

УДК 351.862:620.92:004.8(477)

[https://doi.org/10.36910/3083-6255/2\(2\).2025.70-82](https://doi.org/10.36910/3083-6255/2(2).2025.70-82)

В.М. Лобойченко
І.М. Хмиров
М.С. Соломчук

ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ В УМОВАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА ІНДУСТРІЇ 5.0: ВИКЛИКИ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ (КЕЙС МІКРОГРІДІВ)

Мета. Метою статті є визначити основні фактори небезпеки, що впливають на функціонування мікрогрідів для зменшення рівня цивільної небезпеки на цих підприємствах в межах України та запропонувати шляхи їх мінімізації.

Методи дослідження. У процесі дослідження використано: літературний аналіз, теоретичне дослідження наявної інформації, використання методів аналізу та синтезу, індукції та дедукції, систематизації та узагальнення, методи формальної логіки.

Результати. В роботі відзначено необхідність відходу від викопних ресурсів та переходу країн на використання відновлювальних джерел енергії в межах досягнення Цілей Сталого Розвитку, відмічено цифрову трансформацію суспільства та перехід до концепції Індустрії 5.0. Проаналізовано особливості структури мікрогрідів як одного з ключових підприємств відновлювальної енергетики в межах забезпечення сталого розвитку та Індустрії 5.0. Відмічено їх склад та особливості функціонування, в тому числі, й застосування штучного інтелекту при управлінні мікрогрідами. Висвітлено наявні проблеми (технічні, економічні, правові, кіберзагрози), а також потенціал для впровадження в енергосистему України.

Наукова новизна. За результатами роботи запропоновано та структуровано основні напрямки градації мікрогрідів, відзначено та проаналізовано основні фактори небезпеки при функціонуванні мікрогрідів різної конструкції, вперше окреслено градацію основних напрямків, за якими може спостерігатись підвищення рівня цивільної небезпеки при роботі мікрогрідів в межах України, що є науковою новизною дослідження.

Практична значимість. З урахуванням визначених факторів небезпеки запропоновано шляхи мінімізації рівня цивільної небезпеки що є практичним результатом даного дослідження. Своєчасна реалізація запропонованих заходів при впровадженні мікрогрідів в енергетичну систему України, як очікується, сприятиме її подальшому повоєнному відновленню та сталому розвитку в межах Індустрії 5.0. Отримані результати носять прикладний характер і стануть в нагоді широкому колу фахівців в сфері цивільного захисту, охорони праці, енергетики та захисту довкілля при розбудові та впровадженні мікрогрідів в енергетичну галузь України.

Ключові слова: мікрогрід, цивільна безпека, штучний інтелект, відновлювальна енергетика, захист довкілля, кіберзагроза.

Вступ.

В межах Цілей сталого розвитку, сформульованих Організацією Об'єднаних Націй у 2015 році, відзначається, серед іншого, перехід до доступної, стійкої та чистої енергії та всебічну боротьбу зі зміною клімату. До 2030 року держави-члени ООН зобов'язалися скоротити залежність від викопних джерел енергії та збільшити частку низьковуглецевих енергетичних рішень. Це виступає важливим кроком для мінімізації викидів вуглецю у навколишнє середовище та досягнення кліматичних цілей. Передбачається поступова відмова від використання традиційних викопних джерел - нафти, вугілля, природного газу, та перехід до чистіших, відновлюваних джерел енергії (сонячна, вітрова, гідроенергія, термальна енергія), що сприяють зниженню викидів парникових газів та сталому розвитку енергетичного сектора [1]. Декарбонізація

енергетики включає також відмову від вуглецевих джерел енергії (викопні джерела) та перехід на використання водню [2] або амміаку, який, в свою чергу, може виступати як носій водню або безпосередньо джерело енергії [3].

В межах підтримки Україною Цілей Сталого Розвитку Кабінет Міністрів [4] сформував завдання щодо досягнення Цілей сталого розвитку на період до 2030 року. Зокрема, для забезпечення «Цілі 7 “Доступна та чиста енергія”» виокремлено сім завдань що включають децентралізацію, декарбонізацію та раціоналізацію енергетичного забезпечення, його незалежність та рівність доступу, підвищення якості та безпеки енергопостачання, захист вразливих споживачів.

Відповідно, на сьогодні в світі активно відбувається розбудова відновлювальної

енергетики, що включає значні інвестиції та створення робочих місць [5]

Слід відмітити, що сучасний технологічний розвиток у промисловості та енергетиці як закономірний етап еволюції суспільства виступає чинником формування принципово нових систем, середовищ і галузей. Зокрема, розбудова цифрового простору та створення цифрових інструментів, технологій та програмних рішень стали причиною появи принципово нових, цифрових екосистем, що є характерними для окремих галузей, установ, підприємств та організацій. Їх використання у промисловій сфері зумовило формування концепції Індустрії 4.0, орієнтованої на автоматизацію і цифровізацію виробничих процесів [6]. В рамках цієї концепції активно застосовуються технології Інтернету речей (IoT, Internet of Things), штучного інтелекту (AI, Artificial Intellect), «розумних» систем (будівель, інфраструктури, технологічного обладнання), а також робототехнічні комплекси [7]. Ці рішення не лише підвищують економічну ефективність виробництва, а й відіграють важливу роль у забезпеченні промислової, пожежної, екологічної та цивільної безпеки. Як приклад реалізації принципів Індустрії 4.0 у промисловості можна навести використання мереж сенсорів, заснованих на різних фізичних та хімічних процесах, призначених для раннього виявлення та запобігання пожежам на об'єктах [8]. Застосування методів машинного навчання для виявлення відхилень у роботі таких сенсорів підвищує надійність функціонування безпекових систем у режимі реального часу. Впровадження адаптивних систем моніторингу з використанням IoT, нейронних мереж, технологій захоплення зображень та передачі даних через месенджери забезпечує оперативне виявлення загроз різної природи, сприяє підвищенню стану охорони праці на виробництві та безпечності виробничих процесів [9, 10, 11].

Подальший розвиток технологій призвів до формування концепції Індустрії 5.0, яка акцентує увагу не лише на технологічних аспектах (порівняно з Індустрією 4.0), а й на соціальних та екологічних факторах розвитку промисловості [12]. Індустрія 5.0 наголошує на співпраці між людьми та машинами та

забезпеченні сталого розвитку, що є відображенням переходу до більш персоналізованих та екологічно чистих виробничих процесів [13].

Таким чином, на сьогодні відбувається трансформація світової енергетичної галузі як складової забезпечення сталого розвитку суспільства та впровадження циркулярної економіки [14], і, в тому числі, пов'язана з необхідністю стійкого енергетичного забезпечення населення [15]

В умовах розробки та впровадження нових енергетичних та технічних рішень, в тому числі, й в межах впровадження концепції Індустрії 5.0 важливим елементом функціонування таких систем є забезпечення задовільного рівня цивільної безпеки, що включає запобігання впливів різноманітних небезпечних чинників, пов'язаних з роботою цих систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На сьогодні вже відомі, активно розбудовуються і впроваджуються технологічні енергетичні рішення, пов'язані з індивідуальним використанням сонячної, вітрової, водної енергії, енергії землі та океану [16]. Ці ресурси також використовуються для виробництва водню як альтернативного джерела енергії [17, 18], для забезпечення роботи промисловості, транспорту, побутових потреб [19].

Новим кроком щодо використання цих джерел стала концепція «мікрогридів» [20]. Мікрогрид представляє собою самодостатню енергетичну систему, що обслуговує певну географічну територію, підприємство, заклад, комплекс, район. Вони можуть бути використані для стаціонарних джерел (будівлі) та мобільних (електротранспорт). Їх масштаб може варіюватись від міністанції, що обслуговує будівлю до мегастанції, розрахованої на підтримку цілого району [21]. В мікрогрідах використовується один або кілька видів розподіленої енергії (сонячні панелі, вітряні турбіни, біогазові станції, генератори тощо), які забезпечують вироблення електроенергії. Вони також можуть включати системи зберігання енергії, як правило, акумуляторні батареї [22]. Принципова схема мікрогрида представлена на рис. 1. Мікрогриди можуть бути під'єднані до традиційних мереж (рис.1, А) або працювати в автономному режимі (рис.1, В).

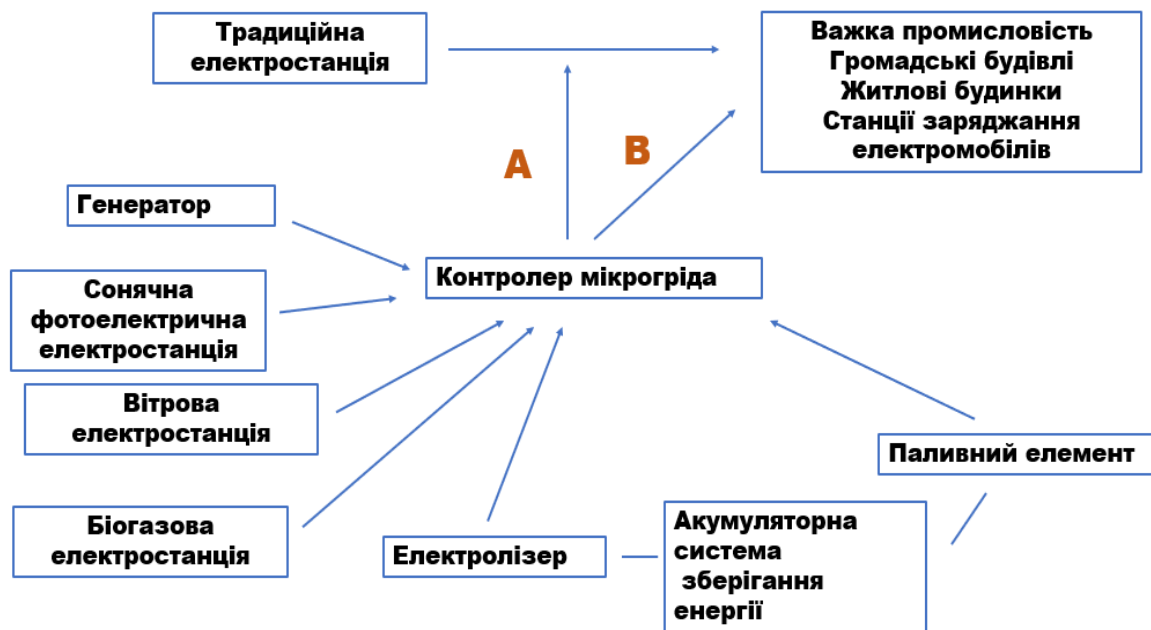


Рис. 1. Принципова схема мікрогріда. А – робота в мережевому форматі, В – робота в автономному режимі.

Модульність конструкції мікрогрідів, можливість регулювання та керування енергією, мінімізація витрат на її транспортування та близькість до кінцевого споживача зробили їх актуальними, насамперед, для віддалених сільськогосподарських районів [23]. Водночас, вони можуть бути способом забезпечення енергетичної автономії для окремих спільнот, районів та об'єктів [24]. Розвиток концепції мікрогрідів сприяв формуванню їх структури, технічного та програмного забезпечення, вивченню управління потоками енергії всередині цієї системи та дослідженню особливостей її взаємодії з об'єктом та іншими енергетичними системами.

Подальший розвиток та вдосконалення поняття «мікрогрід» з кількома джерелами енергії призвело до його трансформації у smart grids, де обов'язковим елементом мережі є також система інтелектуального управління [25]. Як наслідок, стала очевидною необхідність дослідження ієрархії керування, структури рівнів контролю та елементів керування в даних мікрогрідах [26].

Розвиток моделей глибокого навчання та штучного інтелекту також сприяв впровадженню цих інструментів в структуру

управління мікрогрідом [27, 28, 29], в тому числі, й для моніторингу й технічного обслуговування з застосуванням Інтернету речей [30].

Як вже відмічалось, мікрогріди можуть відрізнятися за принципом залученості до загальної енергетичної мережі або автономності (stand-alone system, off-grid system, islanded, isolated), за роботою (розподільні мережі постійного або змінного струму), за наявністю базових елементів (сонячні фотоелементи, вітрові турбіни, генератори, гідротурбіни, батареї зберігання, контролери, паливні елементи тощо) [31], за виробництвом одного або декількох видів енергії [32], за розташуванням (сухопутні або морські) [33]. Для дослідження роботи мікрогрідів використовуються різноманітні інструменти моделювання, прогнозування та оптимізації [34, 35], а також реальні проекти [36].

Для України, що має значні сільськогосподарські потужності, додатковим важливим елементом впровадження мікрогрідів є застосування біогазу або біовідходів як джерела енергії в їх функціонуванні [37].

В той же час, промислове впровадження мікрогрідів в електромережі держав поки знаходиться на початковому етапі. Цьому

сприяють декілька чинників. Зокрема, недосконалість законодавчого регулювання роботи мікрогридів на рівні держав (наприклад, в Україні), навіть тих, де структура відновлювальної енергетики досить розбудована [32, 38, 39], необхідність інвестування та стимулювання зеленої економіки, особливо на первинних етапах [36], необхідність враховувати кейсові ситуації (розмір, структуру, район розташування і т.п.) для мікрогрида [40].

Також, відмічаються можливі кіберзагрози в систему управління мікрогридом, враховуючи складний характер його функціонування [41, 42], розташування мікрогриду [43] та можливість внесення неправдивих даних в систему [44], в тому числі, щодо зовнішніх загроз [45], а також безпосередній вплив цих загроз (лісові пожежі) на діяльність сталої електромережі та мікрогридів [46]. При забезпеченні пожежної безпеки також необхідно враховувати особливості електропостачання для систем протипожежного захисту (постійний/перемінний струм) [47].

Однією з важливих лімітуючих характеристик мікрогридів, що знаходиться на етапі вирішення – це складність управління потоками енергії при використанні декількох джерел енергії. Враховуючи, що первинним джерелом енергії є природний чинник (сонце, вода, вітер тощо) та мають місце мінливість та сезонність кліматичних умов в деяких регіонах, то чітко визначити продуктивність цього джерела є складним завданням. Також наголошується на необхідності забезпечення надійного енергозабезпечення критичних об'єктів інфраструктури при використанні мікрогридів [48]. Аналізується особливість відновлення їх роботи при короткому замиканні [49], перенавантаженні [50] та після збоїв [51] та наголошується на необхідності точного прогнозування енергетичного навантаження на мікрогрид від споживачів [52].

Дослідження щодо безпеки експлуатації мікрогридів охоплює лише деякі показники (стабільність системи, енергоефективність, температуру системи, температуру навколишнього середовища) на прикладі мікрогрида з фіксованою структурою [53], хоча ці ж автори відмічають наявність досліджень за окремими складовими

мікрогридів (зберігання, трансформація енергії).

Серед інших обмежуючих чинників відмічається недостатня інформованість споживачів, складність технічного обслуговування та експлуатації, етичні та політичні й правові питання (наприклад, в частині застосування штучного інтелекту), джерела фінансування [54].

Військова агресія росії в 2022 р. додатково продемонструвала Україні та світові необхідність диверсифікації енергоджерел та забезпечення їхньої стійкої роботи в мережевому та автономному форматі, особливо в умовах неочікуваних, термінових та багаторазових відключень. В цьому аспекті безпечно впровадження та робота енергетичних систем, що здатні ефективно функціонувати як у централізованому, так і в автономному форматі, є критично важливим для населення та економіки країни.

Таким чином, можна відзначити, що, попри наявні обмеження, застосування мікрогридів в енергетичній системі України має значний потенціал в межах впровадження концепції Індустрії 5.0 та досягнення Цілей Сталого Розвитку. Відповідно, ці структури можуть розглядатись як важливий елемент енергетичної, екологічної, промислової та, загалом, цивільної безпеки нашої держави. Розуміння природи та особливостей потенційних небезпек, що можуть вплинути на функціонування мікрогридів дозволить забезпечити своєчасне реагування на них з боку відповідних структур. В цьому випадку актуальним питанням є дослідження чинників, що можуть вплинути на рівень цивільної безпеки в цій системі.

Мета статті (постановка завдання).

Враховуючи вищевказане, мета роботи: визначити основні фактори безпеки, що впливають на функціонування мікрогридів для зменшення рівня цивільної безпеки на цих підприємствах в межах України та запропонувати шляхи їх мінімізації.

Методи дослідження.

Методи дослідження: літературний аналіз, теоретичне дослідження наявної

інформації, використання методів аналізу та синтезу, індукції та дедукції, систематизації та узагальнення, методи формальної логіки.

Виклад основного матеріалу.

Враховуючи специфічну структуру, мікрогріди можна розглядати з декількох основних напрямків. Вони наведені нижче.

1. Матеріальний:

- Як фізичний об'єкт. В залежності від розмірів може бути розміщений на одній або декількох площах.

- Як складна структура. Може містити різні типи обладнання: сонячні панелі, вітряні турбіни, батареї, електролізери, контейнери для біовідходів, резервуар для зберігання газу (водень, аміак тощо).

- Як система управління даними та об'єктами (кількість обладнання, інформація на фізичних носіях тощо), що має складну ієрархію.

- За хімічним складом. Матеріал, що використаний при виробництві конструкцій (пластик, метал, деревина, небезпечний газ тощо).

2. Енергетичний:

- Як система передачі та зберігання енергії, що має складну структуру.

3 Антропогенний

- Як підприємство з певним штатом працівників і середовищем «роботодавць-робітників».

4. Інформаційний

- Як цифрова екосистема, що має складні внутрішні та зовнішні зв'язки при передачі інформації.

5. Екологічний:

- В залежності від рівня впливу на довкілля (наприклад, викиди, скиди, відходи, або вуглецевий слід), що певна діяльність або процес можуть чинити.

6. Економічний:

- Вартість безпосередня та опосередкована обладнання, процесів. Вартість електрики від окремих джерел енергії в мікрогріді та кінцева вартість електрики, експлуатаційні витрати тощо.

7. Безпековий:

- В залежності від рівня небезпеки, що може мати або чинити окремий процес, об'єкт, тощо, а також їх комплексний вплив.

Схематично запропонована градація мікрогрідів представлена на рис. 2. Слід враховувати, що вона не обмежена зазначеними напрямками та може також доповнюватись.

Матеріальний	Енергетичний	Антропогенний	Інформаційний	Екологічний	Економічний	Безпековий
• Фізичний об'єкт: розміщення на одній або декількох площах	Система передачі та зберігання енергії	Взаємодія:	Цифрова екосистема:	Вплив на довкілля:	Вартість:	Рівень небезпеки:
• Структура: сонячні панелі, турбіни, батареї, електролізери, контейнери, резервуари		Керівник-робітник	Складні внутрішні та зовнішні зв'язки при передачі інформації	Викиди, скиди, відходи	Обладнання та процесів	Процесів
• Система управління даними та об'єктами: кількість обладнання, інформація на фізичних носіях		Робітник-робітник	Інформаційні потоки	Вуглецевий слід	Електрики від окремих джерел енергії та кінцева вартість електрики	Об'єктів
• Хімічний склад: пластик, метал, деревина, небезпечний газ					Експлуатаційні витрати	Комплексний вплив

Рис. 2. Схематична градація мікрогріда за напрямками

Обговорення результатів.

Враховуючи вказану схематичну градацію мікрогріда за напрямками (рис. 2), можна відзначити такі основні потенційні

небезпеки, що вплинуть на його функціонування.

Також запропоновано потенційні шляхи їх вирішення (нівелювання) (Табл. 1).

Таблиця 1.

Потенційні небезпеки, що вплинуть на функціонування мікрогрида та потенційні шляхи їх вирішення (нівелювання)

Фактор небезпеки	Потенційний шлях вирішення (нівелювання)
Некоректність розташування об'єктів	Вирішується на етапі планування
Аварії та інциденти на об'єктах мікрогрида, пов'язані з пошкодженням обладнання	Коректне встановлення обладнання, профілактичні огляди обладнання, навчання персоналу, розробка чітких інструкцій з експлуатації обладнання та планів реагування на надзвичайні ситуації, впровадження системи моніторингу та раннього виявлення небезпек (пожежі, пошкодження, витіки небезпечних речовин) з застосуванням Інтернету речей на підприємстві та за навколишнім середовищем
Сбої в системі передачі даних та управлінні об'єктами	Навчання персоналу, автоматизація процесів, впровадження системи моніторингу з застосуванням Інтернету речей
Виток небезпечних речовин в довкілля (в результаті аварії обладнання, збоїв в системі, зовнішніми природними небезпеками, бойовими діями та терористичними атаками)	Навчання персоналу, розробка чітких інструкцій з експлуатації обладнання та планів реагування на надзвичайні ситуації різного характеру, впровадження системи моніторингу та раннього виявлення небезпек (пожежі, пошкодження, витіки небезпечних речовин) з застосуванням Інтернету речей на підприємстві та за навколишнім середовищем Використання екологічно дружніх та безпечних матеріалів, вторинне використання матеріалів
Робочі травми персоналу, ураження електричним струмом, професійні захворювання, перевтома, проблеми з ментальним здоров'ям	Навчання персоналу, профілактичні медичні огляди, створення здорового робочого середовища, розробка чітких інструкцій з експлуатації обладнання та планів реагування на надзвичайні ситуації
Некоректна передача інформації, енергетичні збої, внутрішні та зовнішні кіберзагрози	Застосування коректного програмного забезпечення, інструментів Штучного інтелекту, використання сертифікованого та ліцензованого програмного забезпечення, наявність чіткої регуляторної політики, застосування коректного обладнання, впровадження системи моніторингу та раннього виявлення небезпек (пожежі, пошкодження, витіки небезпечних речовин) з застосуванням Інтернету речей на підприємстві та за навколишнім середовищем
Фінансові втрати, висока вартість обслуговування та нерентабельність виробництва	Вирішується на етапі планування

Як видно з проведеного аналізу, важливими елементами мінімізації небезпек при роботі мікрогридів є коректна оцінка робіт на етапі планування, організаційно-технічні заходи та робота з персоналом, а також впровадження системи моніторингу та раннього виявлення небезпек (пожежі, пошкодження, витіки небезпечних речовин) з застосуванням Інтернету речей на підприємстві та за навколишнім середовищем.

Слід відмітити, що використання штучного інтелекту є допоміжним елементом управління та забезпечення цивільної безпеки при діяльності мікрогридів, але його застосування повинно бути контрольованим із дотриманням вимог чинного законодавства.

Висновки.

Таким чином, в роботі проведено аналіз сучасного стану щодо використання мікрогридів як потенційного джерела енергії

в межах концепції Індустрії 5.0 та сталого розвитку. Показано доцільність впровадження мікрогрідів в енергетичну структуру України в умовах сучасних викликів та загроз.

Запропоновано градацію мікрогріда за напрямками, що враховують діяльність персоналу, матеріальний, енергетичний, інформаційний, економічний, екологічний та безпековий характер об'єкта. Проаналізовано основні фактори небезпеки що можуть підвищити рівень цивільної небезпеки при роботі мікрогрідів в межах України, та запропоновано шляхи мінімізації цих небезпек.

Своєчасна реалізація запропонованих заходів при впровадженні мікрогрідів в енергетичну систему України, як очікується, сприятиме зниженню рівня цивільної небезпеки в державі та забезпечить її подальше повоєнне відновлення та сталий розвиток в межах Індустрії 5.0. Отримані результати стануть в нагоді широкому колу фахівців в сфері цивільного захисту, охорони праці, енергетики та захисту довкілля при розбудові та впровадженні мікрогрідів в енергетичну галузь України

Список літератури

1. Лобойченко В.М., Букарева О.В. Професійні ризики в системі управління безпекою праці при роботах на сучасних підприємствах енергетичної галузі. Збірник тез доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «OSHAgro – 2024». 30 вересня 2024 року. МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Науково-виробничий журнал «Охорона праці», Європейське співтовариство з охорони праці. Київ. 2024. С. 116 – 118.
2. Abbasian Hamedani, E., Alenabi, S. A., & Talebi, S. (2024). Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles. *Energy Reports*, 12, 3778–3794. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2024.09.030>
3. Loboichenko, V., Casado-Manzano M., , Navas S.J., Toharias B., , Felipe R., Iranzo A. Ammonia as energy source for solid oxide fuel cell technology, *Energy Reports*, 2025, 13, 5828–5847. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2025.05.020>
4. Кабінет Міністрів України. (2024, 29 листопада). *Деякі питання забезпечення досягнення Цілей сталого розвитку в Україні: Розпорядження № 1190-р.* База даних «Законодавство України». <https://zakon.rada.gov.ua/go/1190-2024-%D1%80>
5. *Renewable energy – powering a safer and prosperous future.* United Nations. from <https://www.un.org/hi/node/177543>
6. Лобойченко В.М. Сучасні технології в пожежогасінні як складова забезпечення промислової безпеки та охорони праці в концепції Індустрії 5.0. наук. праць V Всеукраїнської науково-практичної конференції викладачів та фахівців-практиків та XV Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, аспірантів та ад'юнктів. – Львів: ЛДУБЖД, 2025. С. 22-24.
7. Красношпапка А., Фокіна-Мезенцева К. Характеристика та аналіз особливостей трансформації від Індустрії 4.0 до Індустрії 5.0 та суспільства 5.0. *Молодий вчений*. 2025. № 1 (132). С. 177–183. URL: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2025-1-132-8> (дата звернення: 10.04.2025).
8. Energy-, Cost-, and Resource-Efficient IoT Hazard Detection System with Adaptive Monitoring / C. L. Kok et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 6. P. 1761. URL: <https://doi.org/10.3390/s25061761> (date of access: 12.04.2025).
9. Hybrid Machine Learning-Based Fault-Tolerant Sensor Data Fusion and Anomaly Detection for Fire Risk Mitigation in IIoT Environment / J. Desikan et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 7. P. 2146. URL: <https://doi.org/10.3390/s25072146>
10. C. L. Kok et al. Energy-, Cost-, and Resource-Efficient IoT Hazard Detection System with Adaptive Monitoring . *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 6. P. 1761. URL: <https://doi.org/10.3390/s25061761>
11. Biswas, A., & Roy, D. G. (2021). Metamorphosis of Industrial IoT using Deep Learning. In *Signals and communication technology* (pp. 1–30). https://doi.org/10.1007/978-981-16-6186-0_1
12. Зубкова А., Майгурова Д., Місюня Р. Управління проектами цифрової трансформації міжнародних підприємств: ключові відмінності індустрії 4.0 та 5.0. *Modeling the development of the economic systems*. 2023. № 2. С. 120–130. URL: <https://doi.org/10.31891/mdes/2023-8-16>
13. Keshmiry, A., & Hassani, S. (2025). Human-Centric design principles in Industry 4.0 and Industry 5.0. In *Auerbach Publications eBooks* (pp. 275–290). <https://doi.org/10.1201/9781003533023-11>
14. Rodríguez, M., & Camacho, J. A. (2025). Renewable energy adoption in european small and medium-sized enterprises: A comparative sectoral analysis. *Cleaner Energy Systems*, 13, 100227. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100227>
15. Wolf, L. (2025). Navigating the energy transition: A review of factors influencing renewable energy investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 228, 116416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116416>

16. Wu, J.J., Vijayamohan, V. & Field, R.W. On the potential of ocean energy technologies to contribute to future sustainability. *Discov Sustain* 6, 741 (2025). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01676-x>
17. Jia, W., Ding, T., & He, Y. (2026). Synergistic integration of green hydrogen in renewable power systems: A comprehensive review of key technologies, research landscape, and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116375. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116375>
18. Лобойченко В.М., Шевченко Р. І., Стрілець В.М. Використання альтернативних енергоносіїв для морського транспорту як складова енергетичної безпеки країн Балто-Чорноморського регіону. Одеський державний університет внутрішніх справ, 2023. Морська безпека Балто-Чорноморського регіону: виклики та загрози (20 грудня 2023 р., Одеса). Рига, Латвія: Baltija Publishing, 2023. С. 145-148.
19. Sun, C., Feng, L., Chen, Y., Ju, X., & Zhao, T. (2026). Renewable energy for domestic hot water production: Advances, challenges, and future directions - A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116282. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116282>
20. Loboichenko V., Iranzo, A., Casado-Manzano, M., Navas, S. J., Pino, F. J., & Rosa, F. Study of the use of biogas as an energy vector for microgrids. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2024, 200, 114574–114574. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114574>
21. Ana Rita Amaral, Eugénio Rodrigues, Adélio Rodrigues Gaspar, Álvaro Gomes, A review of empirical data of sustainability initiatives in university campus operations, *Journal of Cleaner Production*, Volume 250, 2020, 119558, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119558>
22. Wood, E. (2023, March 13). *What is a microgrid?* Microgrid Knowledge. Retrieved from <https://microgridknowledge.com/what-is-a-microgrid>
23. Ronald Muhumuza, Aggelos Zacharopoulos, Jayanta Deb Mondol, Mervyn Smyth, Adrian Pugsley, Energy consumption levels and technical approaches for supporting development of alternative energy technologies for rural sectors of developing countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 97, 2018, Pages 90-102, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.021>.
24. Jouni K. Juntunen, Mari Martiskainen, Improving understanding of energy autonomy: A systematic review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 141, 2021, 110797, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110797>
25. Nouha Dkhili, Julien Eynard, Stéphane Thil, Stéphane Grieu, A survey of modelling and smart management tools for power grids with prolific distributed generation, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 21, 2020, 100284, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100284>.
26. Saima Ishaq, Irfan Khan, Syed Rahman, Tanveer Hussain, Atif Iqbal, Rajvikram Madurai Elavarasan, A review on recent developments in control and optimization of micro grids, *Energy Reports*, Volume 8, 2022, Pages 4085-4103, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.080>.
27. Negi, G. S., Mohan, H., Gupta, M. K., Singh, R., Gehlot, A., Thakur, A. K., Dogra, S., & Gupta, L. R. (2026). Leveraging machine learning for optimized microgrid management: Advances, applications, challenges, and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116345>
28. Sarin, G., Srivastava, A., Srivastava, I., Bhattacharjee, S., Gujran, S., & Yogendra Sai Reddy, Y. (2025). Renewable microgrid optimization using AI: A B-SLR approach and future research directions. *Energy Reports*, 14, 4963–4975. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.11.087>
29. Limouni, T., Yaagoubi, R., Bouziane, K., Guissi, K., & Baali, E. H. (2025). A comprehensive review of microgrid control methods: Focus on AI, optimization, and predictive techniques. *Computers and Electrical Engineering*, 125, 110442. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110442>
30. Hadi, M., Elbouchikhi, E., Zhou, Z., Saim, A., Shafie-khah, M., Siano, P., Rahbarimagham, H., & Marti Colom, P. (2025). Artificial intelligence for microgrids design, control, and maintenance: A comprehensive review and prospects. *Energy Conversion and Management: X*, 27, 101056. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101056>
31. Lubna Mariam, Malabika Basu, Michael F. Conlon, Microgrid: Architecture, policy and future trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 64, 2016, Pages 477-489, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.037>
32. Shaun Howell, Yacine Rezgoui, Jean-Laurent Hippolyte, Bejay Jayan, Haijiang Li, Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 77, 2017, Pages 193-214, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.107>.
33. Pengcheng Pan, Yuwei Sun, Chengqing Yuan, Xinpeng Yan, Xujing Tang, Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 144, 2021, 111048, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111048>
34. Fukang Ren, Ziqing Wei, Xiaoqiang Zhai, A review on the integration and optimization of distributed energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 162, 2022, 112440, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112440>
35. Shebaz A. Memon, Rajesh N. Patel, An overview of optimization techniques used for sizing

of hybrid renewable energy systems, *Renewable Energy Focus*, Volume 39, 2021, Pages 1-26, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.07.007>

36. Maria Luisa Di Silvestre, Salvatore Favuzza, Eleonora Riva Sanseverino, Gaetano Zizzo, How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 93, 2018, Pages 483-498, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>

37. P. Motevakeh et al. Strategic Resource Planning for Sustainable Biogas Integration in Hybrid Renewable Energy Systems. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 2. P. 642. URL: <https://doi.org/10.3390/app15020642> (date of access: 25.09.2025).

38. Behrendt, J. (2023). Microgrids and EU law: Three Microgrid models to solve one regulatory puzzle. *Energy Policy*, 177, 113483. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113483>

39. Microgrid Safety: A Critical Element of Sustainable Energy. UL Solutions. <https://www.ul.com/resources/microgrid-safety-critical-element-sustainable-energy>

40. C. Mukherjee, J. Denney, E.G. Mbonimpa, J. Slagley, R. Bhowmik, A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 119, 2020, 109512, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512>

41. Gonzalez-de-Durana, J., Rabelo, L., Zamora-Aguas, J., Rincon-Guio, C. (2026). Preliminary Modeling of Cyber Attackers in Microgrids: An Agent-Based and System Dynamics Approach Enhanced with Statecharts. In: Florez, H., Rabelo, L., Diaz, C. (eds) *Industrial Engineering and Operations Management. IEOM-CS 2025. Communications in Computer and Information Science*, vol 2557. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98235-4_22

42. Fakhrooian, M., Basem, A., Gholami, M.M. et al. An artificial insurance framework for a hydrogen-based microgrid to detect the advanced cyberattack model. *Sci Rep* 15, 3762 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88090-5>

43. Mai, V. T., Mohammadzadeh, A., Alattas, K. A., Taghavifar, H., & Ghaderpour, E. (2025). Cybersecurity in maritime power systems: A comprehensive review of cyber threats and mitigation techniques. *Electric Power Systems Research*, 247, 111797. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111797>

44. Bouslimani M, Benbouzid-Si Tayeb F, Amirat Y, Benbouzid M. Cyber-Physical Security in Smart Grids: A Comprehensive Guide to Key Research Areas, Threats, and Countermeasures. *Applied Sciences*. 2025; 15(23):12367. <https://doi.org/10.3390/app152312367>

45. Zhao, A.P., Huo, D. and Alhazmi, M. (2025), Unmanned Aerial Vehicles in Microgrid

Defense. *IET Renew. Power Gener.*, 19: e70089. <https://doi.org/10.1049/rpg2.70089>

46. Zhao, A. P., & Xie, D. (2025). Fire-Resilient microgrids for California. *IET Smart Energy Systems*, 1(1), 73–93. <https://doi.org/10.1049/ses2.70005>

47. Park J-H, Park S-Y. Research on Power Efficiency of DC Microgrids Considering Fire Protection Systems. *Energies*. 2025; 18(2):230. <https://doi.org/10.3390/en18020230>

48. Maraey, A. B., Kotb, M. F., Ghanem, A., & Elgohary, M. (2026). Energy management systems in microgrids and future prospects application in nuclear power plants: a review. *Annals of Nuclear Energy*, 226, 111904. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111904>

49. Abedi, M. M., Haghifam, M. R., Baghaee, H. R., Shafie-Khah, M., & Siano, P. (2025). Protection strategies for ADNs: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116224. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116224>

50. Yadav, G. K., Kirar, M. K., & Gupta, S. (2025). Microgrids protection: A review of technologies, challenges, and future trends. *Renewable Energy Focus*, 55, 100720. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.100720>

51. Rong, J., Liu, W., Jiang, F., & Yang, Y. (2025). Imitation-assisted safe reinforcement learning strategy for microgrid fault restoration. *Applied Soft Computing*, 114031. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.114031>

52. Khanum, N.u.M., Bansal, R.C. (2026). Artificial Intelligence Techniques for Short-Term Load Forecasting in Microgrids. In: Bansal, R.C., Devedzic, V., Nayak, R., Agarwal, B., Tandon, A., Jain, P. (eds) *Advanced Computing Techniques in Engineering and Technology. ACTET 2025. Communications in Computer and Information Science*, vol 2543. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95540-2_29

53. Liu, Z., Chen, Q., Liu, Z., Yang, S., Guo, W., Li, Z., & Zhang, W. (2026). Research on the influencing factors and evaluation methods of operation safety for photovoltaic-storage-charging-inspection integrated energy station. *Journal of Energy Storage*, 141, 119419. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119419>

54. Yadav, S., Anand, R. Analysis of advancing paradigms of smart grid innovations, applications, challenges, future trends and strategic implementations. *Discov Appl Sci* 7, 1380 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07905-2>

References

1. Loboychenko, V. M., & Bukareva, O. V. (2024). Profesijni ryzyky v systemi upravlinnia bezpekoiu pratsi pry robotakh na suchasnykh pidpriemstvakh enerhetychnoi haluzi [Occupational

risks in the occupational safety management system at modern energy sector enterprises]. In Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference “OSHAgro–2024” (pp. 116–118). Kyiv, Ukraine.

2. Abbasian Hamedani, E., Alenabi, S. A., & Talebi, S. (2024). Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles. *Energy Reports*, 12, 3778–3794. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.030>

3. Loboichenko, V., Casado-Manzano M., , Navas S.J., Toharias B., , Felipe R., Iranzo A. Ammonia as energy source for solid oxide fuel cell technology, *Energy Reports*, 2025, 13, 5828–5847. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.05.020>

4. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024, November 29). Some issues of ensuring the achievement of the Sustainable Development Goals in Ukraine (Order No. 1190-r). Legislation of Ukraine database. <https://zakon.rada.gov.ua/go/1190-2024-%D1%80>

5. *Renewable energy – powering a safer and prosperous future*. United Nations. from <https://www.un.org/hi/node/177543>

6. Loboychenko, V. M. (2025). Suchasni tekhnolohii v pozhezhohasinni yak skladova zabezpechennia promyslovoi bezpeky ta okhorony pratsi v kontseptsii Industrii 5.0 [Modern fire suppression technologies as a component of industrial safety and occupational safety in the Industry 5.0 concept]. In Proceedings of the V All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Lecturers and Practitioners and the XV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Cadets, Students, PhD Candidates, and Adjuncts (pp. 22–24). Lviv State University of Life Safety.

7. Krasnoshapka, A., & Fokina-Mezentseva, K. (2025). Kharakterystyka ta analiz osoblyvosti transformatsii vid Industrii 4.0 do Industrii 5.0 ta suspilstva 5.0 [Characteristics and analysis of the transformation from Industry 4.0 to Industry 5.0 and Society 5.0]. *Molodyi vchenyi*, (1), 177–183. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2025-1-132-8>

8. Energy-, Cost-, and Resource-Efficient IoT Hazard Detection System with Adaptive Monitoring / C. L. Kok et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 6. P. 1761. URL: <https://doi.org/10.3390/s25061761> (date of access: 12.04.2025).

9. Hybrid Machine Learning-Based Fault-Tolerant Sensor Data Fusion and Anomaly Detection for Fire Risk Mitigation in IIoT Environment / J. Desikan et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 7. P. 2146. URL: <https://doi.org/10.3390/s25072146>

10. C. L. Kok et al. Energy-, Cost-, and Resource-Efficient IoT Hazard Detection System with Adaptive Monitoring. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 6. P. 1761. URL: <https://doi.org/10.3390/s25061761>

11. Biswas, A., & Roy, D. G. (2021). Metamorphosis of Industrial IoT using Deep Learning. In *Signals and communication technology* (pp. 1–30). https://doi.org/10.1007/978-981-16-6186-0_1

12. Zubkova, A., Maihurova, D., & Misiunia, R. (2023). Upravlinnia proiektamy tsyvrovoi transformatsii mizhnarodnykh pidpriemstv: kliuchovi vidminnosti Industrii 4.0 ta 5.0 [Project management of digital transformation of international enterprises: Key differences between Industry 4.0 and Industry 5.0]. Modeling the Development of the Economic Systems, (2), 120–130. <https://doi.org/10.31891/mdes/2023-8-16>

13. Keshmiry, A., & Hassani, S. (2025). Human-Centric design principles in Industry 4.0 and Industry 5.0. In Auerbach Publications eBooks (pp. 275–290). <https://doi.org/10.1201/9781003533023-11>

14. Rodríguez, M., & Camacho, J. A. (2025). Renewable energy adoption in european small and medium-sized enterprises: A comparative sectoral analysis. *Cleaner Energy Systems*, 13, 100227. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100227>

15. Wolf, L. (2025). Navigating the energy transition: A review of factors influencing renewable energy investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 228, 116416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116416>

16. Wu, J.J., Vijayamohan, V. & Field, R.W. On the potential of ocean energy technologies to contribute to future sustainability. *Discov Sustain* 6, 741 (2025). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01676-x>

17. Jia, W., Ding, T., & He, Y. (2026). Synergistic integration of green hydrogen in renewable power systems: A comprehensive review of key technologies, research landscape, and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116375. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116375>

18. Loboychenko, V. M., Shevchenko, R. I., & Strilets, V. M. (2023). Vykorystannia alternatyvnykh enerhonosiiv dlia morskoho transportu yak skladova enerhetychnoi bezpeky krain Balto-Chornomorskoho rehionu [Use of alternative energy carriers for maritime transport as a component of energy security of the Baltic–Black Sea region countries]. In *Maritime security of the Baltic–Black Sea region: Challenges and threats* (pp. 145–148). Baltija Publishing.

19. Sun, C., Feng, L., Chen, Y., Ju, X., & Zhao, T. (2026). Renewable energy for domestic hot water production: Advances, challenges, and future directions - A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116282. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116282>

20. Loboichenko V., Iranzo, A., Casado-Manzano, M., Navas, S. J., Pino, F. J., & Rosa, F. Study of the use of biogas as an energy

vector for microgrids. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2024, 200, 114574–114574. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114574>

21. Ana Rita Amaral, Eugénio Rodrigues, Adélio Rodrigues Gaspar, Álvaro Gomes, A review of empirical data of sustainability initiatives in university campus operations, *Journal of Cleaner Production*, Volume 250, 2020, 119558, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119558>

22. Wood, E. (2023, March 13). *What is a microgrid?* Microgrid Knowledge. Retrieved from <https://microgridknowledge.com/what-is-a-microgrid>

23. Ronald Muhumuza, Aggelos Zacharopoulos, Jayanta Deb Mondol, Mervyn Smyth, Adrian Pugsley, Energy consumption levels and technical approaches for supporting development of alternative energy technologies for rural sectors of developing countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 97, 2018, Pages 90-102, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.021>.

24. Jouni K. Juntunen, Mari Martiskainen, Improving understanding of energy autonomy: A systematic review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 141, 2021, 110797, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110797>

25. Nouha Dkhili, Julien Eynard, Stéphane Thil, Stéphane Grieu, A survey of modelling and smart management tools for power grids with prolific distributed generation, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 21, 2020, 100284, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100284>.

26. Saima Ishaq, Irfan Khan, Syed Rahman, Tanveer Hussain, Atif Iqbal, Rajvikram Madurai Elavarasan, A review on recent developments in control and optimization of micro grids, *Energy Reports*, Volume 8, 2022, Pages 4085-4103, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.080>.

27. Negi, G. S., Mohan, H., Gupta, M. K., Singh, R., Gehlot, A., Thakur, A. K., Dogra, S., & Gupta, L. R. (2026). Leveraging machine learning for optimized microgrid management: Advances, applications, challenges, and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116345>

28. Sarin, G., Srivastava, A., Srivastava, I., Bhattacharjee, S., Gujran, S., & Yogendra Sai Reddy, Y. (2025). Renewable microgrid optimization using AI: A B-SLR approach and future research directions. *Energy Reports*, 14, 4963–4975. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.11.087>

29. Limouni, T., Yaagoubi, R., Bouziane, K., Guissi, K., & Baali, E. H. (2025). A comprehensive review of microgrid control methods: Focus on AI, optimization, and predictive techniques. *Computers and Electrical Engineering*, 125, 110442. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110442>

30. Hadi, M., Elbouchikhi, E., Zhou, Z., Saim, A., Shafie-khah, M., Siano, P., Rahbarimamgham, H.,

& Marti Colom, P. (2025). Artificial intelligence for microgrids design, control, and maintenance: A comprehensive review and prospects. *Energy Conversion and Management: X*, 27, 101056. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101056>

31. Lubna Mariam, Malabika Basu, Michael F. Conlon, Microgrid: Architecture, policy and future trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 64, 2016, Pages 477-489, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.037>

32. Shaun Howell, Yacine Rezgui, Jean-Laurent Hippolyte, Bejay Jayan, Haijiang Li, Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 77, 2017, Pages 193-214, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.107>.

33. Pengcheng Pan, Yuwei Sun, Chengqing Yuan, Xinpeng Yan, Xujing Tang, Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 144, 2021, 111048, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111048>

34. Fukang Ren, Ziqing Wei, Xiaoqiang Zhai, A review on the integration and optimization of distributed energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 162, 2022, 112440, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112440>

35. Shebaz A. Memon, Rajesh N. Patel, An overview of optimization techniques used for sizing of hybrid renewable energy systems, *Renewable Energy Focus*, Volume 39, 2021, Pages 1-26, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.07.007>

36. Maria Luisa Di Silvestre, Salvatore Favuzza, Eleonora Riva Sanseverino, Gaetano Zizzo, How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 93, 2018, Pages 483-498, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>

37. P. Motevakel et al. Strategic Resource Planning for Sustainable Biogas Integration in Hybrid Renewable Energy Systems. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 2. P. 642. URL: <https://doi.org/10.3390/app15020642> (date of access: 25.09.2025).

38. Behrendt, J. (2023). Microgrids and EU law: Three Microgrid models to solve one regulatory puzzle. *Energy Policy*, 177, 113483. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113483>

39. Microgrid Safety: A Critical Element of Sustainable Energy. UL Solutions. <https://www.ul.com/resources/microgrid-safety-critical-element-sustainable-energy>

40. C. Mukherjee, J. Denney, E.G. Mbonimpa, J. Slagley, R. Bhowmik, A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 119, 2020, 109512, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512>

41. Gonzalez-de-Durana, J., Rabelo, L., Zamora-Aguas, J., Rincon-Guio, C. (2026). Preliminary Modeling of Cyber Attackers in Microgrids: An Agent-Based and System Dynamics Approach Enhanced with Statecharts. In: Florez, H., Rabelo, L., Diaz, C. (eds) *Industrial Engineering and Operations Management. IEOM-CS 2025. Communications in Computer and Information Science*, vol 2557. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98235-4_22
42. Fakhrooieian, M., Basem, A., Gholami, M.M. *et al.* An artificial insurance framework for a hydrogen-based microgrid to detect the advanced cyberattack model. *Sci Rep* 15, 3762 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88090-5>
43. Mai, V. T., Mohammadzadeh, A., Alattas, K. A., Taghavifar, H., & Ghaderpour, E. (2025). Cybersecurity in maritime power systems: A comprehensive review of cyber threats and mitigation techniques. *Electric Power Systems Research*, 247, 111797. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111797>
44. Bouslimani M, Benbouzid-Si Tayeb F, Amirat Y, Benbouzid M. Cyber-Physical Security in Smart Grids: A Comprehensive Guide to Key Research Areas, Threats, and Countermeasures. *Applied Sciences*. 2025; 15(23):12367. <https://doi.org/10.3390/app152312367>
45. Zhao, A.P., Huo, D. and Alhazmi, M. (2025), Unmanned Aerial Vehicles in Microgrid Defense. *IET Renew. Power Gener.*, 19: e70089. <https://doi.org/10.1049/rpg2.70089>
46. Zhao, A. P., & Xie, D. (2025). Fire-Resilient microgrids for California. *IET Smart Energy Systems*, 1(1), 73–93. <https://doi.org/10.1049/ses2.70005>
47. Park J-H, Park S-Y. Research on Power Efficiency of DC Microgrids Considering Fire Protection Systems. *Energies*. 2025; 18(2):230. <https://doi.org/10.3390/en18020230>
48. Maraey, A. B., Kotb, M. F., Ghanem, A., & Elgohary, M. (2026). Energy management systems in microgrids and future prospects application in nuclear power plants: a review. *Annals of Nuclear Energy*, 226, 111904. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111904>
49. Abedi, M. M., Haghighi, M. R., Baghaee, H. R., Shafie-Khah, M., & Siano, P. (2025). Protection strategies for ADNs: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116224. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116224>
50. Yadav, G. K., Kirar, M. K., & Gupta, S. (2025). Microgrids protection: A review of technologies, challenges, and future trends. *Renewable Energy Focus*, 55, 100720. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.100720>
51. Rong, J., Liu, W., Jiang, F., & Yang, Y. (2025). Imitation-assisted safe reinforcement learning strategy for microgrid fault restoration. *Applied Soft Computing*, 114031. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.114031>
52. Khanum, N.u.M., Bansal, R.C. (2026). Artificial Intelligence Techniques for Short-Term Load Forecasting in Microgrids. In: Bansal, R.C., Devedzic, V., Nayak, R., Agarwal, B., Tandon, A., Jain, P. (eds) *Advanced Computing Techniques in Engineering and Technology. ACTET 2025. Communications in Computer and Information Science*, vol 2543. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95540-2_29
53. Liu, Z., Chen, Q., Liu, Z., Yang, S., Guo, W., Li, Z., & Zhang, W. (2026). Research on the influencing factors and evaluation methods of operation safety for photovoltaic-storage-charging-inspection integrated energy station. *Journal of Energy Storage*, 141, 119419. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119419>
54. Yadav, S., Anand, R. Analysis of advancing paradigms of smart grid innovations, applications, challenges, future trends and strategic implementations. *Discov Appl Sci* 7, 1380 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07905-2>

Лобойченко Валентина Михайлівна – доктор техн. наук, професор кафедри цивільної безпеки, Луцький національний технічний університет (вул. Львівська, 75, Луцьк, Волинська область, 43018, Україна), Університет Севільї, Севілья, (Camino de los Descubrimientos s/n., 41092 Севілья)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5188-6479>

E-mail: Valentyna.Lobojchenko@lntu.edu.ua

Хмиров Ігор Михайлович – доктор наук з державного управління, доцент, доцент кафедри управління у сфері цивільного захисту, Національний університет цивільного захисту України, вул. Онопрієнко, 8, м. Черкаси, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7958-463X>

E-mail: khmyrov7771@gmail.com

Солончук Марія Сергіївна – здобувачка III курсу спеціальності «Цивільна безпека», Луцький національний технічний університет (вул. Львівська, 75, Луцьк, Волинська область, 43018, Україна).

CIVIL PROTECTION IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND INDUSTRY 5.0: CHALLENGES FOR RENEWABLE ENERGY (THE CASE OF MICROGRIDS)

Purpose. The purpose of the paper: to identify the main risk factors affecting the functioning of microgrids in order to reduce the level of civil danger at these enterprises within Ukraine and to suggest ways to minimize them.

Research methods: literary analysis, theoretical study of available information, use of methods of analysis and synthesis, induction and deduction, systematization and generalization, methods of formal logic.

Results. The paper notes the need to move away from fossil resources and transition countries to the use of renewable energy sources within the framework of achieving the Sustainable Development Goals, accents the digital transformation of society and the transition to the concept of Industry 5.0. The features of the structure of microgrids as one of the key enterprises of renewable energy within the framework of ensuring sustainable development and Industry 5.0 are analyzed. Their composition and features of functioning are noted, including the use of artificial intelligence in the management of microgrids. The existing problems (technical, economic, legal, cyber threats) are highlighted, as well as the potential for implementation in the energy system of Ukraine.

Scientific novelty. According to the results of the work, the main directions of gradation of microgrids were proposed and structured, the main risk factors in the operation of microgrids of various designs were noted and analyzed, the gradation of the main directions was outlined for the first time, in which an increase in the level of civil danger can be observed during the operation of microgrids within Ukraine, which is a scientific novelty of the study.

Practical significance. Taking into account the identified risk factors, ways to minimize the level of civil danger are proposed, which is a practical result of this study. Timely implementation of the proposed measures when introducing microgrids into the energy system of Ukraine is expected to contribute to its further post-war restoration and sustainable development within Industry 5.0. The results obtained are of an applied nature and will be useful to a wide range of specialists in the field of civil protection, labor protection, energy and environmental protection in the development and implementation of microgrids in the energy sector of Ukraine.

Keywords: microgrid, civil security, artificial intelligence, renewable energy, environmental protection, cyber threats.

Valentyna Loboychenko – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Civil Safety, Lutsk National Technical University, (Lvivska Street, 75, Lutsk, Volyn Oblast, 43018, Ukraine).

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5188-6479>

E-mail: Valentyna.Lobojchenko@lntu.edu.ua

Ihor Khmyrov – Doctor of Science in Public Administration, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Civil Protection Management, National University of Civil Protection of Ukraine, Onoprienko str., 8, Cherkasy, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7958-463X>

E-mail: khmyrov7771@gmail.com

Maria Solomchuk – third-year student majoring in Civil Security, Lutsk National Technical University (75 Lvivska St., Lutsk, Volyn Oblast, 43018, Ukraine).