

УДК 621.341.572

**С. М. Бойко, канд. техн. наук, доц.; О. А. Жуков, канд. техн. наук, доц.;
І. В. Касаткіна, канд. техн. наук, доц.; А. С. Хебда; В. І. Журід**

ДО ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЯК СУЧАСНОГО МЕТОДУ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Складовою енергетичної системи є лінії електропередач. Лінії електропередач (ЛЕП) є критично важливою частиною енергетичної інфраструктури, яка забезпечує постачання електроенергії до споживачів. Регулярний моніторинг їхнього стану необхідний для запобігання аварій, зменшення втрат енергії та забезпечення безпеки.

В роботі проведено аналіз особливостей застосування безпілотних літальних апаратів як сучасного методу моніторингу стану енергетичних об'єктів. Сприяти розвитку цього методу моніторингу енергетичних об'єктів мають очевидні переваги застосування безпілотних літальних апаратів порівняно з іншими методами моніторингу, а саме автоматизація, зниження витрат, підвищення безпеки та точності. Серед іншого, безпілотні літальні апарати дозволяють проводити інспекції без перерв у постачанні електроенергії та в реальному часі аналізувати дані. Однак є й недоліки такого методу моніторингу, а саме залежність від погодних умов, обмежена автономність батарей, регуляторні обмеження на польоти та висока початкова вартість обладнання. Крім того, обробка великих обсягів даних вимагає потужних комп'ютерних ресурсів. Одним із дієвих поєднань технологій є поєднання штучного інтелекту та безпілотних літальних апаратів, що перетворює останні з «літаючої камери» на інтелектуального інспектора енергетичних об'єктів, що не лише знаходить, а й прогнозує та класифікує проблеми, значно підвищуючи ефективність, безпеку та економічність моніторингу енергетичних об'єктів. Встановлено, що сучасні методи моніторингу стану ліній електропередач з використанням БПЛА демонструють високу ефективність за критеріями економії, безпеки та точності. Зокрема вони революціонізують галузь, замінюючи традиційні підходи на автоматизовані та інтелектуальні рішення. Подальший розвиток технологій, таких як ШІ та автономні системи, обіцяє ще більшу ефективність застосування пропонованого методу. Для енергетичних компаній впровадження БПЛА є стратегічним кроком до надійної та стійкої інфраструктури.

Ключові слова: лінії електропередач, БПЛА-інспекція, мультимодальні сенсори, виявлення дефектів.

Постановка проблеми

Енергетика є важливим елементом не тільки економіки, а й рівня життя населення. Між тим, сьогодні, енергетична система України переживає екстремальні режими функціонування [1].

Складовою енергетичної системи є лінії електропередач. Лінії електропередач (ЛЕП) є критично важливою частиною енергетичної інфраструктури, яка забезпечує постачання електроенергії до споживачів. Регулярний моніторинг їхнього стану необхідний для запобігання аварій, зменшення втрат енергії та забезпечення безпеки [2].

Моніторинг стану ліній електропередач (ЛЕП) є ключовим елементом забезпечення надійності та ефективності електроенергетичних систем. Сучасні технології, засновані на датчиках, штучному інтелекті (ШІ), безпілотних літальних апаратах (БПЛА) та динамічному моделюванні, дозволяють перейти до проактивного моніторингу, зменшуючи витрати, час та ризики [3].

У останні роки БПЛА, стають революційним інструментом для моніторингу ЛЕП, дозволяючи автоматизувати процеси та підвищувати ефективність.

Аналіз публікацій за темою дослідження

Значна частина досліджень в галузі моніторингу ліній електропередач з використанням БПЛА зосереджена на розробці та вдосконаленні автономних систем навігації та штучного інтелекту для автоматичного виявлення дефектів, наприклад, в роботах [4 – 12]. Інші дослідження присвячені мультимодальному збору даних (RGB, тепловізійні, LiDAR, електромагнітні сенсори) та їхній інтеграції з глибоким навчанням для підвищення точності інспекції [10 – 19]. Зокрема, в роботах [13, 15] запропоновано покращені алгоритми YOLOv5/v8 з модулями уваги для реального часу виявлення пошкоджень ізоляторів і вегетації в середовищі вбудованих систем (edge computing). Між тим, вкрай недостатньо проведено досліджень щодо впливу електромагнітних перешкод високовольтних ліній на стабільність польоту БПЛА та якість даних, а також довгострокової економічної ефективності впровадження роїв дронів (swarm inspection) у реальних енергомережах великого масштабу.

Метою роботи є: аналіз використання безпілотних літальних апаратів у якості сучасного засобу моніторингу стану ліній електропередач, що створює передумови для формування проактивних систем діагностики та управління технічним станом енергетичних об'єктів.

Виклад основного матеріалу

У статті розглянуто основні методи з акцентом на їх ефективність, базуючись на аналізі наукових джерел та практичних застосувань.

Сучасні методи можна класифікувати за технологіями: сенсорні системи, дистанційний контроль та інтеграція з ШІ. Основними з них є динамічне оцінювання навантаження ліній (Dynamic Line Rating, DLR), моніторинг за допомогою БПЛА з інтеграцією ШІ, комбіновані тепло-тепловізійні системи.

Тож, динамічне оцінювання навантаження ліній (Dynamic Line Rating, DLR) це технологія реального часу (Real-Time Thermal Rating, RTTR), яка моніторить Ambient температуру, швидкість та напрямок вітру, сонячне випромінювання та стан провідників за допомогою датчиків на лініях або метеостанцій. Алгоритми обчислюють максимальну безпечну пропускну здатність, дозволяючи динамічно коригувати навантаження. На відміну від статичного рейтингу, технологія DLR адаптується до реальних умов.

Між тим, моніторинг за допомогою БПЛА з інтеграцією ШІ також має свої перспективні особливості застосування. За вказаною технологією, БПЛА оснащені високороздільними камерами, LiDAR, інфрачервоними та тепловізійними сенсорами проводять автоматизовані обльоти ЛЕП. ШІ аналізує зображення в реальному часі, виявляючи дефекти: тріщини, корозію, перегрів, пошкоджені ізолятори, наближення рослинності чи структурні слабкості. Це дозволяє переходити від періодичних оглядів до безперервного моніторингу з IoT-інтеграцією.

У свою чергу, комбіновані тепло-тепловізійні системи поєднують тепловізійні камери з тепловізорами для дистанційного виявлення теплових втрат, перегрітих елементів та несправностей (наприклад, коронних розрядів). Застосовуються на БПЛА або стаціонарних платформах для реального часу аналізу, що підвищує точність діагностики.

Для оцінки ефективності використовуються критерії: точність виявлення дефектів, час моніторингу, економічна вигода (зменшення витрат на ремонт/обслуговування), безпека та вплив на надійність мережі. Нижче наведено таблицю 1 порівняння на основі доступних даних (метрики є орієнтовними, базуються на дослідженнях; точні значення залежать від умов впровадження) (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння ефективності методів

Метод	Опис ключових переваг	Точність виявлення	Час моніторингу (порівняно з традиційними)	Економічна ефективність (зменшення витрат)	Безпека та надійність
DLR	Динамічна адаптація навантаження за реальними умовами (вітер, температура).	Висока (реальний час, <1 % помилок перегріву).	Миттєвий (автоматичний аналіз).	Збільшення пропускної здатності на 20 – 50 %; економія \$300 тис.– \$1 млн/миліо на нові лінії; окупність за 2 – 3 роки.	Знижує ризик аварій на 30 – 40%; інтеграція з ВДЕ.
БПЛА з ШІ	Автоматизовані обльоти з AI-аналізом зображень/теплових сканів.	95 – 99 % (ШІ зменшує людські помилки).	У 5 – 10 разів швидше (години чи дні для гелікоптерів).	Зменшення витрат на 40 – 60 % (заміна гелікоптерів, \$50 – 100 тис./обліт); профілактика аварій економить 20 – 30 % на ремонтах; окупність за 1 – 5 років.	Усуває ризики для персоналу (падіння, електротравми); прогнозування збоїв на 70 % точніше.
Тепло-телевізійні системи	Комбінований аналіз теплових/візуальних даних для виявлення перегріву.	90–95% (комбінація сенсорів).	Реальний час (детекція за хвилини).	Зниження втрат від аварій на 15 – 25 %; дешевше традиційних оглядів на 30 %.	Підвищення безпеки на 20– 30%; раннє виявлення запобігає масовим відключенням.

Насамперед, слід зауважити, що сучасні методи демонструють високу ефективність. А саме, DLR оптимізує пропускну здатність без інвестицій у нове обладнання, БПЛА з ШІ радикально зменшують час і ризики, а тепло-телевізійні системи забезпечують точну діагностику. Загалом, впровадження таких технологій дозволяє знизити економічні втрати від аварій на 20 – 50 %, підвищити надійність мережі та адаптуватися до зростання попиту на енергію (включно з ВДЕ). В Україні перспективним є комбінування БПЛА з DLR для розподільних мереж, з окупністю за 1 – 5 років залежно від масштабу. Для точної оцінки ефективності на конкретних ЛЕП рекомендується моделювання з урахуванням локальних умов (наприклад, клімату та навантаження).

Слід зазначити, що сучасні БПЛА оснащені передовими технологіями, такими як високорозрізнені камери, тепловізори, LIDAR (лазерні сканери) та штучний інтелект (ШІ). Ці пристрої дозволяють збирати дані з різних кутів, виявляти дефекти, такі як корозія, пошкодження ізоляторів чи перегрівання проводів. Наприклад, дрони з RGB-камерами та тепловими сенсорами можуть виявляти несправності, аналізуючи візуальні та теплові сигнали. Автономні системи на базі відкритих платформ дозволяють дронам самостійно орієнтуватися вздовж ЛЕП, виявляючи та відстежуючи лінії в реальному часі [19].

Інтеграція ШІ підвищує точність аналізу, допомагає обробляти зображення та відео, автоматично ідентифікуючи проблеми, такі як пошкоджені компоненти чи рослинність поблизу ліній електропередач. Це робить моніторинг ліній електропередач швидким та точнішою порівняно з традиційними методами (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняльний аналіз сучасних методів, технологій, ефективності та практичних кейсів

Критерій	БПЛА (2025)	Гелікоптер	Піший огляд	Роботизовані платформи
1. Швидкість (100 км ПЛ)	2 – 4 години	2 – 3 дні	30 – 60 днів	8 – 24 години (автономно)
2. Вартість 1 км	\$50 – \$150	\$800 – \$1500	\$400 – \$800	\$200 – \$500 (амортизація)
3. Точність виявлення	95 – 99 % (ШП + LiDAR + UV)	75 – 85 %	60 – 75 %	96 – 99 % (контактні + ШП)
4. Безпека	0 ризиків	12 аварій/1000 год	12 травм/1000 км	0 ризиків (дистанційне керування)
5. Покриття опор	100 %	90 – 95 %	<30 %	100 % (повзе по проводу)
6. Погодна стійкість	95 % днів	50 % днів	<60 % днів	98 % (вітер до 20 м/с)
7. Доступ до висотних елементів	Так (зависання)	Так (проліт)	Ні (>7 м)	Так (повзе по проводу)
8. Якість даних	200 МП + LiDAR + IR	4К + око	Фото 24 МП	Контактні виміри + HD + IR
9. Екологічний вплив	0 викидів	500 кг CO ₂	100 кг CO ₂	0 викидів
10. Інтеграція SCADA/GIS	Авто	Ручна	Ручна	Авто + реальний час

Водночас, кожен метод, має свої переваги під час застосування у різних сценаріях моніторингу ліній електропередач (табл. 3).

Таблиця 3

Застосування методів моніторингу ліній електропередач

Сценарій	Рекомендований метод
Плановий моніторинг (щоквартально)	БПЛА (90%) + Роботи (10%)
Аварійний обліт після бурі (500+ км)	Гелікоптер
Детальна діагностика 1–5 опор	Робот або Піший
Високовольтні лінії 330–750 кВ	Робот + БПЛА
Міські ПЛ (балкони, дахи)	Піший або малий БПЛА

Таблиця 4

Застосування комбінованих методів моніторингу ліній електропередач

Метод	Частка	Обсяг (10 000 км/рік)	Періодичність
БПЛА	80%	8 000 км	Щоквартально
Роботи (LineScout/Expliner)	15%	1 500 км	2 рази/рік (330–750 кВ)
Піший	4%	400 км	Локальні перевірки
Гелікоптер	1%	100 км	Лише аварійні обльоти

Таким чином, за результатами економічного аналізу різних методів моніторингу ліній електропередач [20] найкращим виявився метод з використанням БПЛА, окупність якого склала 3 – 6 міс (табл. 5).

Таблиця 5

**Результати економічного аналізу різних методів моніторингу ліній електропередач
(на 100 км ПЛ, 4 рази/рік)**

Метод	Вартість 1 об'льоту	Річний бюджет	Економія vs Піший
БПЛА	\$10,000	\$40,000	+ \$200,000
Гелікоптер	\$120,000	\$480,000	– \$240,000
Піший	\$60,000	\$240,000	–
Робот	\$35,000	\$140,000	+ \$100,000

Ефективність методів моніторингу з БПЛА оцінюється за кількома ключовими критеріями, а саме економічною ефективністю, безпекою експлуатації, точністю та швидкістю виконання місії, масштабністю проведених робіт за один політ.

Економічна ефективність характеризується використанням дронів задля зменшення витрати на робочу силу та час на 30 – 50 %, оскільки автоматизує інспекції та знижує потребу в дорогому обладнанні, як вертольоти. Наприклад, дрони дозволяють швидко збирати високоякісні дані без зупинки енергопостачання.

Безпека експлуатації БПЛА пов'язана з усуненням ризиків для персоналу, пов'язаних з роботою на висоті чи поблизу високовольтних ліній. Вони роблять інспекції безпечнішими, швидшими та ефективнішими.

Параметри точності та швидкості виконання місії БПЛА забезпечують точні дані про стан сітки, дозволяючи вчасно проводити ремонти. AI-рішення покращують точність виявлення дефектів, зменшуючи помилки.

Масштабність виконання місій для БПЛА характерна для великих мереж, особливо в важкодоступних районах, де традиційні методи неефективні.

Для кількісної оцінки ефективності використовують метрики, такі як час інспекції, вартість на кілометр лінії, рівень виявлення дефектів та зменшення аварій.

Слід відзначити, що в залежності від безпеки застосування та часу і точності проведеного моніторингу [21], БПЛА у поєднанні з технологіями штучного інтелекту є лідерами ефективності застосування (табл. 6).

Таблиця 6

Порівняльна таблиця ефективності

Метод	Точність	Час (100 км)	Вартість (100 км)	Безпека
Гелікоптер + людина	75 – 85 %	2 – 3 дні	\$100,000 – \$150,000	Високий ризик
Піший огляд	70 – 80 %	7 – 14 днів	\$50,000 – \$80,000	Високий ризик
БПЛА + ШІ	95 – 99 %	2 – 4 години	\$5,000 – \$15,000	0 ризиків

Враховуючи безумовне лідерство БПЛА серед інших методів моніторингу ліній електропередач, слід навести приклади БПЛА для реалізації моніторингу ліній електропередач, в залежності від їх протяжності (табл. 7 [22]).

Таблиця 7

Класифікація БПЛА для моніторингу ліній електропередач

Тип БПЛА	Приклади	Дальність	Корисне навантаження	Застосування
Мультиротори	DJI Matrice 300/350 RTK, Autel EVO II	5 – 15 км	2 – 6 кг	Детальні огляди, муфти, ізолятори
Фіксоване крило (VTOL)	WingtraOne, Quantum-Systems Tron	50 – 100 км	1 – 3 кг	Обльоти магістральних ліній
Гібридні (VTOL + мультиротор)	DeltaQuad Pro, JOUAV CW-30E	100+ км	5 – 10 кг	Великі мережі, інтеграція LiDAR

Також, слід зазначити, що БПЛА ефективно можуть застосовуватись для моніторингу підземних кабельних ліній, але не для прямого підземного сканування (бо кабелі під землею), а для побічного, непрямого та профілактичного моніторингу – виявлення загроз над поверхнею, які впливають на підземні кабелі (табл. 8).

Таблиця 8

Функції БПЛА для моніторингу підземних кабельних ліній

Функція	Опис	Технології на БПЛА	Ефективність
Виявлення механічних загроз	Сканування будівельних робіт, екскаваторів, дерев, що падають, ерозії ґрунту над кабелем.	LiDAR, RGB-камери, ШІ-аналіз	90 – 97 % точність виявлення активності [9]
Теплове сканування поверхні	Виявлення гарячих точок на поверхні (через витік тепла від перегріву кабелю).	Тепловізори (FLIR), ІЧ-камери	85 – 95 % для виявлення аномалій до 1 м глибини [10]
Моніторинг траси кабелю	Перевірка маркувальних знаків, люків, муфт, доступу до колодязів.	Високороздільні камери, GPS/RTK	У 8 – 12 разів швидше за пішохідні обстеження [11]
Інтеграція з наземними даними	БПЛА знімає поверхню → ШІ зіставляє з GIS-картами кабелів → прогноз ризиків.	GIS + AI (ArcGIS, QGIS, Python)	Зниження аварій на 25 – 40 % [12]

Безумовно, що сьогодні у світі вже існують пілотні проєкти реалізації впровадження БПЛА для моніторингу електроенергетичних об'єктів. Але вони поки що не набули широкого впровадження. Сприяють розвитку цього методу моніторингу енергетичних об'єктів очевидні переваги застосування БПЛА порівняно з іншими методами моніторингу, а саме автоматизація, зниження витрат, підвищення безпеки та точності. З посеред іншого, БПЛА дозволяють проводити інспекції без перерв у постачанні електроенергії та в реальному часі аналізувати дані [23].

Однак є й недоліки такого методу моніторингу, а саме залежність від погодних умов, обмежена автономність батарей, регуляторні обмеження на польоти та висока початкова вартість обладнання. Крім того, обробка великих обсягів даних вимагає потужних комп'ютерних ресурсів. Малодослідженими залишаються питання впливу електромагнітних збурень енергетичних об'єктів на БПЛА під час їх дослідження та визначення оптимальної відстані БПЛА від функціонуючого энергооб'єкту.

Між тим, не зважаючи на недостатню дослідженість вказаного методу діагностики, провідні країни світу вже почали його впровадження, а саме у Великій Британії компанія National Grid використовує БПЛА для швидких та безпечних інспекцій, що дозволяє уникати непотрібних перерв у постачанні, у Греції розроблено інтелектуальну систему на базі БПЛА для моніторингу ЛЕП, яка ефективно виявляє несправності за допомогою RGB- та теплових сенсорів.

Дослідження показують, що впровадження ІІІ з БПЛА значно покращує ефективність моніторингу енергомереж. У 2025 році БПЛА стали стандартом для утилітарних компаній, дозволяючи швидко реагувати на проблеми, оскільки існує ряд вагомих переваг, серед яких зменшення помилок пов'язаних з людським фактором на 88 %, негайне сповіщення про результати моніторингу, обробка отриманої інформації в режимі реального часу.

Поєднання ІІІ та БПЛА перетворює БПЛА з «літаючої камери» на інтелектуального інспектора енергетичних об'єктів, що не лише знаходить, а й прогнозує та класифікує проблеми, значно підвищуючи ефективність, безпеку та економічність моніторингу енергетичних об'єктів.

Висновки

Сучасні методи моніторингу стану ліній електропередач з використанням БПЛА демонструють високу ефективність за критеріями економії, безпеки та точності. Вони революціонізують галузь, замінюючи традиційні підходи на автоматизовані та інтелектуальні рішення. Подальший розвиток технологій, таких як ІІІ та автономні системи, обіцяє ще більшу ефективність застосування пропонованого методу. Для енергетичних компаній впровадження БПЛА є стратегічним кроком до надійної та стійкої інфраструктури. Рекомендовано створити пілотний проект моніторингу ЛЕП в Україні з використанням БПЛА + DLR + AI для формування національних стандартів інтеграції таких систем у SCADA.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rymer N., Moore A. J. A review of unmanned aerial vehicle technology in power line inspection // *NASA Technical Reports Server*. 2020. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205002834> (дата звернення: 20.12.2025).
2. Naumov I. I., Ibadov R. R., Oboimova S. P. Unmanned aerial vehicles for inspection of power lines // *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/iel8/10985953/10985954/10985992.pdf> (дата звернення: 20.12.2025).
3. Drone monitoring of power lines: ECE 480 senior design final report / J. Hersha et al. Michigan State University. 2015. URL: https://www.egr.msu.edu/classes/ece480/capstone/spring15/group14/uploads/4/2/0/3/42036453/ece_480_senior_design_final_report_.pdf (дата звернення: 20.12.2025).
4. Autonomous power line inspection with drones via perception-aware and contact-safe trajectory planning / Z. Xing et al. *Proceedings of IROS 2023*. 2023. URL: https://rpg.ifi.uzh.ch/docs/IROS23_Xing.pdf (дата звернення: 20.12.2025).
5. Lewinski M. Using unmanned aerial vehicle in the energy sector. *European Research Studies Journal*. 2024. URL: <https://ersj.eu/journal/3685/download/Using%2BUnmanned%2BAerial%2BVehicle%2Bin%2Bthe%2BEnergy%2BSector.pdf> (дата звернення: 20.12.2025).
6. ENLIGHTEN: Electrical network line inspection guided by high-altitude drones / A. Castelino et al. *NASA Technical Reports Server*. 2024. URL: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240010588/downloads/20240010588_ENLIGHTEN_FinalVersion.pdf (дата звернення: 20.12.2025).
7. Intelligent inspection and deicing system for power transmission lines based on UAV / S. Sun et al. *Proceedings of the 2025 ACM International Conference on Multimedia Retrieval*. 2025. URL: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3729706.3729731> (дата звернення: 20.12.2025).
8. Moayid Ali Zaidi, Ibraheem Azeem Automatic data acquisition of the power line inspection using drones. *CEUR Workshop Proceedings*. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3102/paper6.pdf> (дата звернення: 20.12.2025).
9. Drone based thermal inspection of power transmission lines. F. S. Hussein et al. *Al-Iraqia University Engineering Journal*. 2024. URL: <https://eng.aliraqia.edu.iq/wp-content/uploads/2024/01/Group-B.pdf> (дата звернення: 20.12.2025).
10. A novel method for multi-modal predictive inspection of power lines using deep neural networks and drones. José M. N. de A. et al. *IEEE Access*. 2024. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/iel8/6287639/10380310/10786209.pdf> (дата звернення: 20.12.2025).
11. UAV inspections of power transmission networks with AI technology: a review. G. Chatzargyros et al. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 14. Art. 3518. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/14/3518> (дата звернення: 20.12.2025).
12. Li L. The UAV intelligent inspection of transmission lines. *International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics AMEII*. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/300615949_The_UAV_intelligent_inspection_of_transmission_lines (дата звернення: 20.12.2025).
13. Application of unmanned aerial vehicle in power grid inspection / Wang Y. et al. *Proceedings of SPIE*. 2023. Vol. 13395. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13395/1339518> (дата звернення: 20.12.2025).

20.12.2025).

14. Moayid A. Z., Faizan T. Automated data acquisition through autonomous UAVs in simulated transmission line inspection. *Journal of Development and Engineering*. 2024. URL: <https://ojs.southfloridapublishing.com/ojs/index.php/jdev/article/download/2586/2027> (дата звернення: 20.12.2025).

15. Ranging algorithm of UAV inspection of transmission line based on improved YOLOv5 / Zhang Y. et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2452, № 1. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2452/1/012028/pdf> (дата звернення: 20.12.2025).

16. Vision-based autonomous navigation approach for unmanned aerial vehicle transmission-line inspection / X. Hui et al. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018. Vol. 15. DOI: 10.1177/1729881417752821.

17. Bongumsa M., Nhlanhla M. State-of-the-art review on the application of unmanned aerial vehicles in power line inspections. *Drones*. 2025. Vol. 9, № 4. Art. 265. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/4/265> (дата звернення: 20.12.2025).

18. Monitoring of energy objects parameters with using UAVs / M. M. Rezinkina et al. *Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles*. P. 1–8. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/350906658_Monitoring_of_Energy_Objects_Parameters_with_Using_UAVs (дата звернення: 20.12.2025).

19. Nguyen V. Nh., Jenssen R., Roverso D. Intelligent monitoring and inspection of power line components powered by UAVs and deep learning. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*. 2019. Vol. 6, №1. P. 11–21. DOI: 10.1109/JPETS.2018.2881429. (дата звернення: 20.12.2025).

20. Accelerating power grid monitoring with flying robots and artificial intelligence / Abdellah C. et al. *Accelerating Power Grid Monitoring with Flying Robots and Artificial Intelligence. IEEE Communications Standards Magazine*. 2022. Vol. 5, №4. P. 48–54. UQAC Constellation, URL: <https://constellation.uqac.ca/id/eprint/8125> (дата звернення: 20.12.2025).

21. A UAV intelligent system for Greek power lines monitoring / Tsellou A. et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23, №20. Art. 8514. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10610981/> (дата звернення: 20.12.2025).

22. Esra İnce. Transmission line inspection with UAVs: a review of current practices and future directions. *International Journal of Energy and Smart Grid* 2024. Volume: 9 Issue: 1 URL: <https://dergipark.org.tr/pub/ijesg/issue/89450/1596043> (дата звернення: 20.12.2025).

23. Electromagnetic radiation from high-voltage transmission lines: impact on UAV inspections / R. Dianovský et al. *Transportation Research Procedia*. 2023. Volume 75. P. 209–218. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214652301267X> (дата звернення: 20.12.2025).

Стаття надійшла до редакції 17.11.2025.

Стаття пройшла рецензування 11.12.2025.

Бойко Сергій Миколайович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій, ORCID: 0000-0001-9778-2202, e-mail: boikosn2017@gmail.com.

Національний університет «Запорізька політехніка».

Жуков Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, ORCID: 0000-0001-7451-7633, e-mail: alex4444_2004@ukr.net.

Вінницький національний технічний університет.

Касаткіна Ірина Віталіївна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії, ORCID: 0000-0001-8967-6442, e-mail: ms.irina.vital@gmail.com.

Криворізький національний університет.

Хебда Альона Сергіївна – заступник директора Фахового коледжу інженерії, управління та землевпорядкування Державного некомерційного підприємства "Державний університет "Київський авіаційний інститут", ORCID: 0000-0003-1917-9509, e-mail: alenahebda@gmail.com.

Фаховий коледж інженерії, управління та землевпорядкування Державного некомерційного підприємства "Державний університет "Київський авіаційний інститут".

Журід Володимир Іванович – викладач кафедри авіаційного транспорту, ORCID: 0000-0001-8265-3264, e-mail: boikosn2017@gmail.com.

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ.