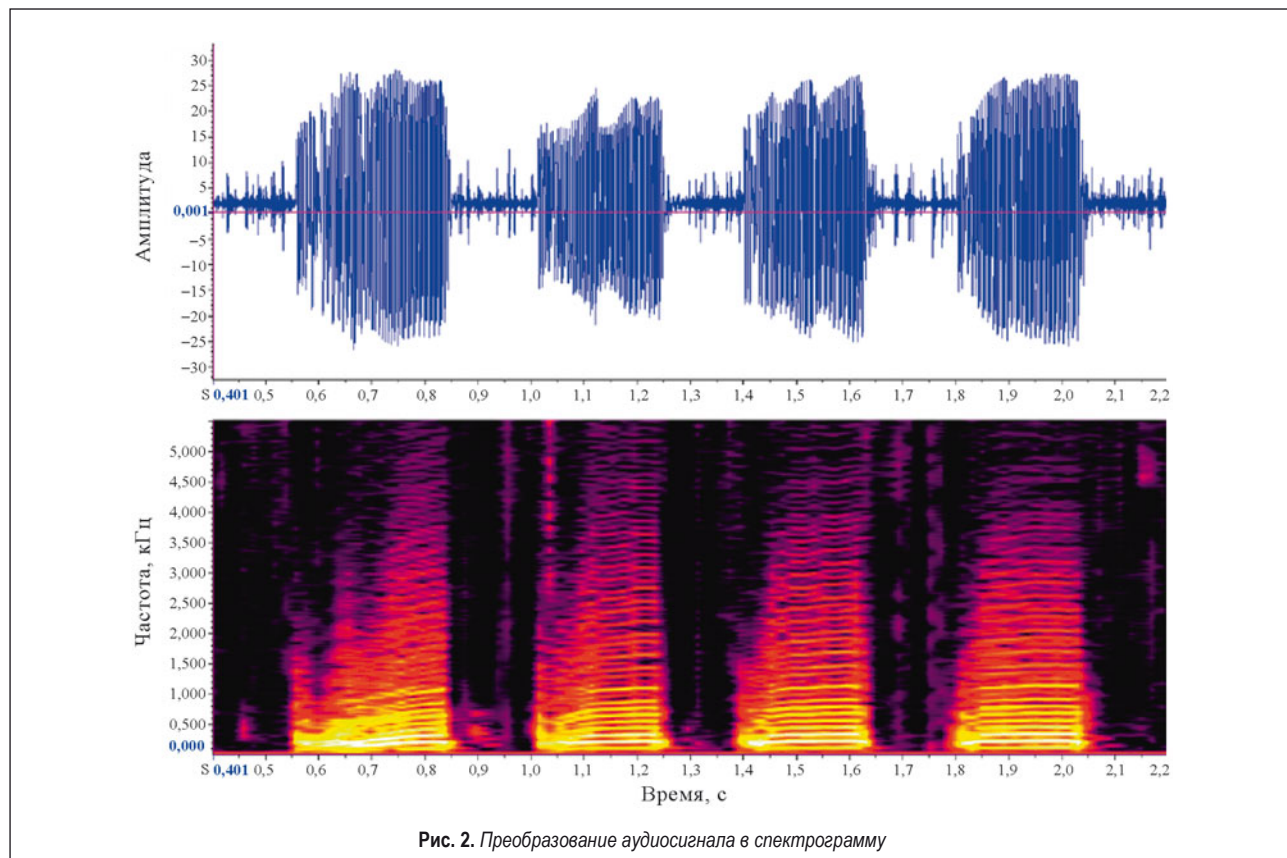


Рис. 2. Преобразование аудиосигнала в спектрограмму



возможно определять дефекты с помощью комбинации снимков с лопастей и турбин и акустических сигналов.

Такие данные имеют явную пространственную и временную составляющие, а значит, могут быть хорошо интерпретированы сверточными и рекуррентными нейронными сетями.

Акустические сигналы можно преобразовать в спектрограмму (рис. 2) с помощью оконного преобразования Фурье, а затем передать в модель. Кроме собранных данных с акустических приборов, возможно увеличение их объема за счет смещения времени, растяжения по времени, добавления гауссовского шума и др.

### Диагностика дефектов на солнечных панелях

Частыми причинами поломок солнечных панелей в период эксплуатации являются неисправности распределительного устройства, разбитие стекла (рис. 3–4), дефект соединения, неплотный каркас, дефекты диодов, горячие точки (hot spots), деятельность птиц и др.

Кроме вышеуказанных видов дефектов, возможен усталостный износ фотоэлектрических элементов в результате частых температурных перепадов и силовых воздействий снежного покрова и ветровой нагрузки.

Оперативно выявить неисправности в солнечных панелях поможет диагностика дефектов методами искусственного интеллекта. Система обнаружения и классификации неисправностей состоит из двух частей: системы с датчиками и системы обнаружения и классификаций дефектов. Затем данные поступают в систему



Рис. 3. Разбитые стекла на солнечной панели

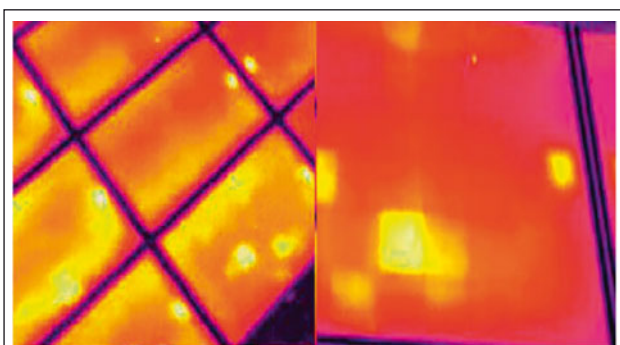


Рис. 4. Горячие точки на солнечных панелях

обнаружения дефектов, в которой происходит их классификация. В этой части данные от датчиков сначала могут быть предварительно обработаны или отправлены непосредственно на этап сбора/хранения данных. Следующий шаг – передача данных на место неисправности.

Технологии определения дефектов и классификацию дефектов разделяют на визуальные, температурные и электрические методы [9]. При этом для получения снимков в высоком разрешении требуется использование человеческих ресурсов, особенно в недоступных местах. Поэтому для труднодоступных или обширных территорий солнечных электростанций (СЭС) целесообразно использовать БПЛА, которым можно управлять вручную или соответствующим образом настроить, используя карту объекта и координаты GPS. В связи с большой площадью СЭС и недоступностью территорий, использование снимков, полученных с БПЛА, является дешевым способом получения изображений.

С помощью БПЛА можно создать большое число изображений в разных спектрах, а также термографические изображения. После получения изображений требуется около двух дней для просмотра снимков специалистом и обнаружения дефектов. Современные исследования показывают, что использование алгоритмов машинного обучения позволяет достичь точности до 100 % детекции и классификации дефектов на данных снимках [10]. Таким образом, использование БПЛА с алгоритмами искусственного интеллекта является эффективным и дешевым методом диагностики дефектов СЭС.

### Диагностика неисправностей ЛЭП с помощью БПЛА

Существует множество методов диагностики ЛЭП, включая более традиционные методы проверки линий вручную, использование усовершенствованных роботов для проверки линий и наблюдение с помощью летательных аппаратов. Опытные инспекторы могут обнаружить различные неисправности и скрытые опасности на линии непосредственно наблюдением на месте. Однако эффективность этого метода относительно невысока, а требования к персоналу, проводящему испытания, относительно высоки. Человек также склонен к ошибкам в обнаружении неисправностей из-за усталости и небрежности. Поэтому с постепенным прогрессом науки и техники работу человека необходимо автоматизировать.

Инспекция ЛЭП также проводится с помощью пилотируемой авиации. Самолет летит по линии в соответствии с заданным планом и параметрами. По пути линия наблюдается с помощью видимого спектра, инфракрасного излучения и т. д. Собранные данные передаются и обрабатываются на удаленный сервер. Этот метод обладает такими преимуществами, как высокая скорость диагностики и широка угла наблюдения. Однако цена на летательные аппараты общего назначения высока.

С развитием технологии БПЛА появилась совершенно новая возможность диагностики ЛЭП [11, 12]. Стоимость процесса диагностики с помощью БПЛА относительно невелика, а его использование является гибким и масштабируемым. Установив соответствующее контрольное оборудование для дистанционного управления, можно проверить большинство ЛЭП, возводимых в настоящее время. Кроме того, процесс осмотра линии с помощью БПЛА значительно повысит безопасность эксплуатации. Этот метод наследует все преимущества предыдущего, исключив недостаток дороговизны.

При детекции неисправностей с помощью БПЛА существует возможность привязки к геоподоснове, а также нанесения определенной области вокруг ЛЭП, в которой необходимо предотвращать рост кроны деревьев. В случае детекции подобного дефекта формируется техническое задание для подрядной организации для очистки коридора трассы ЛЭП от растительности и т. д.

Также, помимо определения целостности линии, возможна детекция отсутствующих крепежных элементов конструкции ЛЭП.

Технология диагностики ЛЭП на базе БПЛА быстро развивается [13–16]. Беспилотные летательные аппараты, используемые для осмотра ЛЭП, можно разделить на четыре типа: с неподвижным крылом; винто-

крылые; беспилотные вертолеты; вертикального взлета и посадки (рис. 5).

Вариант БПЛА с неподвижным крылом показан на рис. 5, а, и его скорость полета может превышать 100 км/ч. Благодаря совершенной аэродинамической конструкции он обладает наибольшей дальностью полета. Однако из-за большой формы этого типа БПЛА необходима специальная взлетно-посадочная полоса.

Тип БПЛА с поворотным крылом показан на рис. 5, б. Он имеет простую конструкцию, низкую стоимость и удобное управление. Обычно он использует радиочастоты для связи в режиме реального времени и может быть подвешен в фиксированной точке для съемки. Этот вид БПЛА, как правило, летает на низкой скорости, ему не хватает запаса хода, и его можно использовать только для осмотра определенных деталей.

Как показано на рис. 5, в, по сравнению с самолетами с неподвижным крылом беспилотные вертолеты обладают лучшей маневренностью в воздухе, могут взлетать и садиться на короткие расстояния и зависать в ключевых точках обнаружения. Но беспилотным вертолетам также не хватает запаса хода, и их скорость немного ниже, чем у БПЛА с неподвижным крылом, поэтому они подходят только для патрулирования линии на короткие расстояния.

В свою очередь, БПЛА с неподвижным крылом вертикального взлета и посадки показан на рис. 5, г. Он

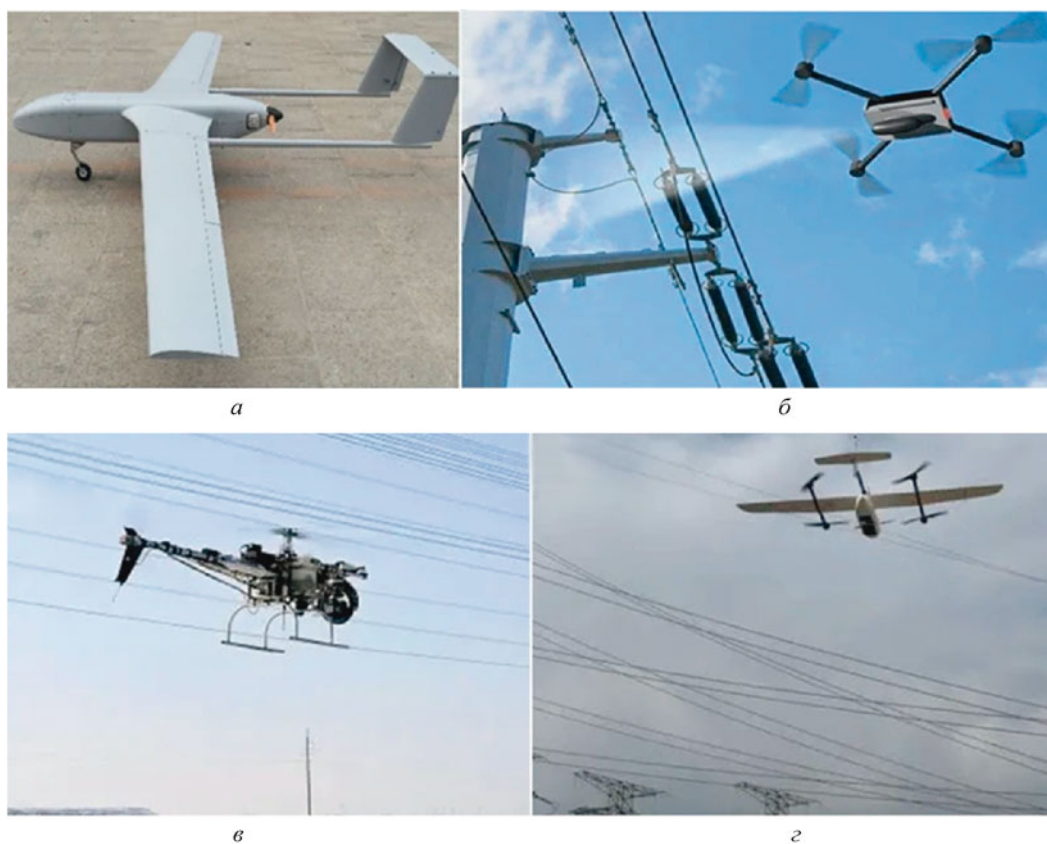


Рис. 5. Виды БПЛА

учитывает преимущества легкого взлета и посадки винтокрылого летательного аппарата и длительное время полета БПЛА с неподвижным крылом. Самолеты БПЛА с неподвижным крылом вертикального взлета и посадки имеют два режима полета, включая режим винтокрыла и режим неподвижного крыла. Но БПЛА такого типа достаточно дорогостоящие.

Структуру диагностической системы можно разделить на две части: бортовую и наземную. Бортовая система в основном отвечает за сбор полетной и линейной информации БПЛА, в то время как наземная часть отвечает за прием информации, отправляемой БПЛА, обработку данных, управление и вычисления.

Бортовая система содержит различные функциональные модули. Система управления полетом контролирует процесс полета дрона, обеспечивает полет дрона на определенной скорости, высоте и угле. Система управления полетом должна выполнять такие функции, как сбор параметров полета, стабилизация высоты и угла наклона полета, противодействие изменениям воздушного потока, изменение состояния полета в соответствии с инструкциями по управлению, реагирование на аварийные ситуации. Система распознавания расположена на борту дрона и на земле. Ее составные части соединены друг с другом беспроводной связью. Система распознавания использует установленный алгоритм для фотографирования силового оборудования вдоль линии. Сфотографированное изображение передается на наземный терминал через систему управления данными. Наземный терминал завершает определение конечного состояния линии. Система уп-

равления данными находится между бортовой и наземной системами и завершает сбор, идентификацию и хранение информации о состоянии ЛЭП посредством взаимной передачи данных и отдельной обработки с обеих сторон. Бортовая система управления данными извлекает, сжимает и сохраняет информацию в виде изображения в видимом или инфракрасном диапазоне. Эти изображения обрабатываются с помощью сверточных нейронных сетей. Затем выбирается информация о неисправностях в линии для последующего анализа. Данные, объединенные с собранной в данный момент исходной информацией об изображении, отправляются на наземную станцию, и наземная станция использует компьютер с более высокой вычислительной мощностью для углубленного анализа и извлечения эффективной информации.

При использовании БПЛА для диагностики ЛЭП объем изображений и видеоданных, собираемых дроном, очень велик. Персонал не может вручную определить, является ли линия передачи нормальной или нет. Необходимо использовать различные технологии компьютерного зрения и искусственного интеллекта, такие как классификация компонентов ЛЭП, сегментация линии, детекция неисправностей.

Технология распознавания изображений требует обработки исходного изображения для получения соответствующих результатов и, как правило, предъявляет высокие требования к исходному изображению. Из-за влияния самой линии, угла наклона камеры и погодных условий идентификация контрольного изображения ЛЭП сопряжена с различными трудностями: не-

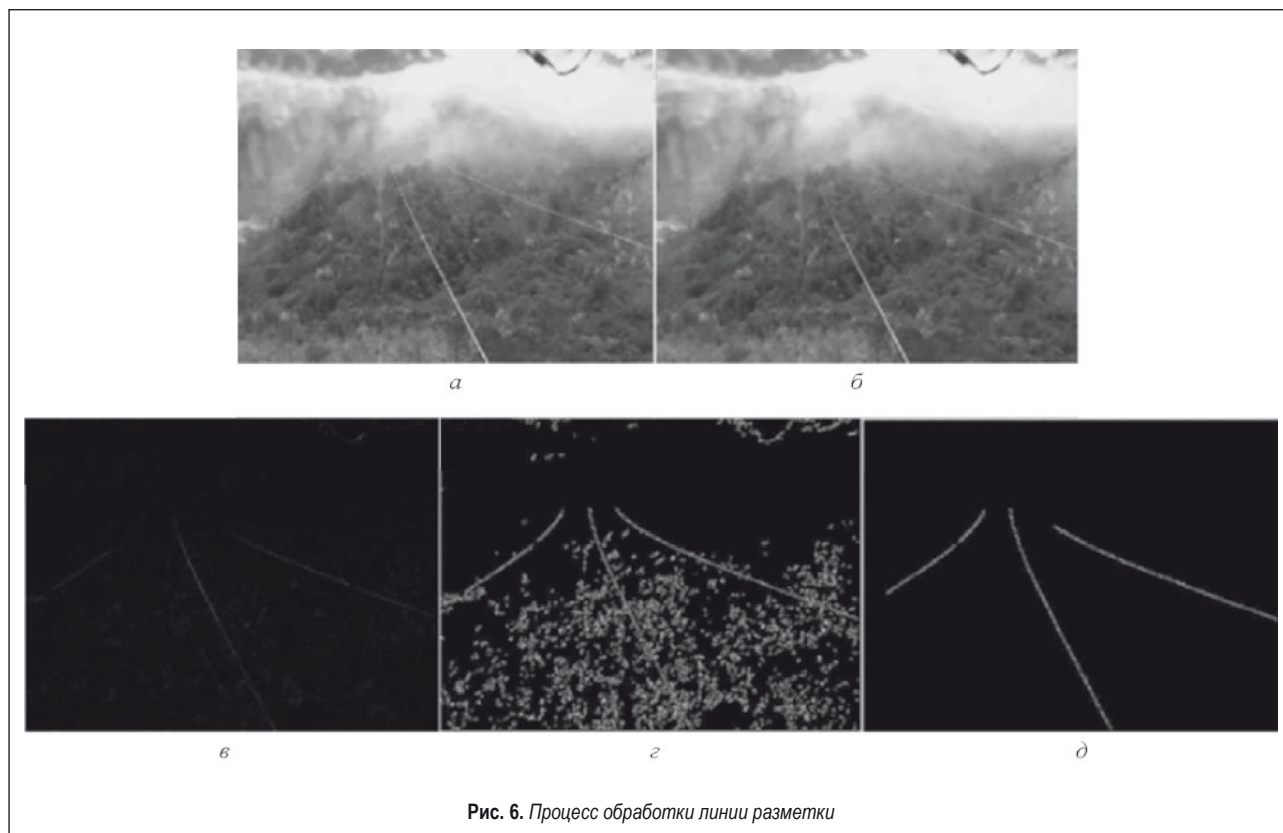


Рис. 6. Процесс обработки линии разметки



большой шириной линии; изменяемостью угла обзора камеры; длиной линии, которая не помещается на одном изображении; накладыванием линий различного уровня друг на друга; изменчивостью фона, зависящего от таких внешних условий, как погода, которая может привести к размытию и искажению изображения из-за дождя и снега.

Учитывая описанную выше ситуацию, для решения задачи диагностики ЛЭП обычно можно использовать следующие процедуры [16]:

1. Обработка в оттенках серого. Выполняется на исходном изображении, информация о цвете на изображении удаляется, емкость запоминающего устройства увеличивается. Данные изображения уменьшаются, и контур объекта легко определяется.

2. Фильтрация. Выполняется фильтрация шумов, которые имеются в первоначальном изображении, передачей и обработкой в оттенках серого.

3. Извлечение края контура с последующей фильтрацией, чтобы уменьшить влияние алгоритма на изображение и получить чистый контур изображения линии передачи.

4. Сегментация линии. Контурное изображение линий передачи, полученное на предыдущем шаге, помещается на исходном изображении.

5. Детекция дефектов на подготовленном изображении.

6. Передача информации о неисправностях диспетчеру.

Процесс обработки изображения приведен на рис. 6.

### Диагностика неисправностей трубопроводного транспорта с помощью БПЛА

Промышленные объекты изобилуют многочисленными точками отказа, где потенциально может произойти утечка. Еще более серьезной проблемой является выявление точек утечки вдоль бесконечных километров трубопроводов. Для определения местоположения утечки газа требуется команда инспекторов, которые используют множество детекторов и контрольного оборудования.

Существуют три распространенных классических типа детекторов, используемых для поиска утечек трубопроводов:

- Стационарные извещатели – это датчики, установленные внутри объекта или вдоль трубопровода. Они размещаются в таких местах повышенного риска, как клапаны. Эти устройства предназначены для оповещения персонала о возникновении утечки.

- Автоматические извещатели обычно являются роботизированными и могут перемещаться по объекту в поисках утечек. Эти детекторы находятся в зачаточном состоянии. Такие роботы могут работать в труднодоступных местах предприятия, но их применение ограничено за пределами их конкретной области деятельности.

- Портативные детекторы находятся при себе у членов инспекционных групп и используют широкий

спектр датчиков для обнаружения возможных утечек. Несмотря на то, что они полезны, эти детекторы часто помещают людей в опасную или токсичную среду.

Традиционные методы обнаружения утечек газа оказались полезными в промышленном применении. Однако они не всегда являются идеальным решением проблемы. Этим методам часто не хватает эффективности, и они подвергают людей опасности. Инспекции беспилотниками выявляют участки мертвой растительности как признак установленной утечки. Хотя для достижения тех же результатов используются вертолеты, они чрезвычайно дороги и шумны. Беспилотники также обеспечивают менее опасную проверку маршрутов, часто через сложные районы, где традиционный метод обхода маршрута сопряжен с различными сложностями. Ярким примером этого является обнаружение утечек газа вдоль многокилометрового трубопровода, проходящего через пустыню или лес. Беспилотные летательные аппараты также являются отличными платформами для обнаружения утечек в отдаленных районах.

Для обнаружения используются специальные камеры, включая лидарные и тепловизионные.

Вся миссия может быть тщательно спланирована и превращена в запрограммированный план полета. После взлета беспилотник обследует местность и собирает данные о возможных утечках. Эти данные обрабатываются и анализируются на борту беспилотника и на базовой станции. Затем формируется отчет и идентифицируются любые утечки, присутствующие в этом районе. Благодаря расширенным функциям БПЛА эти отчеты предоставляют полезные данные, которые могут не только сэкономить затраты на транспорт, но и помочь защитить окружающую среду.

Диагностика трубопроводов с помощью БПЛА намного быстрее и точнее, чем та, которая проводится инспекционными группами с использованием портативных устройств. Кроме того, БПЛА очень экономичны по сравнению с использованием самолета с экипажем для обнаружения утечек.

### Заключение

В статье были рассмотрены методы автоматической диагностики оборудования различных энергетических объектов и сетевого хозяйства, а также объектов трубопроводного транспорта. Они используют такие технические средства, как искусственный интеллект и БПЛА и включают в себя диагностику дефектов на лопастях ветровых турбин, на солнечных панелях, ЛЭП, диагностику утечек. Приведенные методы обладают высокой точностью, скоростью и масштабируемостью. При этом автоматизация диагностики минимизирует влияние человеческого фактора и повышает безопасность труда.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *The structure healthy condition monitoring and fault diag-*

- nosis methods in wind turbines: A review / Wenyi Liu, Baoping Tang, Han Jiguang [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 44. – P. 466–472. – DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.005
2. Yanan Zhang, Avallone F., Watson S. Wind turbine blade trailing edge crack detection based on airfoil aerodynamic noise: An experimental study // *Applied Acoustics*. – 2022. – Vol. 191. – P. 108668. – DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108668
3. Assessment of methane emissions from the US oil and gas supply chain / R.A. Alvarez, D. Zavala-Araiza I., D.R. Lyon [et al.] // *Science*. – 2018. – Vol. 361, No. 6398. – P. 186–188. – DOI: 10.1126/science.aar7204
4. Гольдзон И.А., Завьялов А.П., Лопатин А.С. О перспективах использования систем автоматизированного контроля технического состояния оборудования объектов ТЭК с использованием беспилотных технологий // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2019. – № 6(551). – С. 25–30. – DOI: 10.33285/0132-2222-2019-6(551)-25-30
5. Будзуляк Б.В., Лопатин А.С., Ляпичев Д.М. Техническое диагностирование оборудования и трубопроводов объектов нефтегазового комплекса с применением инновационных технологий // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2019. – № 11(556). – С. 21–26. – DOI: 10.33285/0132-2222-2019-11(556)-21-26
6. Гусейнов К.Б., Задериголова М.М., Лопатин А.С. Геодинамический мониторинг магистральных газопроводов с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Тр. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина*. – 2016. – № 1(282). – С. 80–88.
7. Wind Turbine Blade Defect Detection Based on Acoustic Features and Small Sample Size / Yuefan Zhu, Xiaoying Liu, Shen Li [et al.] // *Machines*. – 2022. – Vol. 10, Issue 12. – P. 1184. – DOI: 10.3390/machines10121184
8. Eddie Yin Kwee Ng, Jian Tiong Lim. Machine Learning on Fault Diagnosis in Wind Turbines // *Fluids*. – 2022. – Vol. 7, Issue 12. – P. 371. – DOI: 10.3390/fluids7120371
9. Ying-Yi Hong, Pula R.A. Methods of photovoltaic fault detection and classification: A review // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 5898–5929. – DOI: 10.1016/j.egyr.2022.04.043
10. Deep learning strategies for automatic fault diagnosis in photovoltaic systems by thermographic image / D. Manno, G. Cipriani, G. Ciulla [et al.] // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – Vol. 241. – P. 114315. – DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114315
11. Robust real-time UAV based power line detection and tracking / Guang Zhou, Jinwei Yuan, I-Ling Yen, F. Bastani // *IEEE Int. Conf. on Image Processing, Phoenix, AZ, USA, Sept. 25–28. – 2017. – P. 744–748. – DOI: 10.1109/ICIP.2016.7532456*
12. Automatic detection of powerlines in UAV remote sensed images / K.N. Ramesh, A.S. Murthy, J. Senthilnath, S.N. Omkar // *2015 Int. Conf. on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Bangalore, India, Dec. 10–12. – 2015. – P. 17–21. – DOI: 10.1109/CATCON.2015.7449501*
13. Katrasnik J., Pernus F., Likar B. A survey of mobile robots for distribution power line inspection // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2010. – Vol. 25, Issue 1. – P. 485–493. – DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2035427
14. Van Nhan Nguyen, Jenssen R., Roverso D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning // *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*. – 2018. – Vol. 99. – P. 107–120. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.12.016
15. Review of autonomous inspection technology for power lines using UAVs / Sun Shuangchun, Li Yanlei, Yi Zhenxiao [et al.] // *2021 IEEE Int. Conf. on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT), Qingdao, China, July 02–04. – 2021. – P. 481–484. – DOI: 10.1109/ICEEMT52412.2021.9601446*
16. A review of UAV power line inspection / Zhaoyang Wang, Qiang Gao, Jianbin Xu, Dahua Li // *Advances in Guidance, Navigation and Control: Proceedings of 2020 Int. Conf. on Guidance, Navigation and Control (ICGNC 2020), Tianjin, China, Oct. 23–25, 2020. – Singapore: Springer, 2022. – P. 3147–3159. – DOI: 10.1007/978-981-15-8155-7\_263*

## REFERENCES



// *IEEE Int. Conf. on Image Processing, Phoenix, AZ, USA, Sept. 25–28. – 2017. – P. 744–748. – DOI: 10.1109/ICIP.2016.7532456*

12. *Automatic detection of powerlines in UAV remote sensed images / K.N. Ramesh, A.S. Murthy, J. Senthilnath, S.N. Omkar // 2015 Int. Conf. on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Bangalore, India, Dec. 10–12. – 2015. – P. 17–21. – DOI: 10.1109/CATCON.2015.7449501*

13. *Katrasnik J., Pernus F., Likar B. A survey of mobile robots for distribution power line inspection // IEEE Transactions on power delivery. – 2010. – Vol. 25, Issue 1. – P. 485–493. – DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2035427*

14. *Van Nhan Nguyen, Jenssen R., Roverso D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current*

*status and the potential role of deep learning // Int. J. of Electrical Power & Energy Systems. – 2018. – Vol. 99. – P. 107–120. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.12.016*

15. *Review of autonomous inspection technology for power lines using UAVs / Sun Shuangchun, Li Yanlei, Yi Zhenxiao [et al.] // 2021 IEEE Int. Conf. on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT), Qingdao, China, July 02–04. – 2021. – P. 481–484. – DOI: 10.1109/ICEEMT52412.2021.9601446*

16. *A review of UAV power line inspection / Zhaoyang Wang, Qiang Gao, Jianbin Xu, Dahua Li // Advances in Guidance, Navigation and Control: Proceedings of 2020 Int. Conf. on Guidance, Navigation and Control (ICGNC 2020), Tianjin, China, Oct. 23–25, 2020. – Singapore: Springer, 2022. – P. 3147–3159. – DOI: 10.1007/978-981-15-8155-7\_263*

---

#### **Информация об авторах**

**Арсений Игоревич Величко**, генеральный директор  
**Василий Александрович Зубакин**, д-р экон. наук,  
заведующий кафедрой возобновляемых источников энергии  
**Максим Дмитриевич Трегубенко**, технический директор  
**Кимал Наилевич Юсупов**, директор по развитию

#### **Information about authors**

**Arseny I. Velichko**, General Director  
**Vasily A. Zubakin**, DSc (economics), Head of the Department of  
Renewable Energy Sources  
**Maxim D. Tregubenko**, Technical Director  
**Kimal N. Yusupov**, Development Director

---

Статья поступила в редакцию 29.12.2023; одобрена после рецензирования 08.01.2024; принята к публикации 20.01.2024.