

A. Arslan // The Palgrave handbook of corporate sustainability in the digital era. – Cham: Palgrave Macmillan, 2021. – С. 613-629.

2. Pal O. K. et al. In-depth review of AI-enabled unmanned aerial vehicles: trends, vision, and challenges [Текст]: / Discover Artificial Intelligence. – 2024. – Т. 4. – №. 1. – С. 97-121. DOI: 10.1007/s44163-024-00209-1.

3. Source code of open-source Colobot: Gold Edition project developed by Epsitec and TerranovaTeam [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/colobot/colobot> (дата обращения: 10.09.2025).

4. Официальный сайт Ceebot [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ceebot.org/> (дата обращения: 10.09.2025).

5. Официальный сайт Colobot Gold [Электронный ресурс]. URL: <https://colobot.info/> (дата обращения: 10.09.2025).

6. Демидович Г.Н. Системы радиоуправления [Текст]: учебно-метод. пособие к практическим занятиям для студ. спец. – I 39 01 02 «Радиоэлектронные системы» дневной формы обуч.: В 2 ч. Ч.1: Основы радиоуправления / Г.Н. Демидович. – Мн.: БГУИР, 2006. – 50 с.

УДК 629.7.05

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БПЛА ДЛЯ ИНСПЕКЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ

А.Б. СУХОЦКИЙ¹, Г.С. МАРШАЛОВА¹, Ю.В. ЖУКОВА²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Беларусь

Внедрение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга и обслуживания солнечных электростанций (СЭС) представляет собой технологический прорыв, который кардинально меняет подходы к обеспечению их производительности и надежности [1]. В условиях стремительного роста солнечной энергетики в Европе эффективность и экономическая целесообразность инспекционных работ становятся критически важными факторами. Традиционные методы, основанные на наземных обходах и ручном осмотре, уступают БПЛА по скорости, охвату, точности и безопасности. Настоящий отчет представляет всесторонний сравнительный анализ эффективности БПЛА и традиционных методов инспекции солнечных панелей в Европейском регионе,

рассматривая ключевые задачи – выявление дефектов, термографию и оценку производительности.

Одним из наиболее значимых преимуществ использования БПЛА для инспекции солнечных электростанций является беспрецедентная скорость сбора данных. Традиционный подход, при котором специалисты-инспекторы проходят по рядам панелей с камерами и приборами, занимает много времени и охватывает лишь 2–3% панелей на крупной СЭС. В отличие от этого, БПЛА способны за один день собрать данные с огромных площадей. Например, в Бразилии компания Drone Visual с помощью одного дрона DJI Matrice 210 RTK V2 провела полную инспекцию трех СЭС общей площадью 10 км² с 900 000 модулей за 13 дней. Количественные сравнения показывают, что дроны собирают данные более чем в 50 раз быстрее, чем ручные методы.

Использование БПЛА значительно повышает безопасность работы персонала, исключая необходимость подъема на крыши или перемещения по высоким конструкциям. Точность инспекции с помощью БПЛА обеспечивается передовыми системами навигации, включая GNSS/RTK, которые обеспечивают сантиметровую точность позиционирования. Это позволяет создавать высокодетализированные ортофотопланы и точные 3D-модели. Современные дроны оснащаются RGB-камерами высокого разрешения для выявления внешних дефектов (трещины, загрязнения) и тепловизионными камерами для обнаружения внутренних проблем («горячие точки» [2, 3], деградация PID, деламинация). Комплексный подход, сочетающий визуальную и тепловизионную съемку, обеспечивает наиболее полную картину состояния СЭС.

Экономическая целесообразность является одним из главных драйверов внедрения БПЛА. Инспекция солнечной электростанции с помощью дрона обходится на 46% дешевле, чем ручным методом [4]. Экономия достигается за счет снижения затрат на оплату труда, логистику и оборудование для высотных работ, а также сокращения времени простоя СЭС. Первоначальные инвестиции в парк БПЛА и ПО окупаются после выполнения примерно 10 проектов (несколько месяцев). Объем рынка услуг по инспекции с помощью БПЛА в энергетическом секторе в 2023 году оценивался в \$4,66 млрд, с прогнозируемым среднегодовым темпом роста (CAGR) более 15% до 2032 года.

БПЛА представляют собой полноценную диагностическую систему, оснащенную специализированными датчиками. Основные методы диагностики:

- Визуальная съемка (RGB): Обнаружение внешних дефектов (трещины, загрязнения, механические повреждения).
- Тепловизионная инспекция (IR): Выявление внутренних дефектов («горячие точки», короткие замыкания, деградация PID).

– Фотолюминесцентная (PL) и электролюминесцентная (EL) визуализация: Диагностика дефектов материала и обрывов проводки.

– Совместное использование этих методов позволяет получить максимально полную картину потерь производительности.

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение БПЛА для инспекции солнечных электростанций сталкивается с рядом технологических, эксплуатационных и регуляторных вызовов. Наиболее существенным ограничением является короткая продолжительность полета стандартных мультикоптеров, которая обычно составляет от 15 до 30 минут. Это требует частой смены аккумуляторов и может замедлять работу на очень больших площадях.

Второй важный технический вызов связан с грузоподъемностью. БПЛА должны нести на борту различные полезные нагрузки (сенсоры), которые имеют вес и габариты. Увеличение полезной нагрузки неизбежно приводит к сокращению времени полета и дальности действия. Это создает компромисс между качеством данных (необходимость использовать более совершенные и тяжелые сенсоры) и операционной эффективностью (время на выполнение миссии). Разработка более легких и эффективных сенсоров, а также улучшение аккумуляторных технологий являются ключевыми направлениями для будущего развития.

Третий, и, возможно, самый сложный вызов – это нормативно-правовая среда. В Европейском регионе действуют строгие правила эксплуатации гражданских БПЛА, регулируемые EASA (Европейское управление по авиационной безопасности) [5]. Эти правила варьируются от страны к стране и регулируют такие аспекты, как максимальная высота полета, расстояние от оператора, запретные зоны и требования к лицензированию пилотов-операторов. Нормативные препятствия остаются одним из основных сдерживающих факторов для массового внедрения дронов.

БПЛА уже сегодня являются не просто вспомогательным инструментом, а центральным элементом современной системы управления солнечными электростанциями. Их уникальное сочетание скорости, безопасности, точности и экономической эффективности позволяет перейти от реактивного ремонта к проактивному менеджменту. По мере решения существующих проблем с автономностью, нормативным регулированием и развитием интеллектуальных алгоритмов, роль БПЛА в обеспечении надежности и эффективности европейской энергосистемы будет только возрастать, превращаясь в обязательный компонент инфраструктуры «умной» энергетики.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (T25УЗБ-032).

ЛИТЕРАТУРА

1. Alrashidi, M., Rahman, S., & AlHajri, M. (2020). Drone-assisted photovoltaic systems inspection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, 109755. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109755.
2. Kishore, R.A., & Joseph, S. S. (2020). Drone based monitoring system for solar photovoltaic power plants. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1494-1499. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.107
3. Guerreiro, J., Rodrigues, F., & Pereira, F. (2021). Automated detection of defective photovoltaic modules using aerial thermography with unmanned aerial vehicles. *Solar Energy*, 224, 420-431. DOI: 10.1016/j.solener.2021.05.073.
4. Mittal, D., Hasan, M. I., & Hassan, S. Z. (2021). Economic analysis of drone-based inspection of solar photovoltaic plants: A case study. *Energy Reports*, 7, 8388-8397. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.10.070.
5. European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2020). Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulation (EU) 2019/947 and 2019/945). URL: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones-rpas>.

УДК 339.138

МАРКЕТИНГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ: ВОЗМОЖНОСТИ И ТЕНДЕНЦИИ

В.А. УСЕВИЧ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Спектр задач, которые сейчас решают с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), довольно широк: коммерческие, промышленные, военные.

Рынок коммерческих БПЛА был оценен в 82,00 млрд долларов США в 2024 году и, как ожидается, достигнет 7 646,37 млрд долларов США к 2034 году, демонстрируя среднегодовой темп роста 57,4% в период с 2025 по 2034 год. [1] По целевому назначению рынок коммерческих БПЛА сегментируется на следующие сферы: сельское хозяйство, энергетика и коммунальное хозяйство, доставка и логистика, строительство, СМИ и развлечения, государственный сектор и другие. Ожидается, что