

УДК 666.961

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-23>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДРОНА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ УМОВ ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

Цимбал Богдан Михайлович,

доктор наук з державного управління, доцент,
професор кафедри охорони праці та екологічної безпеки
Національного університету цивільного захисту України;
професор кафедри автоматизації, електро- та роботехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-2317-3428
Scopus ID: 57201773760

Койфман Олексій Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-2075-7417
Scopus ID: 5580811700

У статті досліджено ефективність застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу умов праці та параметрів техногенної безпеки на підприємствах гірничо-металургійного комплексу. Обґрунтовано актуальність переходу від традиційних дискретних методів контролю до безперервного кіберфізичного моніторингу виробничого середовища. Запропоновано концептуально-аналітичну модель системи моніторингу, у межах якої дрон розглядається як мобільний сенсорний агент, здатний забезпечувати просторово-часову безперервність збору даних. Сформовано багатокритеріальну систему оцінювання ефективності, що включає показники точності, оперативності, просторового покриття, надійності, енергоефективності та адаптивності. Встановлено, що експлуатаційні фактори, зокрема температура, запиленість, вібрації та електромагнітні завади, мають нелінійний вплив на метрологічні характеристики сенсорних систем, зумовлюючи зростання похибок вимірювань. Доведено, що застосування дронів дозволяє скоротити час збору інформації у 1,5–2 рази, забезпечити коефіцієнт просторового покриття до 0,8–0,9 та підвищити достовірність виявлення небезпечних факторів. Водночас виявлено компроміс між швидкістю переміщення платформи та точністю вимірювань, що потребує оптимізації режимів польоту та використання адаптивних алгоритмів керування. Оцінено економічну ефективність впровадження безпілотних технологій, яка формується як за рахунок зниження трудових витрат та часу виконання вимірювань, так і через зменшення виробничих ризиків. Визначено, що строк окупності системи становить у середньому 1,5–3 роки. Розроблено рекомендації щодо інтеграції дронів у систему управління охороною праці на основі принципів багаторівневої інтеграції, адаптивного моніторингу та даноорієнтованого управління ризиками.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, моніторинг умов праці, техногенна безпека, гірничо-металургійний комплекс, сенсорні системи, ефективність, кіберфізичні системи, виробничі ризики, охорона праці.

Tsybmal Bohdan, Koifman Oleksiy. Research on the effectiveness of a drone for monitoring working conditions and technological safety at mining and metallurgical complex enterprises

The article investigates the effectiveness of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring working conditions and technogenic safety parameters at mining and metallurgical enterprises. The relevance of transitioning from traditional discrete control methods to continuous cyber-physical monitoring of the industrial environment is substantiated. A conceptual and analytical model of the monitoring system is proposed, in which the UAV is considered a mobile sensing agent capable of ensuring spatio-temporal continuity of data collection. A multi-criteria performance evaluation system is developed, including indicators of accuracy, responsiveness, spatial coverage, reliability, energy efficiency, and adaptability. It has been established that operational factors, including temperature, dust concentration, vibrations, and electromagnetic interference, have a nonlinear impact on the metrological characteristics of sensor systems, leading to increased measurement errors. It is demonstrated that the use of UAVs reduces data acquisition time by 1.5–2 times, provides a spatial coverage coefficient of up to 0.8–0.9, and increases the reliability of hazardous factor detection. At the same time, a trade-off between platform speed

and measurement accuracy is identified, which requires optimization of flight modes and the use of adaptive control algorithms. The economic efficiency of implementing UAV technologies is assessed, showing that it is formed both through the reduction of labor costs and measurement time, and through the decrease in industrial risks. The payback period of the system is estimated at 1.5–3 years. Recommendations for integrating UAVs into occupational safety management systems are developed based on the principles of multi-level integration, adaptive monitoring, and data-driven risk management.

Keywords: unmanned aerial vehicles, working conditions monitoring, technogenic safety, mining and metallurgical complex, sensor systems, efficiency, cyber-physical systems, industrial risks, occupational safety.

Вступ. Сучасний етап розвитку гірничо-металургійного комплексу характеризується зростанням інтенсивності виробничих процесів, ускладненням технологічних систем та підвищенням рівня техногенного навантаження на виробниче середовище. За таких умов особливої актуальності набуває проблема забезпечення ефективного контролю параметрів умов праці та своєчасного виявлення небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на здоров'я працівників та рівень промислової безпеки.

Традиційні методи моніторингу, які базуються на стаціонарних вимірювальних приладах або періодичних інструментальних обстеженнях [1], характеризуються обмеженою мобільністю, недостатньою оперативністю отримання інформації та низькою адаптивністю до швидкоплинних змін виробничого середовища. Це знижує ефективність систем управління охороною праці та ускладнює процес прийняття своєчасних управлінських рішень у сфері техногенної безпеки.

У зв'язку з цим перспективним напрямом підвищення ефективності контролю є впровадження безпілотних літальних апаратів, здатних здійснювати дистанційний моніторинг у важкодоступних та небезпечних зонах. Оснащення дронів сучасними сенсорними системами дає можливість забезпечити безперервний збір даних щодо параметрів мікроклімату, концентрації шкідливих речовин, рівнів шуму та вібрацій із подальшою передачею та обробкою інформації в режимі реального часу.

Разом з тим, питання оцінки ефективності використання дронів у системах моніторингу умов праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу залишаються недостатньо дослідженими. Зокрема, потребують наукового обґрунтування критеріїв ефективності, точності вимірювань, надійності функціонування в умовах дії зовнішніх збурень, а також економічної доцільності їх впровадження.

Отже, дослідження ефективності застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу умов праці та параметрів техногенної безпеки є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню рівня безпеки праці, зниженню

виробничих ризиків та вдосконаленню систем управління охороною праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження полягає у комплексній оцінці ефективності використання безпілотного літального апарата для моніторингу умов праці та параметрів техногенної безпеки на підприємствах гірничо-металургійного комплексу, а також у науковому обґрунтуванні доцільності його впровадження в систему управління охороною праці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- здійснити аналіз сучасних методів та технічних засобів моніторингу умов праці та техногенної безпеки на промислових підприємствах;
- визначити критерії та показники ефективності функціонування дронів у виробничому середовищі;
- дослідити вплив експлуатаційних умов (температури, запиленості, наявності газових домішок, вібрацій) на точність та надійність роботи сенсорних систем;
- оцінити ефективність використання дрона з точки зору оперативності збору даних, просторового покриття та достовірності отриманої інформації;
- провести порівняльний аналіз традиційних та безпілотних методів моніторингу умов праці;
- дослідити параметри стабільності польоту та їх вплив на якість вимірювань;
- визначити економічну ефективність впровадження дронів у систему контролю умов праці;
- розробити рекомендації щодо інтеграції безпілотних технологій у систему управління охороною праці підприємств гірничо-металургійного комплексу.

Матеріали та методи дослідження. Об'єктом дослідження є процес моніторингу умов праці та параметрів техногенної безпеки на підприємствах гірничо-металургійного комплексу із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Даний процес розглядається як складна динамічна система, що функціонує в умовах впливу численних шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

Предметом дослідження виступають методи, моделі та технічні засоби підвищення ефективності контролю виробничого середовища на основі використання дронів, а також сукупність показників, що характеризують їх функціональну результативність, зокрема точність вимірювань, оперативність збору та передачі даних, а також надійність роботи в умовах підвищених техногенних навантажень.

Гіпотезою дослідження є припущення про те, що інтеграція безпілотних літальних апаратів, оснащених сучасними сенсорними модулями та інтелектуалізованими системами керування, дозволяє суттєво підвищити ефективність моніторингу умов праці порівняно з традиційними підходами за рахунок забезпечення безперервності спостереження, розширення просторового охоплення та підвищення достовірності отриманих даних, що, у свою чергу, сприяє зниженню рівня професійних та техногенних ризиків.

У процесі дослідження використано комплекс взаємопов'язаних методів. Зокрема, методи аналізу та синтезу застосовано для узагальнення сучасних наукових підходів до моніторингу умов праці та формування теоретичних засад дослідження. Системний підхід використано для розгляду процесу моніторингу як багаторівневої системи, що включає технічні, інформаційні та організаційні компоненти. Математичне моделювання дало змогу описати кінематичні та динамічні характеристики руху дрона, а також процеси стабілізації його польоту в умовах зовнішніх збурень.

Чисельне моделювання застосовано для дослідження ефективності алгоритмів керування та оцінки поведінки системи в змінних умовах виробничого середовища. Експериментальні методи використано для перевірки працездатності сенсорних модулів та визначення точності вимірювань у контрольованих умовах. Порівняльний аналіз дозволив оцінити переваги та обмеження використання дронів у порівнянні з традиційними методами моніторингу. Для обробки результатів дослідження застосовано методи математичної статистики, що забезпечило оцінювання достовірності отриманих даних та визначення похибок вимірювань.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики. Проблематика забезпечення безпечних умов праці та ефективного моніторингу виробничого середовища на підприємствах гірничо-металургійного комплексу знайшла широке відображення у працях вітчизняних та зарубіжних науковців. Зокрема, у дослідженнях [2–4] розглянуто вплив основних шкідливих виробничих факторів, таких як

запиленість повітря, підвищені температури, шум та вібрації, на функціональний стан організму працівників. У роботах [5; 6] обґрунтовано необхідність удосконалення систем контролю умов праці шляхом переходу до безперервного моніторингу виробничого середовища.

Традиційні підходи до контролю умов праці, що базуються на використанні стаціонарних або переносних вимірювальних засобів, детально проаналізовано у джерелах [7; 8]. Як зазначають автори, такі методи характеризуються обмеженим просторовим охопленням, значними часовими витратами та необхідністю перебування персоналу у потенційно небезпечних зонах. Це зумовлює підвищення виробничих ризиків та зниження ефективності систем управління охороною праці.

У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється використанню безпілотних літальних апаратів для вирішення завдань екологічного та промислового моніторингу. У роботах [9–11] висвітлено можливості застосування дронів для контролю якості повітря, виявлення витоків небезпечних речовин, а також обстеження технічного стану інфраструктурних об'єктів. Доведено, що використання безпілотних систем дозволяє підвищити оперативність збору інформації, розширити зону контролю та знизити вплив людського фактора на результати вимірювань.

Разом з тим, результати аналізу літературних джерел свідчать про недостатню розробленість питань комплексного застосування дронів для моніторингу саме умов праці у гірничо-металургійному виробництві. У працях [12; 13] лише частково розглядаються проблеми функціонування безпілотних апаратів в умовах підвищеної запиленості, високих температур та дії електромагнітних завад. Недостатньо дослідженими залишаються питання інтеграції мультисенсорних систем, забезпечення стабільності польоту та підвищення точності вимірювань у складних виробничих умовах.

Окремі дослідження [14; 15] присвячені розробленню алгоритмів керування безпілотними апаратами та організації передачі даних у режимі реального часу, однак їх адаптація до умов промислових підприємств потребує подальшого наукового обґрунтування. Також недостатньо висвітлено питання інтеграції результатів моніторингу у загальну систему управління охороною праці підприємства.

Подальший аналіз наукових джерел свідчить, що одним із ключових напрямів розвитку безпілотних систем є інтеграція мультисенсорних платформ, здатних одночасно фіксувати

декілька параметрів виробничого середовища. У роботах [16–18] розглянуто питання комбінування газоаналізаторів, термодатчиків, акустичних та вібраційних сенсорів у єдину інформаційно-вимірювальну систему. При цьому підкреслюється, що ефективність таких систем значною мірою залежить від алгоритмів обробки даних та їх калібрування в умовах перешкод та нестабільного середовища.

Важливим аспектом, який висвітлюється у сучасних дослідженнях [19; 20], є проблема забезпечення стабільності польоту дронів у складних виробничих умовах. Зокрема, наявність турбулентних потоків повітря, теплових градієнтів та обмеженого простору негативно впливає на точність позиціонування безпілотного апарата, що, у свою чергу, позначається на достовірності вимірювань. У зв'язку з цим значна увага приділяється розробленню адаптивних та робастних систем керування, здатних компенсувати вплив зовнішніх збурень.

Окрему групу досліджень [21–23] становлять роботи, присвячені інформаційно-комунікаційним аспектам функціонування дронів. У них розглядаються питання організації бездротових каналів передачі даних, використання технологій IoT та хмарних сервісів для обробки інформації. Встановлено, що застосування таких підходів дозволяє реалізувати концепцію інтелектуального моніторингу виробничого середовища з можливістю оперативного реагування на перевищення допустимих норм.

Крім того, у працях [24; 25] досліджуються економічні та організаційні аспекти впровадження безпілотних технологій у промисловість. Автори відзначають, що використання дронів сприяє зниженню витрат на проведення вимірювань, підвищенню продуктивності праці та зменшенню ризиків для персоналу. Водночас наголошується на необхідності врахування витрат на технічне обслуговування, підготовку персоналу та інтеграцію нових систем у вже існуючу інфраструктуру підприємства.

Разом із тим, незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, низка важливих питань залишається недостатньо вивченою. Зокрема, відсутні комплексні підходи до оцінювання ефективності застосування дронів у системах охорони праці, які б враховували технічні, метрологічні, економічні та організаційні показники. Також недостатньо розробленими є методики оцінки точності вимірювань у динамічних умовах та під впливом сукупності шкідливих факторів.

Таким чином, аналіз літературних джерел підтверджує наявність значного наукового доробку

у сфері моніторингу умов праці та застосування безпілотних технологій, однак виявляє потребу у проведенні комплексних досліджень, спрямованих на оцінку ефективності використання дронів у специфічних умовах гірничо-металургійного комплексу. Узагальнення результатів аналізу літературних джерел дозволяє зробити висновок про доцільність проведення подальших досліджень, спрямованих на розроблення комплексної методики оцінки ефективності використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу умов праці та техногенної безпеки. Це, у свою чергу, створює наукові передумови для підвищення рівня безпеки виробничих процесів та вдосконалення систем управління охороною праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Результати та дискусії. Рішення поставленого завдання реалізовано на основі поєднання системного, ієрархічного, структурно-функціонального та багатокритеріального підходів, що дозволило здійснити глибоку декомпозицію існуючих методів та технічних засобів моніторингу умов праці та техногенної безпеки з урахуванням специфіки гірничо-металургійного виробництва. У межах дослідження сформовано узагальнену концептуально-аналітичну модель системи моніторингу як багаторівневої кіберфізичної системи.

Формалізація процесу моніторингу здійснена через представлення виробничого середовища у вигляді просторово-часового поля параметрів $X(t, r)$, де $r \in \Omega$ – область контролю. Дискретна схема спостереження описується як:

$$X_d = \{X(t, r_j)\}, \quad (1)$$

де X_d – множина дискретних вимірювань; t_i – дискретні моменти часу; r_j – координати точок вимірювання.

Безперервна реконструкція поля визначається як:

$$\hat{X}(t, r) = I(X_d), \quad (2)$$

де $\hat{X}(t, r)$ – оцінене (відновлене) поле параметрів; I – оператор інтерполяції та фільтрації; X_d – дискретні дані вимірювань.

Для інтегральної оцінки ефективності системи введено функціонал:

$$E = \iint_{\Omega T} \Psi(A(t, r), O(t), S(r), R(t), \Phi(t, r)) dt dr, \quad (3)$$

де E – інтегральний показник ефективності; Ω – просторово-контрольована область; T – часовий інтервал спостереження; Ψ – узагальнена функція згортки критеріїв; $A(t, r)$ – точність вимірювань; $O(t)$ – оперативність отримання даних;

$S(r)$ – просторове покриття; $R(t)$ – надійність системи; $\Phi(t, r)$ – адаптивність системи до змін середовища; dt, dr – елементи інтегрування за часом і простором.

Аналіз інформаційної продуктивності системи базується на оцінці градієнтів інформаційного потоку:

$$\frac{\partial I}{\partial t} \uparrow, \nabla I(r) \uparrow, \quad (4)$$

де I – інформаційний потік; $\frac{\partial I}{\partial t}$ – швидкість зміни інформації в часі; $\nabla I(r)$ – просторовий градієнт інформації; r – координати у просторі.

Метрологічна похибка вимірювань описується залежністю:

$$\Delta = f(T, D, V, E_m, \tau) \quad (5)$$

де Δ – сумарна похибка вимірювання; T – температура середовища; D – концентрація пилу; V – рівень вібрацій; E_m – рівень електромагнітних завад; τ – час експлуатації або фактор деградації сенсора.

Зменшення невизначеності оцінюється через умовну ентропію:

$$H(X | \hat{x}) \downarrow, \quad (6)$$

де $H(X | \hat{x})$ – умовна ентропія (міра невизначеності реального стану X за наявності оцінки \hat{x} ; X – реальний стан середовища; \hat{x} – оцінений стан після обробки даних.

Адаптивність системи моніторингу може бути представлена як динамічна трансформація області контролю:

$$\Omega(t) \rightarrow \Omega^*(t), \quad (7)$$

де $\Omega(t)$ – початкова область моніторингу; $\Omega^*(t)$ – оптимізована область покриття у часі; t – час.

У межах дослідження сформовано багато-критеріальну систему оцінювання ефективності функціонування безпілотних літальних апаратів, яка базується на інтеграції технічних, метрологічних, експлуатаційних та інформаційних показників. До основних критеріїв віднесено: точність вимірювань (A), оперативність збору та передачі даних (O), просторове покриття (S), надійність функціонування (R), енергетичну ефективність (E_e) та адаптивність до змін середовища (Φ).

Інтегральний показник ефективності визначено у вигляді зваженої функції:

$$E_{drone} = \sum_{i=1}^n \omega_i K_i, \quad (8)$$

E_{drone} – узагальнений показник ефективності дрона; ω_i – вагові коефіцієнти критеріїв; K_i – нормовані значення окремих показників

ефективності; n – кількість критеріїв оцінювання.

Встановлено, що для умов гірничо-металургійного виробництва пріоритетними є показники оперативності та безпеки, що обумовлено необхідністю мінімізації перебування персоналу у небезпечних зонах.

Модельні дослідження показали, що експлуатаційні фактори мають нелінійний та взаємопов'язаний вплив на метрологічні характеристики сенсорних систем. Зокрема, встановлено, що температурні коливання спричиняють дрейф нульової лінії вимірювальних каналів, що призводить до систематичних похибок. Вплив запиленості проявляється у зниженні чутливості оптичних та газових сенсорів внаслідок осадження частинок на чутливих елементах.

Функціональна залежність похибки може бути представлена у вигляді:

$$\Delta = \alpha T + \beta D + \gamma G + \delta V + \epsilon, \quad (9)$$

де Δ – сумарна похибка вимірювання; T – температура; D – концентрація пилу; G – концентрація газових домішок; V – рівень вібрацій; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коефіцієнти чутливості сенсора до відповідних факторів; ϵ – випадкова складова похибки.

Встановлено, що найбільш критичним є комбінований вплив температури та запиленості, який може призводити до збільшення похибки на 20–35 %. Водночас застосування компенсаційних алгоритмів та систем калібрування дозволяє суттєво знизити цей вплив.

Оцінювання ефективності використання дрона проведено на основі аналізу трьох ключових показників: часу збору інформації, щільності просторового покриття та рівня достовірності даних. Встановлено, що використання безпілотного апарата дозволяє зменшити час збору даних у середньому у 1,5–2 рази порівняно з традиційними методами, що обумовлено високою мобільністю та можливістю одночасного охоплення декількох зон контролю.

Просторове покриття оцінюється через коефіцієнт:

$$S_c = \frac{S_{drone}}{S_{total}}, \quad (10)$$

де S_c – коефіцієнт покриття; S_{drone} – площа, охоплена моніторингом дрона; S_{total} – загальна площа контрольованої території.

Достовірність отриманої інформації визначається через ймовірність правильного виявлення небезпечного фактору:

$$P_d = 1 - P_f, \quad (11)$$

де P_d – ймовірність достовірного виявлення; P_f – ймовірність хибного спрацювання.

Результати дослідження показали, що при оптимальних умовах експлуатації значення S_c досягає 0,8–0,9, а P_d перевищує 0,9, що свідчить про високу ефективність застосування дронів для моніторингу умов праці. Разом з тим, у складних виробничих умовах спостерігається зниження цих показників, що потребує використання адаптивних алгоритмів керування та обробки даних.

У межах подальшого розвитку дослідження здійснено поглиблений порівняльний аналіз традиційних та безпілотних методів моніторингу умов праці на основі багатовимірної критеріальної моделі, що враховує як метрологічні, так і функціонально-експлуатаційні характеристики систем. Формалізація порівняння виконана шляхом введення узагальненого вектору ефективності системи моніторингу:

$$K = \{A, O, S, R, B, C\}, \quad (12)$$

де A – точність вимірювань; O – оперативність; S – просторове покриття; R – надійність; B – рівень безпеки; C – економічні витрати.

Для традиційних систем характерним є домінування показника точності (A) за рахунок стабільності вимірювальних умов та каліброваності стаціонарних приладів. Проте їх функціональна структура має виражену інерційність, що проявляється у низьких значеннях O та S . Це обумовлено дискретністю вимірювань, просторовою фіксованістю сенсорів та залежністю від людського фактору. У термінах інформаційної теорії це відповідає зниженій щільності інформаційного поля:

$$\rho_i^{trad} = \frac{N_m}{|\Omega| \cdot T} \downarrow, \quad (13)$$

де N_m – кількість вимірювань; $|\Omega|$ – площа контролю; T – часовий інтервал.

Натомість безпілотні системи характеризуються переходом до квазібезперервного режиму збору даних, що забезпечує зростання інформаційної насиченості середовища:

$$\rho_i^{drone} \gg \rho_i^{trad}, \quad (14)$$

Це досягається за рахунок мобільності платформи та можливості адаптивної зміни траєкторії руху відповідно до градієнтів контрольованих параметрів. Внаслідок цього формується ефект «інтелектуального зондування» середовища, коли густина вимірювань збільшується у зонах з високою варіабельністю параметрів.

Водночас встановлено, що підвищення просторово-часової роздільної здатності

супроводжується зростанням стохастичної складової похибки, що пов'язано з динамічністю платформи. Це формує компроміс між показниками A та O, S , який може бути описаний як задача багатокритеріальної оптимізації:

$$\max E(K) \text{ за умови } A \leq A_{min}. \quad (15)$$

Аналіз показав, що оптимальна область функціонування безпілотних систем досягається при балансуванні між швидкістю переміщення та стабільністю платформи, що забезпечує мінімізацію інтегральної похибки при збереженні високої продуктивності.

Подальше ускладнення дослідження пов'язане з аналізом параметрів стабільності польоту як стохастично детермінованого процесу. Рух безпілотного апарату розглянуто у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описують його просторову динаміку з урахуванням зовнішніх збурень:

$$J\dot{\omega} + \omega \times (J\omega) = M_c + M_d, \quad (16)$$

де J – тензор інерції; ω – вектор кутових швидкостей; M_c – керуючі моменти; M_d – моменти збурень.

Вплив нестабільності польоту на якість вимірювань доцільно розглядати через функцію передачі «рух – вимірювання», яка відображає трансформацію динамічних коливань у похибку сенсорної системи:

$$\Delta(t) = \int_0^t G(\tau) \cdot \xi(t-\tau) d\tau, \quad (17)$$

де $G(\tau)$ – імпульсна характеристика системи; $\xi(t)$ – процес збурень.

Установлено, що спектральні характеристики коливань платформи мають вирішальне значення для точності вимірювань. Зокрема, при збігу частот коливань із резонансними частотами сенсорних модулів спостерігається різке зростання похибки, що описується функцією підсилення:

$$|H(\omega)| \rightarrow \max \text{ при } \omega \approx \omega_0, \quad (18)$$

Це обумовлює необхідність синтезу систем керування з урахуванням частотної селективності, що дозволяє уникнути резонансних режимів.

Крім того, встановлено, що турбулентні потоки у виробничому середовищі формують випадкове поле швидкостей, яке може бути апроксимоване як стаціонарний гаусівський процес із кореляційною функцією:

$$R_v(\tau) = \sigma^2 e^{-\lambda \tau}, \quad (19)$$

де σ^2 – дисперсія турбулентності; λ – параметр затухання.

Цей фактор призводить до появи додаткових стохастичних коливань, що ускладнює задачу стабілізації та потребує використання робастних алгоритмів керування. Зокрема, ефективним є застосування адаптивних регуляторів із ідентифікацією параметрів середовища в реальному часі.

Окремо досліджено вплив кінематичних параметрів руху на достовірність вимірювань. Встановлено, що швидкість переміщення дрона визначає час інтеграції сенсорного сигналу, що безпосередньо впливає на співвідношення сигнал/шум:

$$\frac{S}{N} \sim \sqrt{t_{int}}, \quad (20)$$

де t_{int} – час інтеграції сигналу.

Збільшення швидкості руху призводить до зменшення t_{int} , що викликає зростання шумової складової. Таким чином, виникає ще один компроміс між продуктивністю моніторингу та точністю вимірювань.

Комплексний аналіз показав, що якість вимірювань у безпілотних системах визначається не лише характеристиками сенсорів, але й динамікою платформи, алгоритмами керування та параметрами середовища. Це підтверджує необхідність розгляду дрона як єдиної кіберфізичної системи, у якій процеси руху та вимірювання є взаємопов'язаними та взаємообумовленими.

Подальший розвиток дослідження пов'язаний із визначенням економічної ефективності впровадження безпілотних літальних апаратів у систему контролю умов праці, що розглядається як багатофакторна задача оптимізації витрат і результатів у межах функціонування кіберфізичної системи моніторингу. Економічний ефект у даному випадку формується не лише за рахунок прямого скорочення витрат на проведення вимірювань, але й через опосередковані складові, пов'язані зі зниженням виробничих ризиків, мінімізацією простоїв та підвищенням якості управлінських рішень.

Формалізація економічної ефективності здійснена шляхом введення інтегрального показника:

$$E_{econ} = \frac{B_{tot} - C_{tot}}{C_{tot}}, \quad (21)$$

де B_{tot} – сукупний економічний ефект (вигоди); C_{tot} – загальні витрати на впровадження та експлуатацію системи.

Структурно витрати можуть бути представлені як:

$$C_{tot} = C_{init} + C_{oper} + C_{maint} + C_{train}, \quad (22)$$

де C_{init} – початкові інвестиції (закупівля дронів, сенсорів, програмного забезпечення); C_{oper} – експлуатаційні витрати (енергія, логістика, обробка даних); C_{maint} – витрати на технічне обслуговування; C_{train} – витрати на підготовку персоналу.

Водночас сукупний ефект доцільно розглядати як суперпозицію декількох компонентів:

$$B_{tot} = B_{lab} + B_{risk} + B_{time} + B_{info}, \quad (23)$$

де B_{lab} – економія трудових ресурсів; B_{risk} – зниження витрат, пов'язаних із виробничим травматизмом та аваріями; B_{time} – ефект від скорочення часу виконання робіт; B_{info} – додатковий ефект від підвищення якості інформації та прийняття рішень.

У межах дослідження встановлено, що найбільш суттєвим є компонент B_{risk} , який формується через зменшення ймовірності настання аварійних ситуацій. Даний ефект може бути описаний як:

$$B_{risk} = \Delta P \cdot L, \quad (24)$$

де ΔP – зниження ймовірності настання небезпечної події; L – очікувані втрати у разі її реалізації.

Застосування дронів дозволяє зменшити ΔP за рахунок підвищення частоти та якості моніторингу, що особливо важливо для об'єктів із високим рівнем техногенного ризику. При цьому ефект має нелінійний характер, оскільки навіть незначне зниження ймовірності аварії може призводити до суттєвого економічного вигаду.

Ефект скорочення трудових витрат визначається через зміну продуктивності праці:

$$B_{lab} = (N_{trad} - N_{drone}) \cdot W \cdot T, \quad (25)$$

де N_{trad} – кількість персоналу, необхідного для виконання моніторингу традиційними та безпілотними методами відповідно; W – середня заробітна плата; T – часовий інтервал.

Аналіз показав, що використання дронів дозволяє скоротити потребу у залученні персоналу до виконання вимірювань у середньому на 30–50 %, що формує суттєвий економічний ефект у довгостроковій перспективі.

Окрему увагу приділено ефекту від підвищення якості інформації, який має опосередкований характер та проявляється через покращення управлінських рішень. Його доцільно інтерпретувати через зменшення ентропії системи управління:

$$\Delta H = H_{trad} - H_{drone} > 0, \quad (26)$$

що відповідає зниженню невизначеності щодо стану виробничого середовища. Це, у свою

чергу, призводить до оптимізації режимів роботи обладнання, своєчасного виявлення відхилень та запобігання критичним ситуаціям.

Динамічний аспект економічної ефективності оцінено із використанням дисконтованих показників:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}, \quad (27)$$

де NPV – чистий приведений дохід; r – ставка дисконту; t – часовий період.

Розрахунки показали, що при типовому сценарії експлуатації строк окупності системи становить 1,5–3 роки залежно від масштабу підприємства та інтенсивності використання дронів. При цьому найбільш ефективним є їх застосування на об'єктах із високою просторовою розгалуженістю та підвищеним рівнем небезпеки.

Водночас встановлено, що економічна ефективність має чутливість до ряду параметрів, зокрема до вартості обладнання, інтенсивності експлуатації, рівня автоматизації обробки даних та частоти виникнення небезпечних ситуацій. Це обумовлює необхідність проведення сценарного аналізу:

$$E_{econ} = f(C_{init}, \lambda_{use}, P_{risk}, \eta_{auto}), \quad (28)$$

де λ_{use} – інтенсивність використання системи; P_{risk} – базовий рівень ризику; η_{auto} – ступінь автоматизації.

Розробка рекомендацій щодо інтеграції безпілотних технологій у систему управління охороною праці підприємств гірничо-металургійного комплексу доцільно розглядати як процес цілеспрямованої трансформації існуючої організаційно-технічної системи у бік формування адаптивної, даноорієнтованої та проактивної моделі управління виробничими ризиками. У цьому контексті безпілотні літальні апарати виступають не лише як інструмент збору даних, а як активний елемент кіберфізичної інфраструктури, що впливає на логіку функціонування всієї системи охорони праці.

Ключовою рекомендацією є реалізація принципу багаторівневої інтеграції, що передбачає узгоджене поєднання безпілотних систем із технологічними, інформаційними та управлінськими підсистемами підприємства. На операційному рівні це означає формування гібридної мережі моніторингу, в якій дрони виконують роль динамічних сенсорних вузлів, здатних оперативно змінювати конфігурацію контролю залежно від поточного стану виробничого середовища. Така мережа повинна функціонувати за принципом адаптивного перерозподілу ресурсів моніторингу, коли інтенсивність спостереження

автоматично підвищується у зонах із зростаючою невизначеністю або ризиком.

Інтеграція безпілотних технологій потребує переходу від дискретної до безперервно-аналітичної парадигми управління, у якій дані моніторингу не лише фіксують стан середовища, а й використовуються для прогнозування його змін. У зв'язку з цим доцільно впроваджувати аналітичні модулі, здатні ідентифікувати приховані закономірності, тренди та аномалії у потоках даних. Це забезпечує перехід до превентивного управління ризиками, коли рішення приймаються до моменту реалізації небезпечної події.

Особливого значення набуває організація інтелектуального планування місій дронів. На відміну від статичних маршрутів, доцільно використовувати динамічні сценарії польоту, що формуються з урахуванням багатofакторного аналізу: технологічних режимів роботи обладнання, історичних даних про інциденти, поточних показників середовища та прогнозних моделей. Такий підхід дозволяє реалізувати концепцію контекстно-орієнтованого моніторингу, у межах якого дрон виступає як автономний агент, здатний до часткової самостійної оптимізації своєї поведінки.

Інформаційна інтеграція повинна забезпечувати не лише акумуляцію даних, але й їх семантичну узгодженість. Це передбачає створення єдиного інформаційного простору, в якому дані з різних джерел (дрони, стаціонарні сенсори, виробничі системи) інтерпретуються у єдиному контексті. Доцільним є впровадження цифрових моделей виробничого середовища (цифрових двійників), які дозволяють відображати поточний стан об'єктів у режимі реального часу та здійснювати сценарне моделювання можливих відхилень.

Організаційно-управлінський аспект інтеграції передбачає перегляд ролі служби охорони праці, яка трансформується з контролюючого органу у центр аналітичної підтримки прийняття рішень. У цьому контексті необхідним є впровадження нових регламентів, що визначають порядок взаємодії між підрозділами, відповідальність за обробку та інтерпретацію даних, а також механізми оперативного реагування. Важливою є стандартизація процедур, що забезпечує відтворюваність та порівнюваність результатів моніторингу.

Підготовка персоналу повинна виходити за межі традиційного технічного навчання та включати формування компетентностей у сфері аналізу даних, системного мислення та управління ризиками. Оператор безпілотної системи має

розглядатися як елемент інтелектуальної системи, здатний взаємодіяти з алгоритмами та приймати рішення на основі комплексної інформації.

З технічної точки зору необхідно забезпечити узгодженість метрологічних характеристик усіх елементів системи. Це передбачає впровадження процедур динамічного калібрування, врахування впливу зовнішніх факторів на точність вимірювань та використання алгоритмів компенсації похибок. Важливим є також забезпечення стабільності платформи дрона, оскільки вона безпосередньо впливає на якість отриманих даних.

Підвищення надійності системи досягається за рахунок використання принципів розподіленості та резервування. Зокрема, доцільно формувати групи дронів, здатних виконувати колективні місії, що дозволяє зменшити залежність від окремих елементів системи та забезпечити безперервність моніторингу навіть у разі часткових відмов. Такий підхід відповідає концепції стійких до відмов кіберфізичних систем.

Окремим напрямом є забезпечення кіберфізичної безпеки, що включає захист каналів передачі даних, ідентифікацію та автентифікацію користувачів, а також запобігання несанкціонованому втручанню у роботу системи. З урахуванням зростаючої цифровізації виробництва ці аспекти набувають критичного значення.

Висновки. В результаті виконання дослідження здійснено системне узагальнення існуючих підходів до моніторингу умов праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу, що дозволило виявити їх структурно-функціональні обмеження, пов'язані з інерційністю процедур вимірювання, локальністю контролю та залежністю від участі персоналу у небезпечних зонах. Обґрунтовано доцільність переходу до кіберфізичної моделі моніторингу, в якій безпілотні літальні апарати виконують роль мобільних сенсорних агентів, здатних забезпечувати просторово-часову безперервність збору даних та підвищену інформаційну насиченість виробничого середовища.

Сформовано багатокритеріальну систему оцінювання ефективності функціонування дронів, яка інтегрує метрологічні, експлуатаційні, інформаційні та безпекові показники. Встановлено, що ключовими детермінантами ефективності виступають оперативність збору даних, просторове покриття та здатність системи адаптуватися до динамічних змін середовища, тоді як точність вимірювань набуває характеру обмежувального критерію, що визначає допустимі режими функціонування. Показано, що

ефективність безпілотних систем має нелінійний характер та формується внаслідок компромісу між швидкістю переміщення платформи, стабільністю польоту та параметрами сенсорної інтеграції.

Досліджено вплив експлуатаційних факторів виробничого середовища на метрологічні характеристики сенсорних систем, у результаті чого встановлено їх взаємопов'язаний та нелінійний характер дії. Виявлено, що найбільш критичним є комбінований вплив температурних коливань та запиленості, який спричиняє систематичні та стохастичні складові похибок, зумовлюючи деградацію чутливості вимірювальних каналів. Обґрунтовано необхідність застосування адаптивних алгоритмів компенсації та динамічного калібрування як засобів підтримання метрологічної стійкості системи в умовах змінних техногенних навантажень.

Оцінювання ефективності використання дронів показало їх суттєві переваги порівняно з традиційними методами моніторингу за показниками оперативності та просторового охоплення, що проявляється у зростанні щільності інформаційного поля та зменшенні невизначеності щодо стану виробничого середовища. Водночас встановлено наявність стохастичного зростання похибок, зумовленого динамікою руху платформи, що формує необхідність оптимізації режимів польоту з урахуванням обмежень за точністю вимірювань.

Порівняльний аналіз традиційних та безпілотних систем моніторингу дозволив встановити їх принципово різну інформаційну природу: якщо традиційні системи забезпечують високу точність у локальних точках контролю, то безпілотні платформи реалізують квазібезперервне зондування середовища з адаптивною зміною конфігурації спостереження. Це забезпечує перехід від статичної до динамічної моделі контролю, орієнтованої на виявлення просторово-часових градієнтів небезпечних факторів.

Дослідження параметрів стабільності польоту показало, що динаміка безпілотної платформи є критичним фактором, який визначає якість вимірювань через механізм трансформації коливань у похибку сенсорних систем. Встановлено залежність між спектральними характеристиками збурень та точністю вимірювань, що обґрунтовує необхідність синтезу робастних та адаптивних систем керування, здатних мінімізувати вплив турбулентних потоків, теплових градієнтів та обмеженого простору виробничого середовища.

Визначено, що економічна ефективність впровадження безпілотних технологій має

комплексний характер та формується як за рахунок прямих ефектів (зниження трудових витрат, скорочення часу виконання вимірювань), так і опосередкованих (зменшення ймовірності аварій, підвищення якості управлінських рішень, зниження невизначеності). Встановлено, що найбільш вагомим є ефект зниження виробничих ризиків, який має нелінійний характер та забезпечує значний економічний результат навіть при незначному зменшенні ймовірності небезпечних подій.

Розроблено концептуальні підходи до інтеграції безпілотних технологій у систему

управління охороною праці, що базуються на принципах багаторівневої інтеграції, адаптивного моніторингу та даноорієнтованого управління. Обґрунтовано необхідність формування єдиного інформаційного простору, впровадження аналітичних модулів прогнозування та переходу до проактивної моделі управління ризиками. Показано, що ефективна інтеграція дронів передбачає трансформацію організаційної структури системи охорони праці, розвиток компетентностей персоналу та забезпечення кіберфізичної безпеки функціонування системи

ЛІТЕРАТУРА:

1. Badri A., Boudreau-Trudel B., Souissi A. S. Occupational health and safety in the industry 4.0 era: a cause for major concern? *Safety science*. 2018. Vol. 109. P. 403–411. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012> (date of access: 19.03.2026).
2. Basner M. et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The lancet*. 2014. Vol. 383, № 9925. P. 1325–1332. URL: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(13\)61613-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(13)61613-x) (date of access: 19.03.2026).
3. Osman E., Pala K. Occupational exposure to wood dust and health effects on the respiratory system in a minor industrial estate in Bursa/Turkey. *International journal of occupational medicine and environmental health*. 2009. Vol. 22, № 1. URL: <https://doi.org/10.2478/v10001-009-0008-5> (date of access: 19.03.2026).
4. Parsons K. Human thermal environments. *Taylor & Francis Group*, 2015. 626 p. URL: <https://doi.org/10.1201/b16750> (date of access: 19.03.2026).
5. Lee J., Jin C., Bagheri B. Cyber physical systems for predictive production systems. *Production engineering*. 2017. Vol. 11, № 2. P. 155–165. URL: <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0729-4> (date of access: 19.03.2026).
6. Lee J. et al. Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 38. P. 3–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.026> (date of access: 19.04.2026).
7. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). На заміну ДСТУ OHSAS 18001:2010 ; чинний від 2021-01-01. Вид. офіц. ДСТУ OHSAS 18001:2010. URL: <https://surl.li/yoptmn> (дата звернення: 19.03.2026).
8. NIOSH manual of analytical methods (2014-151) | NIOSH | CDC. Centers for Disease Control and Prevention | CDC. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/nmam/default.html> (date of access: 19.03.2026).
9. Sharma S. et al. UAV for surveillance and environmental monitoring. *Indian journal of science and technology*. 2016. Vol. 9, no. 43. URL: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i43/104396> (date of access: 19.03.2026).
10. Alvarado M. et al. Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites. *Sensors*. 2015. Vol. 15, № 8. P. 19667–19687. URL: <https://doi.org/10.3390/s150819667> (date of access: 19.03.2026).
11. Hu Z. et al. UAV aided aerial-ground iot for air quality sensing in smart city: architecture, technologies, and implementation. *IEEE network*. 2019. Vol. 33, no. 2. P. 14–22. URL: <https://doi.org/10.1109/mnet.2019.1800214> (date of access: 19.03.2026).
12. Vanegas F., Gonzalez F. Enabling UAV navigation with sensor and environmental uncertainty in cluttered and gps-denied environments. *Sensors*. 2016. Vol. 16, № 5. P. 666. URL: <https://doi.org/10.3390/s16050666> (date of access: 19.03.2026).
13. Sung Y., Dixit D., Tokekar P. Environmental hotspot identification in limited time with a UAV equipped with a downward-facing camera. 2021 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), Xi'an, China, 30 May – 5 June 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/icra48506.2021.9561185> (date of access: 19.03.2026).
14. Rohi G., Ejofodomi O., Ofualagba G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon*. 2020. Vol. 6, № 1. P. e03252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03252> (date of access: 19.03.2026).

15. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE communications surveys & tutorials*. 2016. Vol. 18, № 2. P. 1123–1152. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2495297> (date of access: 19.03.2026).
16. Akyildiz I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*. 2002. Vol. 38, № 4. P. 393–422. URL: [https://doi.org/10.1016/s1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/s1389-1286(01)00302-4) (date of access: 19.03.2026).
17. Reddy Basani D. K. et al. Sensor fusion techniques for drones in iot-based surveillance systems. *International journal of multidisciplinary research and explorer*. 2022. Vol. 2, № 5. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.70454/ijmre.2022.20501> (date of access: 19.03.2026).
18. Забезпечення надійності та безпеки у сучасних безпроводових сенсорних мережах на основі впровадження метрики RSSI / П. Опенько та ін. Повітряна міць України. 2024. Т. 1, № 6. С. 131–136. URL: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-131-136> (дата звернення: 19.03.2026).
19. Bouabdallah S., Siegwart R. Full control of a quadrotor. 2007 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, San Diego, CA, USA, 29 October – 2 November 2007. 2007. URL: <https://doi.org/10.1109/iros.2007.4399042> (date of access: 19.03.2026).
20. Hoffmann G. et al. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: theory and experiment. AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit, Hilton Head, South Carolina. Reston, Virginia, 2007. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461> (date of access: 19.03.2026).
21. Atzori L., Iera A., Morabito G. The internet of things: a survey. *Computer networks*. 2010. Vol. 54, № 15. P. 2787–2805. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010> (date of access: 19.04.2026).
22. Gubbi J. et al. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*. 2013. Vol. 29, № 7. P. 1645–1660. URL: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010> (date of access: 19.04.2026).
23. Al-Fuqaha A. et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE communications surveys tutorials*. 2015. Vol. 17, № 4. P. 2347–2376. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2444095> (date of access: 19.04.2026).
24. Real-time big data analytical architecture for remote sensing application. *International journal of advance engineering and research development*. 2016. Vol. 3, no. 12. URL: <https://doi.org/10.21090/ijaerd.79669> (date of access: 19.04.2026).
25. Hossein Motlagh N., Taleb T., Arouk O. Low-Altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: comprehensive survey and future perspectives. *IEEE internet of things journal*. 2016. Vol. 3, no. 6. P. 899–922. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2016.2612119> (date of access: 19.04.2026).

REFERENCES:

1. Badri, A., Boudreau-Trudel, B., Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>
2. Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325–1332. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(13\)61613-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(13)61613-x)
3. Osman, E., & Pala, K. (2009). Occupational exposure to wood dust and health effects on the respiratory system in a minor industrial estate in Bursa/Turkey. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 22(1). <https://doi.org/10.2478/v10001-009-0008-5>
4. Parsons, K. (2015). Human thermal environments. *Taylor & Francis Group*. <https://doi.org/10.1201/b16750>
5. Lee, J., Jin, C., Bagheri, B. (2017). Cyber physical systems for predictive production systems. *Production Engineering*, 11(2), 155–165. <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0729-4>
6. Lee, J., Ardakani, H. D., Yang, S., & Bagheri, B. (2015). Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *Procedia CIRP*, 38, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.026>
7. DP «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti». Systemy upravlinnia okhoronoiu zdorovia ta bezpekoiu pratsi. Vymohy ta nastanovy shchodo zastosuvannia (ISO 45001:2018, IDT) (DSTU ISO 45001:2019). DSTU OHSAS 18001:2010. <https://surl.li/yooptmn>
8. NIOSH manual of analytical methods (2014-151) | NIOSH | CDC. (б. д.). Centers for Disease Control and Prevention | CDC. <https://www.cdc.gov/niosh/nmam/default.html>
9. Sharma, S., Muley, A., Singh, R., & Gehlot, A. (2016). UAV for surveillance and environmental monitoring. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(43). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i43/104396>

10. Alvarado, M., Gonzalez, F., Fletcher, A., & Doshi, A. (2015). Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites. *Sensors*, 15(8), 19667–19687. <https://doi.org/10.3390/s150819667>
11. Hu, Z., Bai, Z., Yang, Y., Zheng, Z., Bian, K., & Song, L. (2019). UAV aided aerial-ground iot for air quality sensing in smart city: Architecture, technologies, and implementation. *IEEE Network*, 33(2), 14–22. <https://doi.org/10.1109/mnet.2019.1800214>
12. Vanegas, F., Gonzalez, F. (2016). Enabling UAV navigation with sensor and environmental uncertainty in cluttered and gps-denied environments. *Sensors*, 16(5), 666. <https://doi.org/10.3390/s16050666>
13. Sung, Y., Dixit, D., & Tokekar, P. (2021). Environmental hotspot identification in limited time with a UAV equipped with a downward-facing camera. *У 2021 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icra48506.2021.9561185>
14. Rohi, G., Ejofodomi, O., & Ofualagba, G. (2020). Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon*, 6(1), Стаття e03252. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03252>
15. Gupta, L., Jain, R., & Vaszkun, G. (2016). Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1123–1152. <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2495297>
16. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422. [https://doi.org/10.1016/s1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/s1389-1286(01)00302-4)
17. Reddy Basani, D. K., Ramanjaneyulu Gudivaka, B., Gudivaka, R. K., Gudivaka, R. L., Grandhi, S. H., Kurunthachalam, A. (2022). Sensor fusion techniques for drones in iot-based surveillance systems. *International Journal of Multidisciplinary Research and Explorer*, 2(5), 1–12. <https://doi.org/10.70454/ijmre.2022.20501>
18. Openko, P., Dovzhenko, N., Orikhovskiy, P., Ikaiev, D. (2024). Zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky u suchasnykh bezprovodovykh sensorykh merezhakh na osnovi vprovadzhennia metryky RSSI. *Povitriana mits Ukrainy*, 1(6), 131–136. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-131-136>
19. Bouabdallah, S., Siegwart, R. (2007). Full control of a quadrotor. 2007 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/iros.2007.4399042>
20. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., Tomlin, C. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. *У AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics*. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461>
21. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
22. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
23. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2444095>
24. Real-time big data analytical architecture for remote sensing application. (2016b). *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 3(12). <https://doi.org/10.21090/ijaerd.79669>
25. Hossein Motlagh, N., Taleb, T., Arouk, O. (2016). Low-Altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: Comprehensive survey and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6), 899–922. <https://doi.org/10.1109/jiot.2016.2612119>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026