УДК 621.311:614.8:631
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).19

INTERNATIONAL PRACTICES AND STANDARDS FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND CIVIL PROTECTION OF ENERGY INSTALLATIONS IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

МІЖНАРОДНІ ПРАКТИКИ Й СТАНДАРТИ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ТА ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Liudmyla G. Savchenko
slgua@ukr.net
ORCID: 0000-0002-7689-4982

Serhii V. Minenko
dgs-ua1@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0327-0017

Yurii P. Honcharenko
altair091255@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2631-2956

Л. Г. Савченко,
канд. іст. наук

С. В. Міненко,
канд. техн. наук

Ю. П. Гончаренко,
канд. техн. наук

Polissia National University, Zhytomyr
Поліський національний університет, м. Житомир

Abstract. *Objective*. To substantiate an integrated safety model for energy installations in the agro-industrial complex by comparing international standards and systematically assessing their applicability in Ukraine. *Methods*. Two bodies of evidence were compiled: sixteen scientific publications issued between 2016 and 2026 and four international regulatory documents currently in force. The requirements were compared by regulatory scope, risk categories, types of countermeasures, personnel requirements, emergency preparedness, and potential for quantitative assessment. Applicability was determined according to three criteria: legal compatibility, technical feasibility, and economic viability. Each criterion was rated on a three-point scale, followed by normalization of the results to 100 %. The model was developed according to the risk–countermeasure–indicator chain. Study reproducibility was ensured by recording the search date, standardizing the search queries, applying transparent selection criteria, and unifying the scoring rules. *Results*. Five groups of risks were identified: electrical, fire, explosion, technological, and organizational. The highest level of initial applicability was established for occupational safety management requirements, at 100.0 %, and incident management requirements, at 88.9 %. Technical explosion protection requirements necessitate phased modernization because their applicability ranged from 55.6 % to 77.8 %. An integrated safety management framework was developed, encompassing hazard identification, engineering and organizational protective measures, monitoring, personnel training, emergency response, civil protection, incident analysis, and corrective actions. Based on this framework, a system of six quantitative compliance indicators was formulated, and threshold values were substantiated for three levels of safety system maturity. *Scientific novelty*. For the first time, international requirements for occupational safety, explosion protection, and incident management have been integrated into a structural and functional model for energy installations in the agro-industrial complex. Within this model, each risk category is linked to a specific countermeasure and a measurable indicator. *Practical significance*. The findings can be used to audit energy facilities, prioritize modernization measures, develop safe operating procedures, prepare emergency response plans, and design personnel training programs.
Key words: risk-based approach; functional safety; explosion-protected electrical equipment; emergency preparedness; compliance indicator; parameter monitoring; infrastructure resilience.

Анотація. *Мета*. Обґрунтувати інтегровану модель безпеки енергоустановок агропромислового комплексу на основі порівняння міжнародних стандартів і структурованого оцінювання можливостей їхнього застосування в Україні. *Методика*. Сформовано два масиви матеріалів: шістнадцять наукових публікацій, оприлюднених у 2016–2026 рр., і чотири чинні міжнародні нормативні документи. Вимоги порівняно за сферами регулювання, категоріями ризику, видами заходів протидії, вимогами до персоналу, аварійною готовністю та можливістю кількісного оцінювання. Застосовність визначено за трьома критеріями: правовою узгодженістю, технічною

здійсненністю та економічною доцільністю – за трибальною шкалою з подальшим нормуванням результатів до 100 %. Модель побудовано за принципом ланцюга «ризик – захід протидії – індикатор». Відтворюваність дослідження забезпечено завдяки чіткій фіксації дати пошуку, стандартизації пошукових запитів, прозорості критеріїв відбору та уніфікації правил бального оцінювання. *Результати*. Виокремлено п'ять груп ризиків: електротехнічні, пожежні, вибухові, технологічні та організаційні. Найвищий рівень первинної застосовності виявлено для управлінських вимог щодо охорони праці – 100,0 % та управління інцидентами – 88,9 %. Технічні вимоги до вибухозахисту потребують поетапної модернізації, оскільки рівень їхньої застосовності становить 55,6–77,8 %. Розроблено інтегрований контур управління безпекою, який охоплює ідентифікацію небезпек, інженерні та організаційні заходи захисту, моніторинг, підготовку персоналу, аварійне реагування, цивільний захист, аналіз інцидентів і коригувальні дії. На його основі сформовано систему з шести кількісних індикаторів відповідності та обґрунтовано порогові значення для трьох рівнів зрілості системи безпеки. *Наукова новизна*. Уперше для енергоустановок агропромислового комплексу міжнародні вимоги з охорони праці, вибухобезпеки та управління інцидентами інтегровано в структурно-функціональну модель, де кожній категорії ризику відповідають конкретний захід протидії та вимірюваний індикатор. *Практична значущість*. Результати дослідження доцільно використовувати для аудиту енергооб'єктів, визначення пріоритетності модернізації, розроблення регламентів безпечної експлуатації, планів реагування та програм підготовки персоналу.
Ключові слова: ризикоорієнтований підхід; функціональна безпека; вибухозахищене електрообладнання; аварійна готовність; індикатор відповідності; моніторинг параметрів; стійкість інфраструктури.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

До енергоустановок агропромислового комплексу належать трансформаторні підстанції, розподільні пристрої, електроприводи технологічних ліній, сушильні та холодильні установки, котельне обладнання, системи резервного живлення та локальні джерела енергії. Експлуатація цього обладнання супроводжується впливом органічного пилу, підвищеної вологості, наявності горючих матеріалів, рухомих механізмів та змінних режимів навантаження. З огляду на це навіть одинична відмова може призвести до комплексних наслідків – від ураження електричним струмом, пожежі чи вибуху пилоповітряної суміші до порушення вентиляції або охолодження, зупинки технологічного процесу та евакуації персоналу.

Безпеку такого об'єкта недоцільно зводити до виконання окремих приписів. Ризик варто розглядати як сукупність можливих наслідків, невизначеності знань та обґрунтованості управлінських рішень [1, с. 3]. Для підприємств України ця концепція доповнюється необхідністю збереження критичних функцій під час тривалого знеструмлення, пошкодження інфраструктури або відсутності ресурсів. Це зумовлює необхідність інтегрувати електробезпеку, пожежо- й вибухозахист, охорону праці та цивільний захист у єдиний контур, який не лише регламентує вимоги, а й забезпечує контроль їхнього фактичного виконання за допомогою вимірюваних індикаторів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасній практиці інженерії безпеки простежується чіткий перехід від разового статичного аналізу до систем, що оновлюють оцінювання ризику в режимі реального часу залежно від фактичного стану обладнання. Огляд концепцій динамічного аналізу засвідчує, що класичні кількісні моделі недостатньо враховують деградацію бар'єрів захисту під час експлуатації [2, с. 80]. Подальший розвиток цього напряму пов'язують із даними моніторингу, моделюванням сценаріїв, стійкістю та безперервністю діяльності [3, с. 181]. Для агропромислового комплексу це має принципове значення, оскільки конфігурація навантаження, стан електроприводів і концентрація пилу змінюються впродовж виробничого циклу.

Цифровізація підвищує рівень спостережуваності процесів, проте водночас формує нові залежності між людиною, програмним забезпеченням і фізичним обладнанням. Дослідники застерігають, що технології Четвертої промислової революції не підвищують безпеку автоматично: без належної інтеграції з охороною праці вони ускладнюють системи та розмивають межі відповідальності за ухвалені рішення [4, с. 406]. Узагальнення методів безпеки, захищеності та стійкості також засвідчує перевагу цілісних соціотехнічних підходів над ізольованим оцінюванням окремих відмов [5, с. 4]. Застосування кількісного індексу стійкості підтверджує, що здатність системи відновлюватися визначається не лише її технічною надійністю, а й організаційними принципами управління [6, с. 186].

Галузеві дослідження конкретизують людський і технологічний аспекти проблеми. Автоматизація тваринницьких комплексів знижує частину ручних операцій, однак створює прогалини в оцінюванні нових небезпек для операторів [7, с. 5]. Цифрові тренажери та ігрові методи можуть бути перенесені в аграрне навчання, якщо сценарії відтворюють реальні виробничі ризики [8, с. 7]. Водночас зафіксовано невідповідність між декларованими пріоритетами безпеки фермерів і повсякденними практиками [9, с. 6]. Це свідчить про те, що регламент має

супроводжуватися перевіркою поведінки, допусків і фактичного стану захисних засобів. Водночас автоматизацію й кліматичні впливи необхідно аналізувати спільно, оскільки вони змінюють і режим праці, і конфігурацію технічних ризиків [10, с. 8].

Для побудови критерію економічної доцільності використано міжгалузеві праці, які демонструють вартісні наслідки впровадження систем вимірювання та звітності. Аналіз систем вуглецевого моніторингу в судноплавстві засвідчує, що впровадження вимірювальної інфраструктури істотно змінює структуру витрат і конкурентні умови [11, с. 5], тоді як оцінювання декарбонізаційних заходів підтверджує доцільність поетапного вибору технічних рішень за критеріями їхньої результативності та вартості [12, с. 4]. Зазначені висновки використано в роботі не для прямого оцінювання небезпек, а як основа для формування логіки пріоритизації інвестицій у заходи контролю та захисту.

Окремим напрямом є забезпечення доказовості цифрових даних. Вимоги до атестації відео- та інфрачервоних моделей, визначення допустимих меж погіршення якості зображення й метрик експлуатаційної надійності забезпечують дотримання принципу простежуваного ланцюга даних [13, с. 421]. Модель оцінювання невизначеності віртуальних вимірювальних засобів і придатної для аудиту звітності засвідчує необхідність використання станів VALID/INVALID/ALARM, кодів причин та захисту цілісності записів [14, с. 90]. Для енергоустановок агропромислового комплексу це означає, що кожен сигнал датчика має супроводжуватися визначеним статусом якості, часу, джерела та зв'язку з відповідним рішенням оператора.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Наявні підходи окремо розглядають питання управління охороною праці, динамічного оцінювання ризиків, цифрового моніторингу, вибухозахисту, навчання персоналу та аварійного реагування. Натомість для енергоустановок агропромислового комплексу України досі не сформовано цілісної процедури, яка б застосовувала єдині критерії для різних систем стандартизації; пов'язувала кожен ризик із технічним або організаційним заходом контролю; ураховувала аварійну готовність і цивільний захист, а також упроваджувала вимірювані показники для перевірки дієвості ризиків безпеки, а не лише наявності формальної документації. Розв'язання цієї проблеми є необхідною умовою для прямої адаптації міжнародних практик.

Метою дослідження є обґрунтування інтегрованої моделі безпеки енергоустановок агропромислового комплексу за результатами порівняння міжнародних стандартів та оцінювання застосовності їхніх вимог в Україні.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є безпека праці й цивільний захист під час експлуатації енергоустановок агропромислового комплексу. Предмет – організаційно-технічні механізми адаптації міжнародних стандартів до сучасних умов України. Гіпотеза дослідження ґрунтується на тому, що інтеграція нормативних вимог у єдиний ризикоорієнтований контур забезпечує вищу керованість небезпеками, ніж фрагментарне дотримання приписів окремих документів.

Матеріали було відібрано станом на 21 липня 2026 року. Для формування вибірки наукових джерел застосовано пошукові запити в базах Scopus і Web of Science: TITLE-ABS-KEY ((agriculture OR agro-industrial OR process industry) AND (occupational safety OR electrical safety OR emergency preparedness OR resilience)); TITLE-ABS-KEY ((dynamic risk assessment OR condition monitoring) AND (energy OR process safety)). Пошук у нормативному секторі охоплював офіційні каталоги міжнародних організацій і базу законодавства Європейського Союзу. До критеріїв відбору належали: хронологічні межі 2016–2026 рр.; рецензований характер публікацій; прямий зв'язок із тематикою ризик-менеджменту, аграрної безпеки, моніторингу, підготовки персоналу або стійкості; чинність нормативних документів на дату пошуку. З вибірки вилучали праці без перевірюваних реквізитів, суто клінічні дослідження, а також публікації, видані російською мовою або на території Росії чи Білорусі. До підсумкової вибірки ввійшли 16 наукових публікацій та 4 нормативні документи.

Нормативний корпус охопив систему управління охороною праці ISO 45001:2018 з поправкою 2024 року [15, с. 8], рекомендації з управління інцидентами ISO 22320:2018, підтверджені у 2024 році [16, с. 5], чинну редакцію IEC 60079-10-2:2026 щодо класифікації зон із вибухонебезпечним пилом [17, с. 12] та консолідований текст Директиви 1999/92/ЕС щодо захисту працівників від вибухонебезпечних середовищ [18, с. 59]. Для кожного нормативного документа закодовано шість основних параметрів: сферу регулювання; спектр ризиків; інженерно-технічні вимоги; регламенти з охорони праці; алгоритми аварійного реагування та рівень вимірюваності результатів.

Застосовність оцінювали за 3-бальною порядковою шкалою: 1 бал – наявність істотної правової колізії, складна технічна реалізація або високі витрати; 2 бали – часткова узгодженість, необхідність модернізації чи помірні витрати; 3 бали – пряма узгодженість, можливість реалізації на наявній базі або переважно організаційні витрати. Нормований індекс визначали як $A = (L + T + E) / 9 \times 100$ %, де L – правова узгодженість, T – технічна здійсненність, E – економічна доцільність. Для інтерпретації результатів застосовано такі граничні значення: 0–59,9 % – обмежена

застосовність; 60,0–79,9 % – часткова; 80,0–100 % – висока. Структурно-функціональну модель сформовано за причинно-наслідковим ланцюгом «ризик – контрзахід – індикатор».

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

За результатами систематизації виокремлено п'ять взаємопов'язаних груп. Електротехнічні ризики охоплюють прямий і непрямий дотик, дуговий розряд, відмову заземлення, перевантаження та ненавмисний пуск. Пожежні – перегрівання контактів, кабельних ліній, електроприводів і резервних генераторів. Вибухові – займання пилу зерна, борошна, комбікорму або біомаси від електричної іскри чи нагрітої поверхні. Технологічні – зупинку вентиляції, охолодження, сушіння, насосів та автоматики. Організаційні – недосконалі допуски, відсутність блокування енергії, неповну підготовку, несвоєчасне обслуговування й неузгоджене реагування.

Порівняння міжнародних вимог за єдиними критеріями та результати авторського розрахунку індексу застосовності наведено в табл. 1.

Отримані результати свідчать про різну природу викликів. Управлінський складник можна реалізувати переважно шляхом чіткого розподілу відповідальності, ведення реєстрів небезпек, упровадження процедур допуску та циклу коригувальних дій, завдяки чому його показник сягнув 100,0 %. Управління інцидентами також має високу застосовність, але потребує забезпечення сумісності каналів зв'язку, резервів і взаємодії із зовнішніми службами. Найнижчий показник застосованості вимог вибухозахисту зумовлений потребою інструментального обстеження, класифікації зон, заміни частини електрообладнання та модернізації аспірації. Отже, інтегрований контур доцільно впроваджувати не шляхом одночасної заміни всіх елементів, а послідовно: організаційна база – інструментальна верифікація – технічна модернізація – комплексні навчання.

Запропоновану інтегровану модель подано на рис. 1. Вона перетворює набір стандартів на замкнений управлінський цикл: кожна небезпека передбачає відповідний захід запобігання, захід запобігання – вимірюваний індикатор, а відхилення – коригувальну дію.

Для оцінювання ефективності моделі запропоновано систему з шести індикаторів: K1 – частка ідентифікованих небезпек із призначеними заходами запобігання; K2 – частка працездатних технічних засобів захисту серед передбачених проєктом; K3 – частка працівників із чинним допуском та підтвердженою рівневою компетентністю; K4 – рівень виконання нормативного часу оповіщення, локалізації та евакуації, установленого оперативним планом об'єкта; K5 – частка точних записів моніторингу зі статусом якості даних; K6 – частка коригувальних дій, реалізованих і закритих у встановлений термін. Інтегральний індекс C визначається як середнє арифметичне K1–K6. Значення до 59,9 % відповідає фрагментарному рівню, 60,0–79,9 % – керованому, але неповному, 80,0–100 % – інтегрованому рівню. Така градація не підміняє обов'язкові нормативні межі, а відображає ступінь зрілості контуру та дає змогу виявити ризики, що обмежують загальний результат.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розроблена модель узгоджується з висновками дослідників щодо перспективності застосування носимих датчиків, комп'ютерного зору, аналітики та інших технологій моніторингу в системі охорони праці, проте додатково враховує застереження щодо якості даних і рівня сприйняття технологій [19, с. 8]. З огляду на це K5 оцінює не кількість установлених датчиків, а частку записів, які мають валідний статус і можуть бути використані для рішення. Запропонований підхід узгоджується з кількісним аналізом безпеки аграрного сектору, де профілактичні рішення мають спиратися на структуровані дані про причини та джерела травм [20, с. 9]. У запропонованій моделі цю функцію виконують K1, K2 і K6 та обов'язковий аналіз інцидентів.

Основною перевагою моделі є чітке розмежування трьох рівнів. Перший – інженерний – охоплює заземлення, захисне вимкнення, блокування, вибухозахищене виконання, аспірацію, контроль температури й стану приводів. Другий – організаційний – визначає допуск, компетентність, технічне обслуговування, керування змінами та реєстрацію відхилень. Третій – реагування та цивільний захист – забезпечує зупинку, локалізацію, оповіщення, взаємодію, евакуацію та відновлення критичних функцій. Відмова одного рівня не знецінює інші, проте має знижувати інтегральний індекс і запускати коригувальну дію.

Для впровадження розробленої моделі в Україні запропоновано три етапи. На першому формують реєстр енергоустановок, карту небезпек, матрицю відповідальності та основні процедури аварійної готовності. На другому перевіряють фактичні виробничі ризики, класифікують пилонебезпечні зони, установлюють пріоритети модернізації та формують вимоги до якості даних. На третьому інтегрують систему моніторингу з планом реагування, проводять міжфункціональні тренування і забезпечують актуалізацію індикаторів після інцидентів. Запропонована послідовність розгортання підтверджує гіпотезу: формування єдиного контуру забезпечує прозорість та спостережуваність відхилень для технічної служби, охорони праці та підрозділів цивільного захисту, тоді як поелементне застосування залишає між ними розриви.

До основних обмежень дослідження належать аналітичний характер оцінювання, відсутність апробації на конкретному підприємстві та різна юридична природа стандартів і директив. Індекс застосовності

Таблиця 1. Порівняння міжнародних вимог і модулів безпеки енергоустановок АПК

Стандарт / модуль	Сфера регулювання	Види ризиків	Інженерні вимоги	Охорона праці	Цивільний захист	Застосовність в Україні	Індикатор відповідності
ISO 45001:2018	Система управління	Усі; організаційні	Ієрархія засобів контролю	Участь працівників; компетентність	Готовність і реагування	3/3/3; 100,0 % – висока	Закриті дії / заплановані, %
ISO 22320:2018	Управління інцидентами	Аварійні; технологічні	Засоби зв'язку та управління ресурсами	Ролі та відповідальність	Спільне керівництво; координація	3/3/2; 88,9 % – висока	Час оповіщення та збору
IEC 60079-10-2:2026	Вибухонебезпечні пилові зони	Вибухові; пожежні	Класифікація зон; контроль джерел займання	Обмеження доступу; огляди	Локалізація наслідків	2/2/1; 55,6 % – обмежена	Частка класифікованих зон, %
Directive 1999/92/EC	Захист працівників у вибуховому середовищі	Вибухові; організаційні	Запобігання утворенню та займанню	Оцінка ризику; інструктаж	Документ вибухозахисту; евакуація	2/3/2; 77,8 % – часткова	Виконані заходи документа, %
Модуль «персонал»	ISO 45001 + Directive	Електричні; організаційні	Блокування та безпечний допуск	Навчання; перевірка компетентності	Розподіл ролей	3/3/3; 100,0 % – висока	Допущені працівники / потрібні, %
Модуль «моніторинг»	IEC 60079 + ISO 22320	Пожежні; вибухові	Датчики; сигналізація; статус якості даних	Реакція на тривогу	Оповіщення; передача даних	2/2/2; 66,7 % – часткова	Перевірені записи / усі, %
Інтегрований контур	Усі чотири документи	П'ять груп ризиків	Комплект технічних викликів	Управління змінами; аудит	Реагування; відновлення	2/2/2; 66,7 % – часткова	Середній індекс шести KPI, %

Джерело: розроблено авторами на основі [15, с. 8; 16, с. 5] *і* [17, с. 12; 18, с. 59]; *розрахунки авторів.*

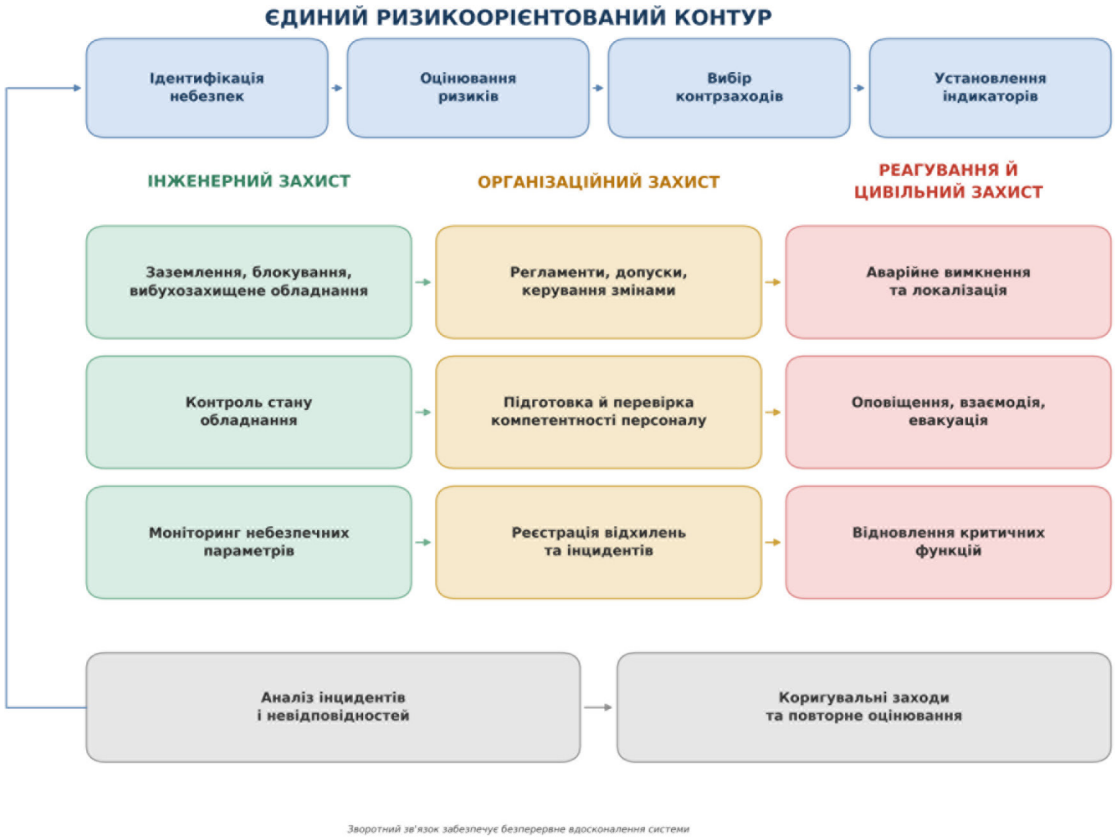


Рис. 1. Інтегрована модель безпеки енергоустановок агропромислового комплексу
Джерело: авторська розробка.

не є сертифікаційною оцінкою, а його економічний компонент потребує уточнення за кошторисами об'єкта. Подальшу перевірку доцільно здійснювати шляхом пілотного аудиту, залучення фахівців з електробезпеки, пожежного та цивільного захисту, оцінювання узгодженості експертів та аналізу зміни K1–K6 після модернізації.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз 16 наукових публікацій і 4 чинних нормативних документів підтвердив, що безпека енергоустановок агропромислового комплексу належить до соціотехнічних задач і потребує спільного аналізу технічних, людських та аварійних чинників.

2. Єдині критерії порівняння дали змогу виокремити п'ять груп ризиків: електротехнічні, пожежні, вибухові, технологічні та організаційні. Для кожної групи визначено інженерні й організаційні виклики та заходи реагування.

3. Найвищу первинну застосовність в Україні мають вимоги до системи управління охороною праці (100,0 %) та інцидентами (88,9 %). Вибухозахисні технічні вимоги мають нижчу оцінку (55,6–77,8 %) через потребу обстеження, зонування й капітальної модернізації.

4. Основним науковим результатом дослідження є інтегрована структурно-функціональна модель «ризик – контрзахід – індикатор», яка об'єднує інженерний захист, організаційні процедури, моніторинг, компетентність персоналу, аварійне реагування, цивільний захист, аналіз інцидентів і коригувальні заходи.

5. Запропоновані індикатори K1–K6 та інтегральний індекс C забезпечують перевірюваність моделі та дають змогу визначити фрагментарний, керований або інтегрований рівень зрілості. Їхні значення мають доповнювати, а не замінювати обов'язкові нормативні критерії.

6. Практичне впровадження моделі доцільно здійснювати поетапно: організаційна база; інструментальна верифікація; технічна модернізація; інтегровані навчання й повторне оцінювання. Наступним етапом досліджень має стати пілотна апробація моделі на різних типах енергоустановок агропромислового комплексу.

Подяка та фінансування. Дослідження виконано без зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Декларація авторів щодо використання штучного інтелекту. Автори заявляють, що під час підготовки, написання, редагування та оформлення цього рукопису інструменти генеративного

штучного інтелекту або інші системи на основі штучного інтелекту не використовувалися. Усі етапи дослідження, аналіз джерел, інтерпретація результатів, підготовка графічних матеріалів, формулювання висновків і написання тексту виконані авторами самостійно.

REFERENCES

[1] Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research, 253*(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023

[2] Villa, V., Paltrinieri, N., Khan, F., & Cozzani, V. (2016). Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry. *Safety Science, 89*, 77–93. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.06.002

[3] Zio, E. (2018). The future of risk assessment. *Reliability Engineering & System Safety, 177*, 176–190. https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.04.020

[4] 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

[5] Ab Rahim, M. S., Reniers, G., Yang, M., & Bajpai, S. (2024). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 88*, 105274. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274

[6] Castillo-Borja, F., Vázquez-Román, R., Quiroz-Pérez, E., Díaz-Ovalle, C., & Mannan, M. S. (2017). A resilience index for process safety analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 50*, 184–189. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.06.017

[7] Hayden, M. A., Barim, M. S., Weaver, D. L., Elliott, K. C., Flynn, M. A., & Lincoln, J. M. (2022). Occupational safety and health with technological developments in livestock farms: A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(24), 16440. https://doi.org/10.3390/ijerph192416440

[8] Vigoroso, L., Caffaro, F., Micheletti Cremasco, M., & Cavallo, E. (2021). Innovating occupational safety training: A scoping review on digital games and possible applications in agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(4), 1868. https://doi.org/10.3390/ijerph18041868

[9] Beseler, C. L., & Rautiainen, R. H. (2022). Lack of agreement between safety priorities and practices in agricultural operators: A challenge for injury prevention. *Safety, 8*(2), 39. https://doi.org/10.3390/safety8020039

[10] Comi, M., Becot, F., & Bendixsen, C. (2023). Automation, climate change, and the future of farm work: Cross-disciplinary lessons for studying dynamic changes in agricultural health and safety. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 20*(6), 4778. https://doi.org/10.3390/ijerph20064778

[11] Tolobaiev, H. H. (2023). Ekonomichni naslidky vprovadzhennia system vuhletsevoho monitorynhu u svitovomu sudnoplavstvi [Economic consequences of implementing carbon monitoring systems in global shipping]. *Akademichni vizii – Academic Visions*, (24). https://doi.org/10.5281/zenodo.17596398 [in Ukrainian].

[12] Tolobaiev, H. (2025). Dekarbonizatsiia morskoho transportu: Analiz realizovanykh i perspektyvnykh zakhodiv zi zmenshennia vykydiv CO_2 [Decarbonization of maritime transport: Analysis of implemented and prospective measures to reduce CO_2 emissions]. *Science Online: International Scientific e-Zine*, (1). Retrieved from: https://nauka-online.com/en/publications/other/2025/1/04-38/ [in Ukrainian].

[13] Syrotenko, A. (2026). Evidence-grade integrity of video/IR emission-detection models. *Věda a Perspektivy, 12*(55), 417–426. https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-12(55)-417-426

[14] Syrotenko, A. (2022). PI-MVS: Mathematical model for uncertainty evaluation of virtual instruments in flare systems and auditable reporting to the national platform Ecosystema. *Global Prosperity, 2*(4), 87–96. https://doi.org/10.5281/zenodo.18877576

[15] International Organization for Standardization. (2018b). *ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use (Amendment 1:2024)*. Retrieved from: https://www.iso.org/standard/63787.html

[16] International Organization for Standardization. (2018a). *ISO 22320:2018. Security and resilience – Emergency management – Guidelines for incident management*. Retrieved from: https://www.iso.org/standard/67851.html

[17] International Electrotechnical Commission. (2026). *IEC 60079-10-2:2026. Explosive atmospheres – Part 10-2: Classification of areas – Explosive dust atmospheres*. Retrieved from: https://webstore.iec.ch/en/publication/90124

[18] European Parliament, & Council of the European Union. (1999). Directive 1999/92/EC on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres (consolidated version of 27 June 2007). *Official Journal of the European Communities, L 23*, 57–64. Retrieved from: http://data.europa.eu/eli/dir/1999/92/2007-06-27

[19] Flor-Unda, O., Fuentes, M., Dávila, D., Rivera, M., Llano, G., Izurieta, C., & Acosta-Vargas, P. (2023). Innovative technologies for occupational health and safety: A scoping review. *Safety, 9*(2), 35. https://doi.org/10.3390/safety9020035

[20] De Leo, F., Elia, V., Gnoni, M. G., Tornese, F., De Merich, D., Guglielmi, A., & Pellicci, M. (2023). Assessment of safety levels in the agricultural sector for supporting social sustainability: A quantitative analysis from a national point of view. *Sustainability, 15*(16), 12585. https://doi.org/10.3390/su151612585

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research, 253*(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023

[2] Villa, V., Paltrinieri, N., Khan, F., & Cozzani, V. (2016). Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry. *Safety Science, 89*, 77–93. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.06.002

[3] Zio, E. (2018). The future of risk assessment. *Reliability Engineering & System Safety, 177*, 176–190. https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.04.020

[4] 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

[5] Ab Rahim, M. S., Reniers, G., Yang, M., & Bajpai, S. (2024). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 88*, 105274. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274

[6] Castillo-Borja, F., Vázquez-Román, R., Quiroz-Pérez, E., Díaz-Ovalle, C., & Mannan, M. S. (2017). A resilience index for process safety analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 50*, 184–189. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.06.017

[7] Hayden, M. A., Barim, M. S., Weaver, D. L., Elliott, K. C., Flynn, M. A., & Lincoln, J. M. (2022). Occupational safety and health with technological developments in livestock farms: A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(24), 16440. https://doi.org/10.3390/ijerph192416440

[8] Vigoroso, L., Caffaro, F., Micheletti Cremasco, M., & Cavallo, E. (2021). Innovating occupational safety training: A scoping review on digital games and possible applications in agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(4), 1868. https://doi.org/10.3390/ijerph18041868

[9] Beseler, C. L., & Rautiainen, R. H. (2022). Lack of agreement between safety priorities and practices in agricultural operators: A challenge for injury prevention. *Safety, 8*(2), 39. https://doi.org/10.3390/safety8020039

[10] Comi, M., Becot, F., & Bendixsen, C. (2023). Automation, climate change, and the future of farm work: Cross-disciplinary lessons for studying dynamic changes in agricultural health and safety. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 20*(6), 4778. https://doi.org/10.3390/ijerph20064778

[11] Толобаєв, Г. Г. (2023). Економічні наслідки впровадження систем вуглецевого моніторингу у світовому судноплавстві. *Академічні візії*, (24). https://doi.org/10.5281/zenodo.17596398

[12] Толобаєв, Г. (2025). Декарбонізація морського транспорту: аналіз реалізованих і перспективних заходів зі зменшення викидів CO_2. *Science Online: International Scientific e-Zine*, (1). https://nauka-online.com/en/publications/other/2025/1/04-38/

[13] Syrotenko, A. (2026). Evidence-grade integrity of video/IR emission-detection models. *Věda a Perspektivy, 12*(55), 417–426. https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-12(55)-417-426

[14] Syrotenko, A. (2022). PI-MVS: Mathematical model for uncertainty evaluation of virtual instruments in flare systems and auditable reporting to the national platform "Ecosystema". *Global Prosperity, 2*(4), 87–96. https://doi.org/10.5281/zenodo.18877576

[15] International Organization for Standardization. (2018b). *ISO 45001:2018 occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use* (Amendment 1:2024). https://www.iso.org/standard/63787.html

[16] International Organization for Standardization. (2018a). *ISO 22320:2018 security and resilience – Emergency management – Guidelines for incident management*. https://www.iso.org/standard/67851.html

[17] International Electrotechnical Commission. (2026). *IEC 60079-10-2:2026 explosive atmospheres – Part 10-2: Classification of areas – Explosive dust atmospheres*. https://webstore.iec.ch/en/publication/90124

[18] European Parliament, & Council of the European Union. (1999). Directive 1999/92/EC on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres (consolidated version of 27 June 2007). *Official Journal of the European Communities, L 23*, 57–64. http://data.europa.eu/eli/dir/1999/92/2007-06-27

[19] Flor-Unda, O., Fuentes, M., Dávila, D., Rivera, M., Llano, G., Izurieta, C., & Acosta-Vargas, P. (2023). Innovative technologies for occupational health and safety: A scoping review. *Safety, 9*(2), 35. https://doi.org/10.3390/safety9020035

[20] De Leo, F., Elia, V., Gnoni, M. G., Tornese, F., De Merich, D., Guglielmi, A., & Pellicci, M. (2023). Assessment of safety levels in the agricultural sector for supporting social sustainability: A quantitative analysis from a national point of view. *Sustainability, 15*(16), 12585. https://doi.org/10.3390/su151612585

© Савченко Л. Г., Міненко С. В., Гончаренко Ю. П.
Дата першого надходження статті до видання: 06.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)