

УДК 621.315.17

UDC 621.315.17

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1. Technologies machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

РОБОТИЗАЦИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ КАК ФАКТОР НАДЁЖНОСТИ АГРОПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

ROBOTIC MAINTENANCE OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES AS A FACTOR IN THE RELIABILITY OF AGRO-INDUSTRIAL AREAS

Мухаметгалеев Танир Хамитевич
Канд. техн. наук, доцент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Mukhametgaleev Tanir Khamitovich
Cand.Tech.Sci., associate Professor
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Бикчантаев Адис Рустамович
Студент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Bikchantaev Adis Rustamovich
Student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Токмаков Виктор Александрович
Студент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Tokmakov Viktor Alexandrovich
Student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Усиление энергоёмкости и цифровизации агропроизводства повышает чувствительность сельскохозяйственных предприятий к кратковременным нарушениям электроснабжения, что делает повышение надёжности распределительных сетей актуальной инженерной и организационно-технологической задачей. Одновременно рост протяжённости обслуживаемой инфраструктуры при дефиците кадровых ресурсов и усилении климатических рисков требует перехода к более безопасным и измеримо воспроизводимым технологиям диагностики и обслуживания ЛЭП. В статье выполнен обзор робототехнических решений для обслуживания воздушных линий электропередачи с учётом специфики агропромышленных территорий, включая сезонную труднодоступность коридоров, высокую стоимость аварийных простоев и ограниченные возможности оперативного реагирования. Рассмотрены ключевые классы технологий: беспилотные летательные аппараты для дистанционной инспекции; лидарная съёмка с формированием трёхмерной модели коридора линии для контроля габаритов, провисов и растительности; мобильные платформы, перемещающиеся по проводам или грозотросу, предназначенные для контактной диагностики и выполнения локальных операций обслуживания. Систематизированы типовые задачи роботизированного контура: идентификация дефектов изоляторов, арматуры и

The increasing energy intensity and digitalization of agricultural production heighten the sensitivity of agricultural enterprises to short-term power supply disruptions, making the improvement of distribution network reliability a pressing engineering and organizational-technological task. At the same time, the growing extent of maintained infrastructure, coupled with workforce shortages and escalating climate-related risks, necessitates a transition to safer and measurably reproducible technologies for overhead power line diagnostics and maintenance. This paper provides a review of robotic solutions for servicing overhead power transmission lines, taking into account the specific conditions of agro-industrial areas, including seasonal inaccessibility of line corridors, high costs associated with emergency downtime, and limited capacity for rapid response. The key technology classes considered include unmanned aerial vehicles for remote inspection; LiDAR surveying with the development of a three-dimensional model of the line corridor to monitor clearances, sag, and vegetation; and mobile platforms traveling along conductors or shield wires for contact diagnostics and the execution of localized maintenance operations. Typical tasks within the robotic workflow are systematized, including the identification of defects in insulators, fittings, and conductors; monitoring of corridor overgrowth and hazardous clearances; post-event inspection following adverse weather conditions; and decision support for maintenance planning. A comparative evaluation approach is proposed based on

проводов, мониторинг зарастания просек и опасных сближений, обследование после неблагоприятных метеособытий, а также информационная поддержка планирования ремонтных работ. Предложен подход к сравнительной оценке вариантов по совокупности показателей безопасности, производительности, качества данных и затрат жизненного цикла. На расчётном примере участка распределительной сети показано, что комбинированное применение дистанционной инспекции и лидарно поддерживаемой обработки может обеспечить снижение трудозатрат на патрулирование в 1,5–2,5 раза и сокращение цикла получения диагностической информации до 1–2 суток при соблюдении требований промышленной безопасности

Ключевые слова: РОБОТИЗАЦИЯ, БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ; ИНСПЕКЦИЯ ЛЭП, МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, ГАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

an integrated set of indicators covering safety, productivity, data quality, and life-cycle costs. Using a calculated case study of a distribution network segment, it is shown that the combined use of remote inspection and LiDAR-supported processing can reduce patrolling labor requirements by 1,5–2,5 times and shorten the diagnostic information turnaround time to 1–2 days, provided that industrial safety requirements are met

Keywords: ROBOTICS, UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS), OVERHEAD POWER LINE INSPECTION, MOBILE ROBOTS, MAINTENANCE, POWER SUPPLY RELIABILITY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-216-021>

Введение. Надёжное электроснабжение является базовым условием устойчивости агропромышленного комплекса, поскольку определяет непрерывность работы мелиоративных систем, холодильного и сушильного оборудования, животноводческих комплексов и средств автоматизации. В сельских районах эксплуатация протяжённых воздушных линий электропередачи осложняется труднодоступностью коридоров, ветровыми и гололёдными нагрузками, зарастанием просек, коррозией арматуры и старением изоляторов, что повышает вероятность повреждений и удлиняет восстановительные работы [1]. Традиционная модель обслуживания, основанная на периодических обходах, выборочных осмотрах с подъёмом на опоры и внеплановых выездах после аварий, имеет системные ограничения: высокий уровень производственных рисков для персонала, значительные трудозатраты при больших расстояниях и временной разрыв между возникновением дефекта и получением достоверной диагностической информации. Эти ограничения усиливаются сезонностью и дефицитом транспортной доступности, поэтому переход к

<http://ej.kubagro.ru/2026/02/pdf/21.pdf>

обслуживанию, опирающемся на объективные измерения состояния элементов, приобретает как техническую, так и экономическую значимость.

Роботизация обслуживания ЛЭП рассматривается как способ повысить безопасность и оперативность работ за счёт переноса части операций в дистанционный контур управления и расширения информативности диагностики посредством мультисенсорных данных. В качестве робототехнических средств применяются беспилотные летательные аппараты для визуальной, тепловизионной, ультрафиолетовой и лидарной съёмки, а также мобильные платформы, перемещающиеся по проводам или грозотросам и пригодные для контактной диагностики и локальных операций обслуживания. Наиболее зрелыми считаются решения для автоматизированной визуальной инспекции и распознавания элементов инфраструктуры, тогда как лидарные методы обеспечивают переход от описательной фиксации к метрической модели коридора линии и формализуют контроль габаритов, провисов, приближения растительности и деформаций. Вместе с тем внедрение роботизации в аграрных регионах сдерживается регуляторными ограничениями полётов, требованиями электробезопасности и устойчивости управления вблизи проводников, ограничениями энергопитания и полезной нагрузки, а также необходимостью интеграции данных в цифровые системы эксплуатации и подготовки персонала. В результате ключевой задачей становится не выбор отдельного устройства, а проектирование воспроизводимого процесса обследования и обслуживания, в котором технологический эффект измеряется через снижение рисков, сокращение трудозатрат и повышение надёжности электроснабжения сельских потребителей.

Регуляторные и нормативные барьеры внедрения роботизированных средств в России в значительной мере связаны, во-первых, с требованиями к использованию воздушного пространства и учету БПЛА (ПП РФ № 138;

ПП РФ № 658), во-вторых — с требованиями электробезопасности при работах вблизи токоведущих частей. Для практики инспекции ВЛ это означает необходимость увязки полетных заданий с режимом охранных зон объектов электросетевого хозяйства (ПП РФ № 160), минимально допустимыми расстояниями и допусками персонала, а также организацией работ по нарядам-допускам (приказ Минтруда РФ № 903н).

Состояние исследований и актуальность проблемы. Современное состояние исследований по роботизации обслуживания воздушных линий электропередачи характеризуется переходом от разрозненных демонстрационных разработок к комплексным технологическим цепочкам, в которых сбор данных, их интерпретация и управленческое решение формируют единый контур. В научных работах обычно выделяются несколько уровней автоматизации: дистанционное наблюдение, когда робототехническая платформа выступает носителем измерительного комплекса, а анализ осуществляется специалистом; автоматизированная инспекция, при которой алгоритмы выполняют детекцию объектов и предварительную классификацию потенциальных дефектов; автономная инспекция, предполагающая навигацию вдоль линии, управление рисками столкновения, планирование траектории и контроль качества восприятия. Наиболее зрелые результаты достигнуты в задачах получения оптических данных и их использования для распознавания элементов опор, состояния изоляторов и арматуры, а также для мониторинга коридора линии, включая оценку состояния просек, растительности и последствий неблагоприятных погодных явлений.

Ключевым ограничителем масштабного внедрения роботизированных средств остаётся не столько наличие сенсоров, сколько воспроизводимость качества данных и устойчивость выводов при изменении внешних условий. Один и тот же дефект может проявляться по-разному при вариациях освещённости, ракурса наблюдения, загрязнения

поверхности, вибраций платформы и метеорологических факторов, что требует стандартизации сценариев съёмки, параметров полётных заданий и процедур валидации. Существенный вклад в повышение измерительной определённости вносит лидарная технология, поскольку она позволяет перейти от преимущественно визуального описания к метрически интерпретируемой модели коридора линии. Лидарно поддерживаемые протоколы инспекции обычно включают этапы классификации облака точек, выделения ключевых структурных объектов, построения маршрута обследования и обнаружения признаков неисправностей или опасных сближений [2]. Наличие геометрической модели делает возможной формализацию задач контроля габаритов, провисов и приближения растительности, что особенно значимо для сельских территорий с протяжёнными трассами и выраженной сезонной труднодоступностью [3].

Цель исследований. Целью работы является систематизация классов роботов и методов роботизированной диагностики ЛЭП, выделение факторов, критичных для сельских территорий, и оценка потенциальных качественных и количественных эффектов внедрения.

Материалы и методы исследований. Поисковая стратегия строилась по ключевым словам power line inspection, UAV, climbing robot, LiDAR, autonomous inspection, deep learning с отбором материалов, содержащих описание архитектуры системы, сенсорного состава, сценария применения и/или количественных метрик. Для обеспечения сопоставимости источники группировались по типу роботизированной платформы: БПЛА (дистанционная инспекция), лидарно-ориентированные решения (3D-моделирование коридора), мобильные роботы (контактные операции) и гибридные схемы. Далее выделялись функциональные задачи обслуживания: визуальный контроль элементов, геометрические измерения (провисы, габариты), мониторинг растительности, выявление

термодефектов и последствий стихийных воздействий, а также поддержка планирования ремонтов.

Критерии отбора включали: (1) хронологические рамки преимущественно 2010–2025 гг. (при необходимости привлекались базовые обзорные работы более ранних лет); (2) типы источников — рецензируемые статьи, материалы конференций и прикладные отчеты, содержащие описание архитектуры, сенсорного состава и метрик качества; (3) базы данных и площадки — Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect, eLIBRARY.RU, а также открытые нормативно-методические документы по полетам БПЛА и электробезопасности. Сравнительный анализ выполнялся на основе контент-анализа и сводной таблицы сопоставления (платформа/сенсоры/сценарий применения/метрики/ограничения), после чего формировались обобщенные выводы для условий агропромышленных территорий.

Результаты исследований. Результаты выполненного обзора позволяют предложить практико-ориентированную типологию роботизированных сценариев обслуживания воздушных линий электропередачи в условиях агропромышленных территорий, где протяжённость трасс, сезонная труднодоступность коридоров и высокая чувствительность технологических процессов к кратковременным отключениям формируют повышенные требования к оперативности и воспроизводимости диагностики. Первый сценарий может быть определён как дистанционное патрулирование, при котором беспилотные летательные аппараты выполняют сбор оптических и тепловизионных данных, а результатом выступает перечень участков с признаками потенциальных дефектов для последующей приоритизации и уточняющего обследования. Данный подход обеспечивает высокую скорость первичного скрининга и снижает необходимость выполнения работ персоналом вблизи токоведущих частей и на высоте, однако его эффективность существенно

зависит от стабильности условий съёмки и организационной стандартизации полётных заданий, ракурсов наблюдения и параметров получения данных, что критично для устойчивости алгоритмической интерпретации. Второй сценарий относится к геометрическому контролю коридора линии и основан на лидарной съёмке с последующим построением трёхмерной модели, из которой в автоматизированном или полуавтоматизированном режиме извлекаются параметры, значимые для эксплуатации, включая провисы, габариты, опасные сближения с растительностью и признаки деформаций. Для сельских трасс этот сценарий особенно релевантен вследствие интенсивного зарастания просек, ограниченного доступа механизированной техники и необходимости быстро получать метрически сопоставимые оценки состояния коридора на больших протяжённостях. Третий сценарий представляет собой контактную диагностику и локальные операции с использованием мобильных робототехнических платформ, перемещающихся по проводу или грозотросу и способных выполнять точечные измерения и обследование отдельных элементов, что потенциально снижает потребность в подъёме персонала на опоры и использовании подъёмных механизмов на удалённых участках, а также расширяет функциональные возможности от диагностики к элементам технического обслуживания при соответствующей технологической зрелости.

С позиции внедрения в агропромышленной инфраструктуре наибольший эффект ожидается от комбинированной архитектуры, в которой дистанционные технологии на базе беспилотных аппаратов и лидарной обработки используются для массового скрининга, выявления и ранжирования событий по критичности, тогда как контактные роботы и выездные бригады привлекаются для ограниченного перечня приоритетных точек, требующих уточнения, измерений повышенной

точности или выполнения локальных операций. Такая конфигурация переводит эксплуатационную практику от календарного патрулирования к риск-ориентированному управлению, при котором единицей планирования становятся не километры трассы, а совокупность выявленных событий и их вероятностно-значимостная оценка с учётом последствий для потребителей, включая сельскохозяйственные предприятия.

Пример интеграции данных в цифровой контур эксплуатации может быть реализован следующим образом: результаты дистанционной (фото-, тепловизионной) и лидарной съемки преобразуются в геопривязанные события (дефект, опасное сближение, превышение провиса) с уровнем критичности; далее событие привязывается к паспорту объекта по единому идентификатору (опора, пролет, изолятор) в ГИС/системе управления активами, после чего автоматически формируется заявка на обследование или ремонт в ERP/АСУ ТООП, а статус исполнения возвращается в диспетчерские системы и отчетность. Такая схема позволяет встроить роботизированную диагностику в процессы планирования и контроля работ (SCADA/ERP), сокращая разрыв между выявлением дефекта и организацией ремонтного воздействия.

Количественная оценка потенциальных эффектов выполнена на расчётном примере, параметризованном по типовым значениям, применяемым в исследованиях лидарно поддерживаемой инспекции. Принимая среднюю длину пролёта 250 м, что соответствует четырём пролётам на один километр трассы, рассмотрим участок, включающий 3536 пролётов, что эквивалентно примерно 884 км линии. Если принять нормативно-показательную оценку времени обследования одного пролёта порядка 10 минут при участии одного-двух специалистов, то суммарная длительность полевого этапа составит 3536 умножить на 10 минут, то есть 35 360 минут, или 589,3 часа. При привлечении двух специалистов это соответствует 1178 чел.-ч, что в пересчёте на протяжённость даёт около

1,33 чел.-ч на километр. Для сравнения, традиционное патрулирование в сельской местности целесообразно оценивать через диапазон эффективной скорости движения 0,6–1,2 км/ч с учётом подъездов, обхода препятствий и остановок на осмотр; тогда длительность обследования участка протяжённостью 884 км составит от 736,7 часа при скорости 1,2 км/ч до 1473,3 часа при скорости 0,6 км/ч. При двухчленной бригаде соответствующие трудозатраты составят 1473–2947 чел.-ч, что эквивалентно 1,67–3,33 чел.-ч на километр. Следовательно, роботизированная схема на базе лидарно поддерживаемой инспекции обеспечивает снижение трудозатрат ориентировочно в 1,25–2,5 раза по сравнению с традиционным патрулированием при сопоставимой протяжённости обследования. Дополнительный эффект связан с сокращением цикла получения управленческого результата за счёт стандартизируемой камеральной обработки и автоматизированного извлечения параметров коридора, что при наличии подготовленного контура обработки и интеграции с цифровыми системами эксплуатации позволяет перейти от многодневных и многонедельных задержек, обусловленных накоплением маршрутов и ручной подготовкой отчётности, к горизонту порядка 1–2 суток, одновременно повышая прозрачность контроля устранения дефектов и согласованность решений между эксплуатационными подразделениями.

Выводы. Наиболее обоснованной для агропромышленных территорий является комбинированная модель роботизации обслуживания ЛЭП, в которой массовая дистанционная инспекция на базе БПЛА и лидарных средств используется для первичного скрининга и ранжирования событий по критичности, а контактные операции и выездные работы выполняются точно по приоритетному перечню дефектов, что обеспечивает переход к риск-ориентированному планированию. Лидарная диагностика повышает метрическую определённость и воспроизводимость

результатов, переводя контроль провисов, габаритов и сближений с растительностью в количественно измеримую плоскость по сравнению с преимущественно визуальными сценариями. Расчётная оценка показывает, что роботизированные схемы способны снижать трудозатраты патрулирования примерно в 1,25–2,5 раза и сокращать цикл получения диагностической информации до 1–2 суток при наличии подготовленного контура обработки и интеграции данных в эксплуатационные системы. При этом основными барьерами внедрения остаются требования безопасности и регуляторные ограничения, устойчивость навигации и связи вблизи проводников, стандартизация данных и распределение ответственности за решения, принятые с использованием алгоритмических методов, что определяет приоритетные направления дальнейших исследований и НИОКР.

Библиографический список

1. Guan H., Sun X., Su Y., Hu T., Wang H., Wang H., Peng C., Guo Q. UAV-lidar aids automatic intelligent powerline inspection. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;130:106987. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106987
2. Kutrašnik J., Pernuš F., Likar B. A survey of mobile robots for distribution power line inspection. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010;25(1):485–493. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2035427.
3. Nguyen V.N., Jenssen R., Roverso D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018;99:107–120. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.12.016.

References

1. Guan H., Sun X., Su Y., Hu T., Wang H., Wang H., Peng C., Guo Q. UAV-lidar aids automatic intelligent powerline inspection. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;130:106987. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106987
2. Kutrašnik J., Pernuš F., Likar B. A survey of mobile robots for distribution power line inspection. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010;25(1):485–493. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2035427.
3. Nguyen V.N., Jenssen R., Roverso D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018;99:107–120. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.12.016.