e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

# GLOBAL EXPERIENCE IN IMPLEMENTING ENGINEERING AND TECHNICAL OCCUPATIONAL SAFETY MEASURES IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY AND AGRICULTURAL ENGINEERING

**L. Savchenko[1]*, B. Matviichuk[2], S. Khomenko[3]**

*[1]Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine*
*[2]Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, Ukraine*
*[3]Zhytomyr Agrotechnical Professional College, Zhytomyr, Ukraine*

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

***Key words:***
risk-based management,
arc flash hazard,
technical diagnostics,
emergency preparedness,
sensor-based monitoring.

***Article history:***
Received 15.09.2026
Reviewed 01.10.2026
Approved 30.10.2026

**Corresponding author:***
slgua@ukr.net

***ABSTRACT***

*The study aimed to develop an integrated safety model for energy installations of agricultural enterprises by comparing international regulatory approaches with Ukrainian practice. Twenty-one sources were analyzed: twelve scientific and applied publications and nine regulatory documents. Comparative content analysis, structural and functional analysis of the equipment, worker, production environment, and emergency response system, and regulatory modeling were applied. The functional coverage of eight core documents was assessed with the authors' index based on five equally weighted criteria scored from 0 to 2 points, and risks were ranked by the risk priority number with calibrated scales of probability, severity, and detectability. No single document covers the full safety cycle: index values range from 60 to 80%, and international requirements complement one another in managerial, technical, operational, and emergency functions. Ukrainian rules specify personnel authorization, de-energization, grounding, and workplace organization in detail but weakly link these procedures to continuous technical monitoring, quantitative assessment of arc flash and explosion risks, analysis of incident precursors, and civil protection. The developed model combines an equipment register, hazard identification, risk assessment, protective measures, operational control, monitoring, emergency response, incident analysis, and corrective actions, and is differentiated into basic, intermediate, and digital implementation levels. The scientific novelty lies in adapting international requirements to the integrated management of electrical, fire and explosion, mechanical, environmental, and organizational risks of agricultural energy installations. Measurable pilot indicators were defined, including registration of at least 95% of equipment, timely completion of at least 90% of inspections, and at least a 20% reduction in the time needed to reach a safe state. The model is substantiated at the regulatory and functional level; its effect on occupational injuries requires field verification*

**DOI:** 10.36910/acm.vi52.2334

*To cite this article:*
Savchenko, L., Matviichuk, B., & Khomenko, S. (2026). Global experience in implementing engineering and technical occupational safety measures in the electric power industry and agricultural engineering.. *Agricultural Machines*, *52*, 106-117. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2334

e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

УДК 331.45:621.31:631.3

# СВІТОВИЙ ДОСВІД УПРОВАДЖЕННЯ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ОХОРОНИ ПРАЦІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ ТА ІНЖЕНЕРІЇ АГРАРНОГО СЕКТОРУ

**Л. Г. Савченко[1]*, Б. В. Матвійчук[2], С. М. Хоменко[3]**

*[1]Поліський національний університет, Житомир, Україна*
*[2]Житомирський державний університет імені Івана Франка, Житомир, Україна*
*[3]Житомирський агротехнічний фаховий коледж, Житомир, Україна*

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

***Ключові слова:***
ризик-орієнтоване управління, небезпека електричної дуги, технічна діагностика, аварійна готовність, сенсорний моніторинг.

***Історія публікації:***
Отримано 15.09.2026
Прорецензовано 01.10.2026
Затверджено до друку 30.10.2026

**Автор для листування:***
slgua@ukr.net

***АНОТАЦІЯ***

*Мета дослідження – розроблення інтегрованої моделі безпеки енергоустановок аграрних підприємств на основі зіставлення міжнародних нормативних підходів із практикою України. Проаналізовано 21 джерело: 12 наукових і прикладних публікацій та 9 нормативних документів. Застосовано порівняльний контент-аналіз, структурно-функціональний аналіз системи обладнання, працівника, виробничого середовища й аварійного реагування та нормативне моделювання. Функціональне охоплення восьми базових документів оцінено авторським індексом за п'ятьма рівнозначними критеріями зі шкалою від 0 до 2 балів, ризики ранжовано за числом пріоритетності ризику з каліброваними шкалами ймовірності, тяжкості наслідків і можливості виявлення. Установлено, що жоден документ окремо не охоплює повного циклу безпеки: значення індексу становлять від 60 до 80%, а міжнародні вимоги взаємодоповнюють управлінські, технічні, оперативні та аварійні функції. Українські правила докладно регламентують допуск персоналу, зняття напруги, заземлення й організацію робочого місця, проте слабко пов'язують ці процедури з постійним технічним моніторингом, кількісним оцінюванням ризиків електричної дуги й вибуху, аналізом передумов інцидентів і цивільним захистом. Розроблена модель поєднує реєстр обладнання, ідентифікацію небезпек, оцінювання ризиків, захисні заходи, оперативний контроль, моніторинг, аварійне реагування, аналіз інцидентів і коригувальні дії та диференційована за базовим, проміжним і цифровим рівнями впровадження. Наукова новизна полягає в адаптації міжнародних вимог до інтегрованого управління електротехнічними, пожежно-вибуховими, механічними, середовищними й організаційними ризиками аграрних енергоустановок. Для пілотного впровадження визначено вимірювані показники, зокрема внесення до реєстру не менше ніж 95% обладнання, своєчасне виконання не менше ніж 90% перевірок і скорочення часу переходу до безпечного стану щонайменше на 20%. Модель обґрунтовано на нормативно-функціональному рівні; її вплив на виробничий травматизм потребує польової перевірки.*

**DOI:** 10.36910/acm.vi52.2334

*Цитувати цю статтю:*
Савченко, Л. Г., Матвійчук, Б. В., & Хоменко, С. М. (2026). Світовий досвід упровадження інженерно-технічних заходів охорони праці в електроенергетиці та інженерії аграрного сектору. *Сільськогосподарські машини*, *52*, 106-117. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2334

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Енергоустановки аграрного підприємства утворюють розподілену систему, до складу якої входять підстанції, електродвигуни насосів і вентиляції, зерносушарки, холодильне обладнання, кормоприготувальні лінії, біогазові комплекси, генератори, фотоелектричні та акумуляторні установки. Ці об'єкти експлуатують за підвищеної вологості, запиленості, корозійного впливу й сезонних навантажень, причому значну частку парку становить застаріле обладнання. За таких умов ураження електричним струмом або дуговий пробій спричиняють не лише травму працівника, а й пожежу, вибух пилогазової суміші, зупинку вентиляції чи водопостачання та потребу в заходах цивільного захисту.

Багатофакторність виробничих небезпек аграрного сектору підтверджують емпіричні дослідження. Аналіз національних баз даних про нещасні випадки, виконаний Ф. Де Лео та співавторами *(De Leo et al., 2023)*, показав, що структуровані відомості про джерела й причини травм дають змогу формувати результативніші профілактичні стратегії. За даними В. Ді Стефано та співавторів *(Di Stefano et al., 2025)*, застарілість парку тракторів і машин є основною причиною шумового ризику, а тривалий шум знижує концентрацію уваги оператора й підвищує ймовірність нещасних випадків. У вибірці з 75 аварій на біогазових установках, досліджених Х. Хегазі та співавторами *(Hegazy et al., 2024)*, вибухи становили 69,3%, а провідними причинами були відмови компонентів і помилки технічного обслуговування.

Зважаючи на ці дані, електробезпеку доцільно розглядати разом із пожежо- й вибухобезпекою, надійністю обладнання та аварійною готовністю. В Україні відповідні функції переважно розподілені між електробезпекою, пожежною безпекою, технічною експлуатацією, навчанням персоналу й цивільним захистом, а базові процедури робіт в електроустановках регламентують Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів *(Державний комітет України по нагляду за охороною праці [Держнаглядохоронпраці], 1998)*. За такого поділу відомості про нагрівання контактів, струми витоку, вібрацію, концентрацію газу або відмову вентиляції не завжди формують єдине рішення щодо ризику. Сезонні підключення, мобільні генератори, підрядні роботи та зміни конфігурації мережі посилюють цю роз'єднаність, оскільки справний окремий захисний пристрій не компенсує неактуальної схеми, порушеної селективності чи неврахованого резервного джерела.

Наслідки відмови до того ж виходять за межі робочого місця. Утрата живлення вентиляції тваринницького приміщення, насосів, холодильних установок або біогазового комплексу створює вторинну загрозу для працівників, тварин, продукції, довкілля та населення поблизу. Тому цивільний захист на аграрному підприємстві має охоплювати безпечне завершення технологічного процесу, оповіщення, автономне живлення критичних функцій і послідовність відновлення.

Міжнародна нормативна база пропонує для розв'язання цих завдань різнорівневі інструменти: стандарти систем управління охороною праці, вимоги до електроустановок сільськогосподарських приміщень, правила безпечного виконання робіт в електроустановках, вимоги до безпеки машин і робочого обладнання. Проте ці документи розроблено для різних правових систем і з різним рівнем деталізації, тому їх пряме перенесення в практику українських аграрних підприємств без функціонального зіставлення неможливе. Це спрямовує увагу на наукові праці, у яких досліджено окремі складники такого зіставлення.

Серед чинників результативності інженерно-технічних заходів дослідники виокремлюють підготовку персоналу. Результати дослідження Ф. Сгуайзера та співавторів *(Sguaizer et al., 2025)* засвідчили, що вік працівників виноградарських підприємств знижує інтенсивність використання цифрових пристроїв, але не впливає на їхню зацікавленість у цифровому навчанні з безпеки праці. Отримані дані обґрунтовують поєднання інженерних заходів із професійною підготовкою, зміст якої відповідає характеру робіт, рівню цифрової компетентності та наявним ризикам. Водночас навчання персоналу результативне лише за умови врахування системних взаємозв'язків між організацією праці, станом обладнання та зовнішніми чинниками.

Системний характер формування небезпечних подій розкрито в дослідженні П. Россі, Ф. Каффаро та М. Чеккіні *(Rossi et al., 2025)*. На основі методу аналізу функціонального резонансу (Functional Resonance Analysis Method, FRAM) автори показали, що небезпечний результат механізованих робіт виникає внаслідок взаємодії варіативності технологічних операцій, технічного стану обладнання,

погодних умов, ресурсних обмежень і часового тиску. Для енергоустановок це означає, що відмова системи захисту часто є завершальною ланкою причинного ланцюга, який охоплює несвоєчасне технічне обслуговування, перегрівання, хибний сигнал і запізніле відключення. Отже, аналіз безпеки має охоплювати не лише кінцеву подію, а й поступове зниження надійності попередніх рівнів захисту.

Перехід від системного аналізу до практичного запобігання аваріям потребує технічних засобів, здатних своєчасно виявляти небезпеку й припиняти роботу обладнання. Працездатність прототипу радіочастотної системи, що надсилає сигнал аварійного зупинення сільськогосподарської машини, експериментально підтвердили Ф. Чакон та співавтори *(Chacón et al., 2025)*. Можливості розширення такого контролю за допомогою бездротових сенсорних мереж систематизували С. Садегі, Н. Солтанмохаммадлу та Ф. Насірзаде *(Sadeghi et al., 2022)*, згрупувавши технології за трьома напрямами: визначення місцеперебування працівників, контроль їхніх фізіологічних показників і моніторинг виробничого середовища. Хоча це дослідження стосується підземних гірничих виробок, принцип розподіленого контролю придатний для зерносховищ, насосних станцій, біогазових установок і віддалених електрощитових. Однак датчики забезпечують належний рівень захисту лише за умови їх інтегрування в регламентовану процедуру реагування з визначеними алгоритмами опрацювання сигналів і прийняття рішень.

Подальший розвиток цифрового контролю пов’язаний із програмними засобами попереднього оцінювання ризиків і автоматизованим розпізнаванням небезпек. Для документованого попереднього оцінювання ризиків застосування пестицидів у сільському господарстві Ф. М. Рубіно та співавтори *(Rubino et al., 2025)* розробили прототип програмного засобу Sicurpest. Можливості машинного аналізу виробничих ситуацій дослідили С. Р. С. Чівідіно та співавтори *(Cividino et al., 2025)*: під час зіставлення експертного й машинного розпізнавання небезпек на 203 зображеннях із 50 виноградників Північної Італії значення зваженого коефіцієнта κ Коена становило 0,94–0,96, однак у складних сценах із сільськогосподарською технікою зберігалися хибнонегативні висновки. З огляду на це цифрові інструменти мають підтримувати професійне технічне рішення, але не замінювати його, особливо коли результати оцінювання визначають допуск працівника до виконання робіт.

Цифровізація контролю створює також передумови для поетапної модернізації наявного обладнання. У систематичному огляді Д. Ясперта, М. Ебеля, А. Екгардта та Й. Пеппельбуса *(Jaspert et al., 2021)* інтелектуальне дооснащення (smart retrofitting) визначено як ресурсоефективне оснащення чинного обладнання датчиками, програмним забезпеченням і засобами мережевого зв’язку без повної заміни машин. Проте технічне переоснащення саме по собі не гарантує результативного контролю: за висновками О. Суруджу, С. А. Гадсдена та Дж. Йоні *(Surucu et al., 2023)*, ефективність моніторингу технічного стану (condition monitoring) залежить від способу опрацювання даних, обґрунтованості вибору аналітичної моделі та врахування виробничих обмежень. Розвиваючи цей підхід, А. Тернбулл і Дж. Керролл *(Turnbull & Carroll, 2021)* обґрунтовують потребу оцінювати не лише діагностичну результативність, а й витрати та економічну доцільність упровадження моніторингу. Сукупність цих положень підтверджує доцільність поетапної модернізації аграрних підприємств з урахуванням вартості життєвого циклу обладнання, критичності об’єкта й доступності технічного обслуговування.

Проаналізовані дослідження застосовують різнорідні показники: надійність спрацювання систем захисту, сприйняття цифрового навчання, функціональну мінливість, точність розпізнавання небезпек і витрати на впровадження технологій. Для служби охорони праці ці показники доцільно інтегрувати в систему випереджувальних індикаторів, яка охоплює готовність засобів захисту, своєчасність реагування, повноту реєстрації подій, можливість відтворення причинного ланцюга та вартість підтримання технічного рішення. Однак механізм узгодження таких індикаторів із міжнародними вимогами та українськими нормативними процедурами в наукових працях не розкрито.

Отже, у наукових дослідженнях ґрунтовно висвітлено окремі аспекти безпеки аграрного виробництва: виробничий травматизм, ризики експлуатації машин, сенсорний моніторинг, цифрове навчання персоналу, вибухонебезпечність біогазових установок і програмні засоби оцінювання ризиків. Проте їхні результати не формують цілісної процедури адаптації міжнародних вимог до умов експлуатації енергоустановок аграрних підприємств, у яких електричні, пожежні, вибухові, механічні та організаційні ризики утворюють взаємопов’язані причинні ланцюги. Не визначено, які положення міжнародних документів можуть доповнити українську нормативну базу, які інженерно-технічні заходи можна впровадити без повної заміни обладнання, як інтегрувати моніторинг з аварійним

реагуванням і цивільним захистом та як використовувати результати аналізу інцидентів для коригування технічного обслуговування. Ця наукова прогалина зумовлює потребу в наскрізній процедурі, яка пов'язує стан обладнання, дії працівника, виробниче середовище й аварійне реагування та переводить нормативні вимоги в послідовність від ідентифікації небезпеки до реєстрації відхилення, аналізу події й коригування регламенту обслуговування.

**Мета дослідження** – розроблення інтегрованої моделі безпеки енергоустановок аграрного підприємства на основі порівняння міжнародних та українських нормативних підходів. Досягнення мети передбачало систематизацію вимог міжнародних і європейських документів з охорони праці, електро- та пожежної безпеки, установлення критеріїв їх зіставлення з українськими нормативними вимогами, визначення основних категорій ризиків, оцінювання застосовності й ресурсомісткості заходів, а також формування узгодженої послідовності управлінських, інженерно-технічних, моніторингових заходів і дій з аварійного реагування.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Об'єктом дослідження є процеси забезпечення охорони праці, електро- та пожежної безпеки й цивільного захисту під час експлуатації енергоустановок аграрних підприємств, предметом – нормативні підходи та інженерно-технічні заходи управління ризиками.

Джерельну базу сформовано з 21 джерела: 12 наукових і прикладних публікацій та 9 нормативних документів. Наукові публікації стосуються травматизму, ризиків експлуатації машин, сенсорного моніторингу, цифрового навчання, аварійності біогазових установок і програмних засобів оцінювання ризиків; їхні реквізити та індексацію в Scopus та/або Web of Science перевірено за офіційними сторінками видань і базами даних станом на 20 липня 2026 року. Нормативний корпус охоплює рівні системи управління охороною праці, вимог до електроустановок, безпечного виконання електроробіт, безпеки машин і робочого обладнання та національних правил. До нього ввійшли стандарт систем управління охороною праці ISO 45001:2018 *(International Organization for Standardization [ISO], 2018)* і поправка до нього ISO 45001:2018/Amd 1:2024 *(ISO, 2024)*, стандарт на електроустановки сільськогосподарських і садівничих приміщень IEC 60364-7-705:2006 *(International Electrotechnical Commission [IEC], 2006)*, стандарт з електробезпеки на робочому місці NFPA 70E:2024 *(National Fire Protection Association [NFPA], 2024)*, вимоги Управління з охорони праці США до електроустановок і до робіт з виробництва, передавання та розподілу електроенергії OSHA 29 CFR 1910 *(Occupational Safety and Health Administration [OSHA], n.d.)*, настанови Міжнародної організації праці ILO-OSH 2001 *(International Labour Organization [ILO], 2001)*, Директива 2009/104/ЕС щодо безпечного використання робочого обладнання *(Directive 2009/104/EC, 2009)*, Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів НПАОП 40.1-1.21-98 *(Держнаглядохоронпраці, 1998)* та стандарт з безпеки машин ISO 12100:2010 *(ISO, 2010)*.

Дослідження виконано за допомогою порівняльного контент-аналізу, структурно-функціонального аналізу та нормативного моделювання. Контент-аналіз застосовано для функціонального кодування восьми базових нормативних документів; поправку ISO 45001:2018/Amd 1:2024 проаналізовано окремо як доповнення до ISO 45001:2018, тому самостійно за індексом $I$ її не оцінювали. Кожний документ закодовано за п'ятьма рівноваговими критеріями (вага кожного 0,20): галузева релевантність, інженерна конкретність, організаційні процедури, моніторинг і зворотний зв'язок, аварійне реагування та цивільний захист. Рівень виконання критерію визначали так: 0 – функція відсутня; 1 – наявна загальна або часткова вимога, що потребує галузевої конкретизації; 2 – функцію прямо регламентовано через конкретні процедури, засоби чи документовані дії. Однакові ваги обрано тому, що модель оцінює широту функціонального охоплення, а емпіричних підстав для переваги одного з критеріїв не встановлено. Ступінь охоплення функцій безпеки визначали за авторським індексом:

$$I = (\Sigma b_i / 10) \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $I$ – індекс функціонального охоплення документа, %; $b_i$ – бал за $i$-м критерієм, $i$ = 1, …, 5; 10 – максимально можлива сума балів.

Індекс *I* характеризує лише повноту функціонального охоплення, а не юридичну силу чи загальну якість документа. Кодування виконано у два етапи: спочатку зафіксовано прямі вимоги кожного документа, далі їх об'єднано в наскрізний процес від реєстру обладнання до коригувальної дії. Структурно-функціональний аналіз застосовано до системи «обладнання – працівник – виробниче середовище – аварійне реагування», а нормативне моделювання – для перетворення зіставлених вимог на узгоджену послідовність управлінських, технічних і аварійних дій, розподілених за базовим, проміжним і цифровим рівнями ресурсомісткості.

Ризики ранжовано за числом пріоритетності ризику (Risk Priority Number, RPN):

$$\mathrm{RPN} = P \cdot S \cdot D, \tag{2}$$

де $P$ – бал імовірності виникнення небезпечної події; $S$ – бал тяжкості наслідків; $D$ – бал можливості виявлення.

Опорні рівні шкал $P$, $S$ і $D$ наведено в **табл. 1**. Проміжні бали 2 і 4 присвоюють станам, що займають проміжне положення між сусідніми опорними рівнями.

**Таблиця 1 – Шкали оцінювання складників числа пріоритетності ризику**

| Бал | $P$ – імовірність виникнення | $S$ – тяжкість наслідків | $D$ – можливість виявлення |
|---|---|---|---|
| 1 | подія практично не очікується | незначний збій без травмування | автоматичне раннє виявлення |
| 3 | подія можлива за періодичних відхилень | травма з утратою працездатності або суттєвий простій | виявлення під час огляду |
| 5 | подія повторюється або вже фіксувалася | загибель, групове ураження або наслідки за межами об'єкта | прихований дефект, що проявляється лише під час аварії |

Шкали побудовано так, що вищий бал за кожним складником відповідає гіршому стану, тому максимальне значення RPN = 125 описує подію, яка повторюється, має найтяжчі наслідки й залишається прихованою до аварії. Інтервали значень RPN 1–20, 21–40, 41–75 і 76–125 застосовано відповідно як низький, помірний, високий і критичний пріоритет внутрішньої модернізації. Алгоритм дослідження охоплював чотири етапи: формування корпусу джерел і перевірку їхніх реквізитів; функціональне кодування документів і розрахунок індексу $I$ за формулою (1); ідентифікацію та ранжування ризиків за формулою (2); нормативне моделювання інтегрованого циклу безпеки з визначенням рівнів упровадження та показників моніторингу.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Порівняльне кодування восьми базових нормативних документів засвідчило, що жоден із них окремо не охоплює повного циклу безпеки аграрної енергоустановки. Документи розподіляються за функціональними ролями. ISO 45001:2018 та ILO-OSH 2001 формують управлінську рамку, а поправка ISO 45001:2018/Amd 1:2024 вимагає визначати, чи є зміна клімату суттєвим чинником для системи управління охороною праці. IEC 60364-7-705:2006 деталізує вимоги до електроустановок сільськогосподарських приміщень, NFPA 70E:2024 та OSHA 29 CFR 1910 регламентують безпечне виконання робіт в електроустановках, зокрема захист від електричної дуги. Директива 2009/104/ЕС установлює вимоги до добору, перевірок, технічного обслуговування й безпечного використання робочого обладнання, ISO 12100:2010 – методологію ідентифікації небезпек, оцінювання й зниження ризику на етапах життєвого циклу машин, а НПАОП 40.1-1.21-98 регламентує допуск персоналу, зняття напруги, заземлення й організацію робочого місця. Результати кодування *(Directive 2009/104/EC, 2009; IEC, 2006; ILO, 2001; ISO, 2010, 2018, 2024; NFPA, 2024; OSHA, n.d.; Держнаглядохоронпраці, 1998)* наведено в **табл. 2**.

**Таблиця 2 – Порівняльна характеристика нормативних підходів до безпеки енергоустановок**

| Документ | Основний внесок | Прогалина / умови адаптації | Ресурсо-місткість | *I*, % |
|---|---|---|---|---|
| ISO 45001:2018 | Ризик-орієнтована система управління охороною праці, відповідальність керівництва, участь працівників, аудит і постійне поліпшення | Для сільського господарства потребує конкретизації галузевих небезпек, процедур технічного обслуговування, електробезпеки й аварійного реагування | низька–середня | 70 |
| ISO 45001:2018/ Amd 1:2024 | Урахування зміни клімату як чинника системи управління охороною праці | Застосовується разом з ISO 45001:2018 і не замінює базових вимог стандарту | низька | – |
| IEC 60364-7-705:2006 | Вимоги до електроустановок сільськогосподарських приміщень, захист у вологому, запиленому й корозійному середовищі | Обмежено охоплює організаційний аналіз інцидентів і цивільний захист | середня | 70 |
| NFPA 70E:2024 | Оцінювання ризиків ураження струмом і дугового спалаху, електрично безпечний стан, межі наближення, засоби захисту | Потребує розрахунків енергії дуги, навчання персоналу та оновлення комутаційних даних | середня–висока | 80 |
| OSHA 29 CFR 1910 | Конструктивна безпечність електроустановок, безпечні методи роботи, знеструмлення, кваліфікація персоналу, спеціальні системи | Необхідна правова й термінологічна адаптація до українських процедур | середня | 70 |
| ILO-OSH 2001 | Політика, організація, планування й упровадження, оцінювання, дії з поліпшення | Не визначає параметрів електричного захисту та вибухозахищеного обладнання | низька | 80 |
| Директива 2009/104/ЕС | Придатність обладнання, огородження, аварійна зупинка, перевірки, технічне обслуговування, інформування працівників | Потребує галузевої деталізації для енергоустановок, пилу, газу й резервного живлення | середня | 80 |
| ISO 12100:2010 | Ідентифікація небезпек, оцінювання та зниження ризику на етапах життєвого циклу машин | Потребує конкретизації електричних, дугових і вибухових ризиків та цивільного захисту | низька–середня | 70 |
| НПАОП 40.1-1.21-98 | Допуск, нарядна система, зняття напруги, заземлення, огородження, організація робочого місця | Недостатньо інтегровані безперервний моніторинг, аналіз near-miss подій, цифрова простежуваність і цивільний захист | низька–середня | 60 |

Примітка: *I* – індекс функціонального охоплення, розрахований за формулою (1); для ISO 45001:2018/Amd 1:2024 індекс не розраховували, оскільки поправку аналізували разом з ISO 45001:2018.

Найвище значення *I* = 80% отримали NFPA 70E:2024, ILO-OSH 2001 та Директива 2009/104/ЕС: кожний із цих документів охоплює чотири з п’яти функціональних елементів моделі. Повне кодування NFPA 70E:2024 дає 2 бали за галузеву релевантність, 2 – за інженерну конкретність, 2 – за організаційні процедури, 1 – за моніторинг і зворотний зв’язок та 1 – за аварійне реагування й цивільний захист; сума 8 балів за формулою (1) відповідає *I* = 80%, що забезпечує можливість незалежної перевірки результату. Значення 70% для ISO 45001:2018, IEC 60364-7-705:2006, OSHA 29 CFR 1910 та ISO 12100:2010 відображає поєднання повної регламентації одних функцій із загальним характером інших: зокрема, ISO 12100:2010 посилює ризик-орієнтовану логіку, проте потребує електротехнічної та галузевої конкретизації. Найнижче значення 60% має НПАОП 40.1-1.21-98 через обмежене представлення безперервного моніторингу, аналізу подій, що могли перерости в аварію (near-miss), і цивільного захисту. Водночас індекс не є рейтингом нормативної якості: вузькоспеціалізований документ може мати нижчий показник, залишаючись обов’язковим і технічно незамінним у власній сфері.

Зіставлення вимог дало змогу систематизувати ризики енергоустановок аграрного підприємства за п’ятьма групами. Електротехнічні ризики охоплюють контакт зі струмовідними частинами, пошкодження ізоляції, струми витоку, дефекти заземлення, перенапруги, дуговий спалах і помилкове повторне подання напруги. Пожежно-вибухові сценарії пов’язані з перегріванням обладнання, коротким замиканням, займанням пилу, газу чи пального та відмовою вентиляції. Механічні ризики зумовлені раптовим пуском обладнання, рухомими частинами й руйнуванням приводів, середовищні – впливом вологи, пилу, аміаку, температурних коливань і грозових явищ. Організаційними передумовами ризиків є неактуальні схеми, недостатня кількість компетентного персоналу, неузгоджене виконання підрядних робіт і несвоєчасне технічне обслуговування.

Вихідним елементом розробленої моделі є реєстр обладнання, у якому для кожного активу зазначено місце розташування, напругу, навантаження, категорію середовища, критичність технологічного процесу, дату перевірки, стан захисних пристроїв і резервного живлення. Для кожного активу формують сценарій за схемою «джерело енергії – небезпечна подія – уразливий об’єкт – наслідок – наявний захисний захід – додатковий захід», що поєднує захист працівників зі стійкістю технологічного процесу й створює підґрунтя для розрахунку RPN за формулою (2). Так, приховане нагрівання контакту, оцінене балами *P* = 3, *S* = 4 і *D* = 4, має RPN = 48, що відповідає високому пріоритету модернізації: подія можлива за періодичних відхилень, її наслідки наближаються до найтяжчих, а виявити її під час звичайного огляду складно.

Інтегровану модель побудовано як замкнений цикл із дев’яти етапів (**рис. 1**), зміст якого узагальнює вимоги до планування й поліпшення системи управління охороною праці, безпечних методів роботи, перевірок робочого обладнання та організації робіт в електроустановках *(Directive 2009/104/EC, 2009; ISO, 2018; OSHA, n.d.; Держнаглядохоронпраці, 1998)*.

Модель поєднує три функціональні частини. Управлінська частина визначає відповідальність, участь працівників, керування змінами, перевірку та оцінювання результативності: підключення генератора, встановлення частотного перетворювача, переміщення мобільної сушарки чи залучення підрядника автоматично запускають перегляд схеми живлення, оцінки ризику, інструкції та аварійного плану. Технічна частина забезпечує ієрархію захисних рубежів, а оперативно-аварійна пов’язує кожний сигнал із конкретною дією, строком виконання та відповідальною особою. Для критичних установок визначають умови автоматичного й ручного зупинення, безпечний стан, межі небезпечної зони, порядок евакуації, відповідальних осіб, канали оповіщення, автономне живлення та послідовність відновлення; для біогазу, холодоагентів і зернового пилу сценарій додатково охоплює вторинний вибух, токсичний викид і поширення наслідків за межі приміщення.




**Рис. 1 –** Інтегрована модель безпеки енергоустановок аграрного підприємства

Замкнений зворотний зв'язок полягає в поверненні до реєстру небезпек результатів перевірок, відхилень, спрацювань захисту, подій, що могли перерости в аварію, та самих аварій. Повторне відхилення підвищує пріоритет модернізації, змінює інтервал контролю або критерій непридатності, тому інцидент використовують не лише для звітності, а й для перегляду технічних і організаційних захисних елементів. Упровадження моделі диференційовано за трьома рівнями ресурсомісткості (**табл. 3**).

**Таблиця 3 – Рівні впровадження інтегрованої моделі безпеки**

| Рівень | Зміст заходів |
|---|---|
| Базовий | Актуальні схеми, належне маркування та огородження, перевірка заземлення й пристроїв захисного вимкнення, блокування повторного пуску, локальні аварійні вимикачі, процедура блокування та маркування джерел енергії (lockout/tagout, LOTO), чітке розмежування відповідальності |
| Проміжний | Забезпечення селективності спрацювання захисних пристроїв, термографічне обстеження, контроль стану ізоляції, температури, вібрації, газу, диму, пилу, рівня й тиску, автоматичне зупинення процесів, функціонування яких залежить від вентиляції |
| Цифровий | Інтегрування сигналів у єдиний журнал подій із визначеними пороговими значеннями, підтвердженням реагування та збереженням історії коригувань |

Послідовність рівнів дає змогу першочергово усунути організаційні й технічні прогалини без значних інвестицій, а сенсорний контроль спрямувати на вузли, де раннє виявлення зменшує ризик великої аварії або тривалого простою. Неінвазивне дооснащення доцільне, якщо обладнання залишається працездатним, але не забезпечує належної діагностичної інформативності: зовнішні датчики струму, температури чи вібрації встановлюють без внесення змін до основного контролера. Щоб дооснащення не створювало нових ризиків, воно передбачає перевірку достовірності даних, резервування критично важливих сигналів, збереження локального аварійного вимкнення, контроль доступу, журналювання змін конфігурації та безпечний режим роботи в разі втрати зв'язку. Для малих господарств достатні електронний реєстр, мобільна фотофіксація та локальні датчики, для великих комплексів – центральне диспетчерське керування, резервування каналів, розмежування прав доступу, синхронізація часу, зберігання даних і аналіз тенденцій. Незмінною вимогою для обох масштабів є простежуваність: за кожним сигналом мають бути встановлені одержувач, рішення, час реакції та підтвердження відновлення безпечного стану.

Отримані результати узгоджуються з попередніми дослідженнями й водночас розширюють їх. У дослідженні Ф. Де Лео та співавторів *(De Leo et al., 2023)* доведено, що відомості про інциденти можна перетворювати на профілактичні рішення. Запропонована модель розвиває цей висновок, оскільки фіксує не лише підсумкову подію, а й деградацію конкретних захисних елементів: прострочену перевірку, нестабільний сигнал, повторне перевантаження або невідповідність схеми фактичній конфігурації. Завдяки цьому аналіз події безпосередньо пов'язується зі зміною регламенту обслуговування. Включення вторинного вибуху до сценаріїв для біогазових установок відповідає даним Х. Хегазі та співавторів *(Hegazy et al., 2024)* про переважання вибухів серед аварій на таких об'єктах.

Порівняно з FRAM-моделлю П. Россі та співавторів *(Rossi et al., 2025)* запропонований підхід менш детально описує поведінкову мінливість, проте переводить її в перевірювані технічні дії. Так, часовий тиск під час сезонних робіт може зумовлювати відкладене обслуговування або обхід блокування, після чого модель призначає зміну регламенту, резервування, заборону пуску чи автоматичне журналювання.

Щодо цифрових засобів результати збігаються з висновками попередніх праць за однієї умови. Радіочастотні засоби аварійного зупинення, бездротові датчики та рішення з інтелектуального дооснащення *(Chacón et al., 2025; Jaspert et al., 2021; Sadeghi et al., 2022)* набувають профілактичної цінності лише в межах чітко встановленої процедури, у якій визначено одержувача сигналу, аварійний поріг, допустимий час реакції, умови блокування та місце зберігання запису. Такий підхід узгоджується з висновками С. Р. С. Чівідіно та співавторів *(Cividino et al., 2025)* щодо необхідності експертного контролю хибнонегативних машинних рішень: автоматична класифікація не скасовує обов'язкової перевірки чи дозволу компетентної особи. Відмінність запропонованої моделі від проаналізованих праць полягає в тому, що вона поєднує в одному циклі нормативні вимоги, інженерні засоби, моніторинг, аварійне реагування й цивільний захист, тоді як у попередніх дослідженнях ці складники розглянуто окремо.

Практичне значення моделі полягає в можливості її застосування у формі внутрішнього стандарту підприємства, контрольного переліку та дорожньої карти модернізації. Виробничу апробацію доцільно провести на зерносушарці, насосній станції та біогазовій установці, для чого визначено вимірювані показники з цільовими значеннями (**табл. 4**).

**Таблиця 4 – Показники моніторингу та цільові значення для пілотного впровадження моделі**

| Показник | Цільове значення |
|---|---|
| Частка обладнання, внесеного до реєстру й забезпеченого актуальними схемами | не менше ніж 95% |
| Частка регламентних перевірок, виконаних у встановлений термін | не менше ніж 90% |
| Доступність критично важливих сигналів | не менше ніж 95% |
| Медіанний час від сигналу тривоги до досягнення безпечного стану | скорочення щонайменше на 20% |
| Повторюваність однотипних подій, що могли перерости в аварію | зменшення на 25% |
| Частка коригувальних дій, закритих у встановлений термін | не менше ніж 90% |
| Простої та витрати впродовж життєвого циклу обладнання | оцінюють додатково |

Наведені значення є критеріями перевірки, а не доведеним ефектом моделі: вони задають рівень, за досягнення якого пілотне впровадження можна вважати результативним. Результати дослідження мають і обмеження. Дослідження не містило вимірювань на підприємствах, експертного узгодження ваг критеріїв чи економічного розрахунку для конкретного парку обладнання. Однакові ваги забезпечують прозорість первинного порівняння, однак їх необхідно перевірити методом експертного узгодження та аналізом чутливості, а пороги RPN – відкалібрувати за журналами подій конкретного підприємства.

Адаптація не передбачає механічного перенесення іноземних норм: необхідно враховувати правовий статус документа, кваліфікацію персоналу, доступність сертифікованого обладнання, технічного обслуговування й калібрування, стійкість зв'язку та ресурси аварійних служб. Першочергового впровадження потребують вузли з високим значенням RPN, у яких контрольований

параметр передує небезпечній події. Отже, модель обґрунтовано на нормативно-функціональному рівні, тоді як її вплив на травматизм, простої та витрати потребує тривалого польового спостереження.

## ВИСНОВКИ

Функціональне кодування восьми базових нормативних документів засвідчило, що жоден із них окремо не охоплює повного циклу безпеки аграрної енергоустановки, а значення індексу функціонального охоплення становлять від 60 до 80%. Управлінські стандарти задають цикл відповідальності й поліпшення, електротехнічні документи конкретизують захист і безпечне виконання робіт, а вимоги до машин і робочого обладнання охоплюють оцінювання ризику, перевірки та аварійні пристрої, тому ці документи доцільно застосовувати у взаємодоповненні.

Основною прогалиною української практики є слабкий зв'язок докладно регламентованих базових процедур електробезпеки з постійним моніторингом, кількісним ранжуванням ризиків, аналізом передумов інцидентів і цивільним захистом. Індекс функціонального охоплення відображає лише широту регламентації функцій і не є рейтингом юридичної сили чи технічної якості документів.

Наукова новизна полягає в розробленні інтегрованої моделі безпеки, яка адаптує міжнародні вимоги до управління електротехнічними, пожежно-вибуховими, механічними, середовищними й організаційними ризиками аграрних енергоустановок і поєднує в замкненому циклі реєстр обладнання, сценарну ідентифікацію небезпек, пріоритизацію за числом пріоритетності ризику, інженерні й організаційні заходи, моніторинг, аварійне реагування, аналіз подій і коригувальні дії. Зворотний зв'язок забезпечує перегляд регламентів і пріоритетів модернізації відповідно до фактичних відхилень.

Практичне значення визначають два результати: диференціація впровадження за базовим, проміжним і цифровим рівнями, яка дає змогу спершу усунути організаційні й технічні прогалини, а сенсорний контроль спрямувати на критичні вузли, та система вимірюваних показників із цільовими значеннями для пілотного впровадження. Модель придатна до застосування у формі внутрішнього стандарту, контрольного переліку та дорожньої карти модернізації.

Подальша валідація моделі передбачає її пілотне впровадження на підприємствах різного масштабу з експертним узгодженням ваг критеріїв, калібруванням порогів пріоритетності та оцінюванням динаміки травматизму, простоїв і витрат упродовж життєвого циклу обладнання.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Chacón, F., Cubero-Atienza, A. J., Vázquez, F., Garrido, J., & Ruz, M. L. (2025). Accident prevention in agricultural machinery using radiofrequency technology: A prototype application to olive net collectors. *Safety Science*, *188*, Article 106875. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106875

Cividino, S. R. S., Cappelli, A., Belluco, P., Rinaldi, F., Avramovic, L., & Zaninelli, M. (2025). Preliminary study of vision-based artificial intelligence application to evaluate occupational risks in viticulture. *Sensors*, *25*(21), Article 6749. https://doi.org/10.3390/s25216749

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), Article 12585. https://doi.org/10.3390/su151612585

Directive 2009/104/EC of the European Parliament and of the Council of 16 September 2009 concerning the minimum safety and health requirements for the use of work equipment by workers at work (second individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) (codified version). (2009). *Official Journal of the European Union*, *L 260*, 5–19. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/104/oj

Di Stefano, V., Cecchini, M., Riccioni, S., Di Domenico, G., & Bianchini, L. (2025). Exposure to noise from agricultural machinery: Risk assessment of agricultural workers in Italy. *AgriEngineering*, *7*(3), Article 87. https://doi.org/10.3390/agriengineering7030087

Hegazy, H., Saady, N. M. C., Khan, F., Zendehboudi, S., & Albayati, T. M. (2024). Biogas plants accidents: Analyzing occurrence, severity, and associations between 1990 and 2023. *Safety Science*, *177*, Article 106597. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106597

International Electrotechnical Commission. (2006). *Low-voltage electrical installations – Part 7-705: Requirements for special installations or locations – Agricultural and horticultural premises* (IEC Standard No. 60364-7-705:2006). https://webstore.iec.ch/publication/1892

International Labour Organization. (2001). *Guidelines on occupational safety and health management systems: ILO-OSH 2001*. Geneva: International Labour Office. https://www.ilo.org/publications/guidelines-occupational-safety-and-health-management-systems-ilo-osh-2001

International Organization for Standardization. (2010). *Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction* (ISO Standard No. 12100:2010). https://www.iso.org/standard/51528.html

International Organization for Standardization. (2018). *Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use* (ISO Standard No. 45001:2018). https://www.iso.org/standard/63787.html

International Organization for Standardization. (2024). *Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use – Amendment 1: Climate action changes* (ISO Standard No. 45001:2018/Amd 1:2024). https://www.iso.org/standard/88428.html

Jaspert, D., Ebel, M., Eckhardt, A., & Poeppelbuss, J. (2021). Smart retrofitting in manufacturing: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, *312*, Article 127555. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127555

National Fire Protection Association. (2024). *Standard for electrical safety in the workplace* (NFPA Standard No. 70E:2024). https://www.nfpa.org/product/nfpa-70e-standard-for-electrical-safety-in-the-workplace/p0070ecode

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). *Occupational safety and health standards (29 CFR Part 1910): Subpart S – Electrical; Subpart R, § 1910.269 – Electric power generation, transmission, and distribution*. Retrieved September 24, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910TableofContents

Rossi, P., Caffaro, F., & Cecchini, M. (2025). FRAM-based safety culture model for the analysis of socio-technical and environmental variability in mechanised agricultural activities. *Safety*, *11*(3), Article 80. https://doi.org/10.3390/safety11030080

Rubino, F. M., Puri, D., Fargnoli, M., Lombardi, M., Mandić-Rajčević, S., & Colosio, C. (2025). Sicurpest: A prototype of a user-friendly tool for preventive risk assessment of pesticide use in agriculture. *Toxics*, *13*(2), Article 89. https://doi.org/10.3390/toxics13020089

Sadeghi, S., Soltanmohammadlou, N., & Nasirzadeh, F. (2022). Applications of wireless sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines. *Journal of Safety Research*, *83*, 8–25. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.07.016

Sguaizer, F., Vigoroso, L., Micheletti Cremasco, M., & Caffaro, F. (2025). Perceived working conditions and intention to adopt digital safety training in high-risk productive sectors: An exploratory study in manufacturing and agriculture in Northwest Italy. *Safety*, *11*(2), Article 51. https://doi.org/10.3390/safety11020051

Surucu, O., Gadsden, S. A., & Yawney, J. (2023). Condition monitoring using machine learning: A review of theory, applications, and recent advances. *Expert Systems with Applications*, *221*, Article 119738. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119738

Turnbull, A., & Carroll, J. (2021). Cost benefit of implementing advanced monitoring and predictive maintenance strategies for offshore wind farms. *Energies*, *14*(16), Article 4922. https://doi.org/10.3390/en14164922

Державний комітет України по нагляду за охороною праці. (1998). *Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98)* [On approval of the Rules for the safe operation of consumer electrical installations (NPAOP 40.1-1.21-98)]: наказ від 09.01.1998 № 4, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10.02.1998 за № 93/2533. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98