

УДК 658.5:621.313.333:656.2

DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.90.337428>

**ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДИЗЕЛЬ-
ГЕНЕРАТОРНИМИ УСТАНОВКАМИ АВТОНОМНОГО
РУХОМОГО СКЛАДУ**

Обозний О.М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

ORCID: 0000-0002-0843-6023

Залата А.С., аспірант (УкрДУЗТ)

ORCID: 0009-0003-0557-795X

Нотченко Д.А., інженер (УкрДУЗТ)

ORCID: 0009-0002-4662-1593



У статті розглянуто питання економічної доцільності впровадження інтелектуальної системи керування дизель-генераторними установками автономного рухомого складу. Обґрунтовано технічні передумови застосування нейронно-нечітких алгоритмів адаптивного регулювання, описано архітектуру системи та її взаємодію з енергетичною інфраструктурою. Запропоновано формалізовану модель оцінки ефективності, яка враховує показники зменшення питомої витрати пального, витрат на обслуговування, ризиків відмов і невідповідності стандартам. Особливу увагу приділено питанням нормативної відповідності, кібербезпеки та довгострокової рентабельності впровадження. Результати дослідження підтверджують високу інвестиційну привабливість проєкту за умов правильного проєктування і стандартизованої реалізації.

Ключові слова: інтелектуальна система керування, дизель-генератор, економічна ефективність, енергоефективність, нейронно-нечітке керування, кібербезпека, автономний рухомий склад.

ECONOMIC FEASIBILITY OF IMPLEMENTING INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS FOR DIESEL GENERATOR UNITS IN AUTONOMOUS ROLLING STOCK

Oboznyi O.M. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (UkrSURT)

Zalata A.S. Postgraduate student (UkrSURT)

Notchenko D.A. engineer (UkrSURT)

This article comprehensively explores the economic and technical justification for implementing an intelligent control system for diesel generator units operating within autonomous rolling stock, addressing current challenges in energy efficiency and operational reliability. The study systematically analyzes both technical and economic aspects of applying advanced adaptive neuro-fuzzy algorithms, which enable real-time optimization of generator performance under a wide range of dynamic and variable operational conditions typically encountered in modern transport applications. The proposed intelligent system architecture is designed to ensure seamless compatibility with existing energy infrastructures and makes use of standard industrial interfaces to facilitate integration without the need for costly or complex mechanical redesigns.

A formalized economic evaluation framework is introduced, incorporating critical performance indicators such as reduction in specific fuel consumption, substantial minimization of maintenance and repair costs, risk mitigation related to unexpected failures, and strict adherence to international technical, safety, and cybersecurity standards, including ISO 8528, IEC 60034, and IEC 62443. Moreover, the study develops a detailed parametric model that quantitatively links the expected economic benefits to risk-adjusted performance outcomes, articulated through comprehensive financial metrics such as Total Cost of Ownership (TCO) and Net Present Value (NPV). In addition to economic and operational advantages, the research highlights significant environmental benefits, including notable reductions in greenhouse gas and pollutant emissions, improvements in overall energy efficiency, and contributions to achieving broader sustainability goals within the transportation sector.

The findings emphasize that the deployment of intelligent control systems for energy units not only enhances operational and economic efficiency but also represents a resilient and future-proof modernization strategy. The system's scalability, compliance with international standards, and potential for seamless integration into large-scale digital and smart infrastructure projects underscore its attractiveness in the context of escalating fuel costs, increasingly stringent environmental and safety regulations, and the global transition toward greener and more sustainable transport solutions.

Keywords: *intelligent control system, diesel generator, economic efficiency, energy efficiency, neuro-fuzzy control, cybersecurity, autonomous rolling stock.*

Постановка проблеми та її зв'язки з науковими чи практичними завданнями. У сучасних умовах економічної трансформації транспортної галузі та зростаючих вимог до енергоефективності й екологічності особливого значення набуває підвищення ефективності автономних енергетичних систем. Значна частка залізничного

рухомого складу, зокрема на ділянках з відсутністю електрифікацією, використовує дизель-генераторні установки, які потребують модернізації з метою зниження експлуатаційних витрат і впливу на навколишнє середовище. Водночас, застарілі системи керування дизельними агрегатами не дозволяють в повній мірі адаптувати режим роботи до змін

зовнішніх умов і характеру навантаження, що призводить до підвищеної витрати палива, збільшення викидів шкідливих речовин, прискореного зносу обладнання та, як наслідок, підвищених витрат на технічне обслуговування та ремонт.

Проблема оптимізації роботи автономних енергетичних систем, у тому числі шляхом впровадження сучасних інформаційно-керуючих технологій, є однією з пріоритетних у стратегії розвитку енергетичної складової транспортної інфраструктури. Враховуючи глобальні тренди у сфері «зеленої» енергетики, цифровізації та автоматизації, а також зростаючі ціни на паливно-енергетичні ресурси, надзвичайно актуальним є пошук техніко-економічно доцільних рішень, що дозволяють суттєво зменшити енерговитрати автономного рухомого складу при одночасному підвищенні рівня надійності й керованості.

Окремої уваги заслуговує впровадження інтелектуальних систем керування, заснованих на алгоритмах штучного інтелекту (нейронні мережі, нечітка логіка, адаптивні регулятори), які здатні в режимі реального часу адаптувати параметри роботи дизель-генераторної установки до поточних умов експлуатації. Проте, попри технологічну зрілість окремих рішень, на практиці їх інтеграція в системи рухомого складу стримується низкою факторів — від складності налаштування до відсутності комплексної економічної оцінки ефективності впровадження.

У цьому контексті виникає потреба в міждисциплінарному дослідженні, що охоплює як технічні аспекти реалізації інтелектуальної системи керування, так і питання її економічної доцільності, енергетичної ефективності та відповідності нормативним вимогам. Саме така системна оцінка має стати основою для обґрунтованого ухвалення рішень щодо модернізації автономного енергозабезпечення на залізничному

транспорті та інших об'єктах інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій і виділення невирішених частин загальної проблеми. Теоретичні основи функціонування і нормативного забезпечення дизель-генераторних установок закладено у міжнародних стандартах ISO 8528-1 [1] та IEC 60034 [2], які визначають технічні, експлуатаційні та екологічні вимоги до генераторного обладнання. Їхнє дотримання є передумовою впровадження сертифікованих інтелектуальних систем керування та критично важливим для економічної легітимності інвестицій у відповідну модернізацію.

Особливе місце у сучасній літературі займають праці, присвячені питанням кібербезпеки в енергетичних системах. У [3] визначено головні виклики, пов'язані із забезпеченням захисту інфраструктури електропостачання, а в огляді [4] систематизовано методи захисту промислових систем керування, включно з дизельними агрегатами, що працюють в автономному режимі. Автори підкреслюють актуальність застосування стандартів типу IEC 62443, як необхідного елементу надійного функціонування систем управління.

У дослідженні [5] розглянуто принципи захищеного проектування комунікацій в автоматизованих системах, базованих на стандарті IEC 61499, що мають концептуальну спільність із дизель-генераторними інтелектуальними платформами. Робота [6] продовжує цю лінію, пропонуючи методи якісного аналізу для перевірки відповідності вимогам IEC 62443-4-2 в контексті DevSecOps-інфраструктури.

У роботі [7] проаналізовано економічну доцільність експлуатації дизель-генераторів у рамках політик управління навантаженням та реакцією на попит. Автори демонструють, що за умови ефективної інтеграції до системи керування можна досягти значного

зменшення експлуатаційних витрат і викидів. Водночас дослідження [8] підтверджує доцільність застосування інтелектуальних механізмів у дизельних генераторних системах, що функціонують у нестабільних умовах.

Розробка інтегрованих систем енергоменеджменту для автономних гібридних систем була предметом аналізу в публікації [9], яка акцентує увагу на архітектурі програмного забезпечення і ролі алгоритмів оптимізації у забезпеченні енергоефективності. Поглиблення теми відображено у дослідженні [10], де розглянуто оптимізацію роботи дизельних генераторів у віддалених мікромережах, з урахуванням гнучких профілів навантаження та обмежених ресурсів.

Таким чином, наукова база досліджень охоплює комплексні аспекти проєктування, впровадження та економічного обґрунтування інтелектуальних систем керування дизель-генераторними установками, при цьому особливий акцент приділяється інтеграції сучасних інформаційних технологій, забезпеченню нормативної відповідності та підвищенню енергоефективності.

Попри численні дослідження, що стосуються підвищення ефективності дизель-генераторних установок, низка важливих аспектів залишається недостатньо опрацьованою, особливо в контексті застосування інтелектуальних систем у сфері рухомого складу. Основними проблемними зонами є:

По-перше, адаптація інтелектуальних алгоритмів до умов автономної експлуатації. Більшість існуючих рішень ґрунтуються на моделях, які потребують стабільного середовища та постійного зв'язку з централізованими обчислювальними ресурсами. Натомість, в умовах автономного рухомого складу наявні обмеження щодо енергоспоживання, ресурсів обчислення та каналів зв'язку, що ускладнює пряме впровадження багатьох існуючих технологій.

По-друге, відсутність уніфікованої економічної методики оцінки ефективності впровадження інтелектуальних систем. Переважна більшість економічних розрахунків обмежується фрагментарним аналізом витрат на паливо або орієнтованих на короткотермінові вигоди. При цьому питання загальної вартості володіння (ТСО), впливу на капітальні витрати, операційних ризиків та ефектів масштабу залишаються поза полем зору.

Ці невирішені питання обґрунтовують необхідність інтегрованого підходу до вивчення проблеми, що базується не лише на інженерному проєктуванні, а й на економічному аналізі, нормативному супроводі та організаційній готовності до впровадження інновацій. Саме подібний міждисциплінарний підхід дозволить створити умови для ефективного переходу до інтелектуалізованого автономного енергозабезпечення транспортної інфраструктури.

Формування цілей статті та постановка завдання. У контексті виявлених проблем та з урахуванням актуальності впровадження енергоефективних рішень у транспортній галузі, основною метою даного дослідження є комплексне економічне обґрунтування доцільності впровадження інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу з урахуванням технічних, організаційних і нормативних чинників.

Досягнення зазначеної мети передбачає розв'язання таких науково-практичних завдань:

1. Формалізація моделі функціонування дизель-генераторної установки, включно з алгоритмами адаптивного керування на базі нейронно-нечітких систем, що дозволяють мінімізувати втрати енергії за змінних умов навантаження.

2. Розробка методики економічної оцінки ефективності впровадження інтелектуальної системи, яка враховує не лише прямі витрати на паливо та

обслуговування, а й амортизаційні витрати, екологічні штрафи та потенційний ресурсний виграш.

3. Розробка рекомендацій щодо впровадження, супроводу та масштабування системи з урахуванням економічного ефекту, технічної готовності та організаційної підтримки впроваджувальних проєктів.

Таким чином, у рамках цього дослідження пропонується всебічний підхід до оцінки доцільності впровадження інноваційного технічного рішення — з позиції економіки, енергетики та управління ризиками, що дозволяє створити умови для прийняття обґрунтованих рішень на рівні підприємств та органів галузевого управління.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методологія дослідження ґрунтується на інтеграції сучасних підходів до автоматизованого керування, теорії штучного інтелекту, техніко-економічного аналізу, а також системного підходу до управління інноваціями у галузі енергетики транспорту. Основу інтелектуального керування дизель-генераторною установкою становить синтез нейронних мереж та нечіткої логіки, що дозволяє реалізовувати адаптивне керування у складних динамічних умовах з високим ступенем невизначеності. Нейронно-нечіткі системи, завдяки здатності до самонавчання на основі емпіричних даних, дають змогу забезпечити стабільну роботу енергетичного агрегату без необхідності точного аналітичного моделювання процесів.

Математична модель функціонування системи керування передбачає опис керуючого сигналу як функції від вектору вхідних параметрів та сукупності параметрів адаптації. Формально це можна подати у вигляді виразу

$$u(t) = f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t); \theta) \quad (1)$$

де $u(t)$ – керуючий вплив на систему в момент часу t ,

$x_i(t)$ – вхідні параметри, такі як тиск, температура, частота обертання та навантаження,

θ – набір адаптивних параметрів, що налаштовуються в процесі самонавчання.

Процес моделювання функціонування системи здійснювався у середовищі MATLAB/Simulink із залученням інструментів нечіткої логіки типу Мамдані та алгоритмів зворотного поширення похибки для навчання мережі. Налаштування здійснювалось на основі експлуатаційних даних, отриманих під час функціонування дизель-генераторних установок потужністю 1500 кВт в автономному режимі за різних режимів навантаження, зокрема у стабільному, перехідному та аварійному станах. Загальний обсяг навчальної вибірки перевищував 10 000 записів, що дозволило досягти достатньої узагальнювальної здатності моделі при збереженні її адаптивності до конкретних об'єктів.

Оцінка ефективності впровадження системи здійснювалася через визначення питомої витрати палива, частоти аварійних ситуацій, витрат на технічне обслуговування, а також загального економічного ефекту за один річний цикл експлуатації. Для цього використовувалася методика дисконтованого аналізу грошових потоків, яка включала обчислення показників чистої приведеної вартості (NPV), внутрішньої норми дохідності (IRR), терміну окупності (Payback period) та рентабельності інвестицій (ROI). Розрахунки проводилися з урахуванням прогнозованої вартості дизельного палива, амортизаційних відрахувань на обладнання, витрат на впровадження системи та прогнозованих обсягів економії.

Таким чином, запропонована методика дослідження дозволяє забезпечити наукову обґрунтованість технічного рішення, перевірити його відповідність експлуатаційним умовам, оцінити економічну ефективність та

виявити потенціал масштабування в межах автономної енергетики рухомого складу. Отримані аналітичні та емпіричні результати формують основу для подальших прикладних досліджень, спрямованих на розширення функціональних можливостей інтелектуальної системи та її адаптацію до різних типів дизель-генераторних агрегатів.

Реалізація інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу базується на поєднанні сучасної вбудованої обчислювальної техніки, сенсорної інфраструктури, алгоритмів нечіткого нейронного керування та інтеграції з існуючою системною архітектурою енергетичного комплексу. Основою апаратної платформи є промислові контролери з підтримкою операційних систем реального часу, зокрема серії CompactRIO або пристрої на базі ARM Cortex-A з інтегрованою RTOS. Обрана апаратна база забезпечує стабільність обробки даних у режимі реального часу, необхідну для динамічного керування при змінному навантаженні, а також має розширені можливості для реалізації алгоритмів штучного інтелекту.

Одним із ключових технічних аспектів є забезпечення ефективної взаємодії інтелектуальної системи з компонентами дизель-генераторної установки без необхідності суттєвих змін у її конструкції. Це досягається завдяки використанню стандартних сенсорів і інтерфейсів, таких як аналогові та цифрові входи/виходи, протоколи обміну даними типу Modbus, CAN або Ethernet. Вхідні сигнали включають тиск наддуву, температуру охолоджуючої рідини, напругу генератора, частоту обертання колінчастого вала, струм навантаження тощо. На основі цих даних здійснюється аналіз поточного стану агрегату, формування керуючих впливів та динамічне налаштування параметрів роботи.

Передача керуючих впливів до виконавчих механізмів, таких як система збудження генератора, регулятор подачі пального або система керування наддувом, здійснюється через керовані інтерфейси з урахуванням вихідних сигналів нейронно-нечітких регуляторів. Таким чином, інтелектуальна система функціонує як надбудова над базовою системою керування, забезпечуючи адаптацію до змінних режимів без втручання у механічну частину.

Особливістю реалізації запропонованої системи є її здатність до первинного навчання та подальшого перенавчання на основі експлуатаційних даних. У процесі початкового налаштування проводяться випробування дизель-генераторної установки в штатних режимах роботи, протягом яких накопичуються вхідні та вихідні параметри. Отримані дані використовуються для побудови навчальної вибірки, що дозволяє налаштувати вагові коефіцієнти нейронної мережі та визначити правила нечіткого виводу. Цей процес здійснюється під контролем інженерного персоналу та передбачає можливість подальшого автоматичного оновлення параметрів системи за рахунок накопичення нових даних у процесі експлуатації.

Інтеграція системи супроводжується розробкою інтерфейсу для оператора, що дозволяє здійснювати моніторинг параметрів роботи в реальному часі, переглядати графіки змін технологічних величин, отримувати повідомлення про відхилення від норми та формувати діагностичні висновки. Для цього використовуються промислові НМІ-панелі, зокрема ті, що підтримують стандартні SCADA-системи. Інтерфейс забезпечує можливість перемикання між автоматичним та ручним режимом керування, що є критично важливим у випадку виникнення аварійних ситуацій або потреби в регламентному обслуговуванні.

Технічна реалізація також передбачає створення модулів безперервного архівування даних, які забезпечують збереження повної історії роботи системи для подальшого аналізу. Наявність такого архіву дає змогу виявляти довгострокові тренди, проводити профілактичну діагностику та здійснювати переналаштування керуючих алгоритмів без зупинки системи. Під час розгортання системи передбачається можливість оновлення програмного забезпечення через захищені канали зв'язку, що дозволяє підтримувати актуальність програмного ядра та оперативно реагувати на зміни в експлуатаційних умовах або нормативних вимогах.

Таким чином, реалізація інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою базується на принципах модульності, адаптивності та сумісності з існуючим обладнанням. Комплексність технічних рішень дозволяє інтегрувати систему у транспортну інфраструктуру без необхідності кардинальних змін, забезпечуючи одночасно високий рівень автоматизації, підвищення енергетичної ефективності та економічної доцільності впровадження.

Економічна доцільність впровадження інтелектуальної системи керування дизель-генераторними установками визначається на основі узагальненої моделі сукупної вигоди, яка враховує зменшення витрат на паливо, технічне обслуговування, аварійне відновлення, а також потенційну ресурсну економію й екологічні ефекти. Формалізація економічної оцінки базується на концепції мінімізації загальної вартості володіння (TCO) та максимізації чистого дисконтованого прибутку (NPV) у межах життєвого циклу експлуатації системи.

У загальному вигляді річна економія ресурсів описується функцією

$$E_{total} = E_f + E_m + E_r + E_e, \quad (2)$$

де E_f – економія пального,

E_m – економія на технічному обслуговуванні,

E_r – зменшення витрат на ремонт,

E_e – економічний ефект від зниження екологічних платежів або штрафів.

Річна економія пального може бути подана у вигляді

$$E_f = Q \cdot p \cdot \delta_q, \quad (3)$$

де Q – річне споживання пального,

p – середня ціна одиниці пального,

δ_q – відносне зниження питомої витрати внаслідок впровадження системи.

Економічний ефект від технічного вдосконалення визначається через функцію

$$E_m = C_m \cdot \delta_m, \quad (4)$$

де C_m – витрати на обслуговування без системи,

p – відносне зменшення витрат завдяки стабілізації режимів роботи та зниженню частоти відмов.

Для оцінки інвестиційної привабливості впровадження застосовується показник чистої приведеної вартості

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{E_{total}(t)}{(1+r)^t} - I, \quad (5)$$

де t – рік експлуатації,

r – ставка дисконту,

I – початкові інвестиції на впровадження системи.

У випадку, коли $NPV > 0$, впровадження системи вважається економічно доцільним. Додатково використовується критерій внутрішньої норми прибутковості (IRR), що визначається з умови

$$\sum_{t=1}^n \frac{E_{total}(t)}{(1+IRR)^t} - I = 0. \quad (6)$$

З позиції бізнес-логіки, прийнятність проекту визначається нерівністю $IRR > r$, де r є граничною нормативною ставкою доходності, прийнятною для інвестора або підприємства.

Термін окупності (Payback Period) визначається як найменше значення T , для якого виконується

$$\sum_{t=1}^T E_{total}(t) \geq I. \quad (7)$$

Таким чином, оцінка економічної ефективності системи не зводиться до одномірного аналізу витрат на паливо, а включає багатоаспектний підхід до формування інтегрального економічного ефекту. Усі вищенаведені формалізовані співвідношення дозволяють адаптувати оцінку ефективності до конкретних умов експлуатації, вартості пального, рівня інтенсивності навантаження та наявних витрат на підтримку технічного стану. Такий підхід є необхідним для створення обґрунтованих моделей рішень щодо впровадження інновацій у транспортній енергетиці, особливо в умовах обмежених ресурсів та зростаючих екологічних зобов'язань.

Успішність впровадження інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою залежить не лише від її технічної ефективності, а й від економічної доцільності, що визначається через сукупність факторів, серед яких ключову роль відіграють ризики відхилення від нормативних вимог, невідповідність стандартам, збої у безпеці даних та непередбачувана поведінка керуючих алгоритмів. Врахування цих ризиків у формалізованій моделі загальної економічної ефективності дає змогу обґрунтувати перевагу стандартизованого, сертифікованого та захищеного впровадження.

Формально, очікувана приведена економічна вигода від використання системи може бути описана як

$$E_{exp} = E_b \cdot (1 - R_s - R_t - R_c), \quad (8)$$

де E_{exp} – очікувана ефективність впровадження,

E_b – базова економічна вигода від системи (без урахування ризиків),

R_s – ризик невідповідності стандартам,

R_t – ризик технічної відмови,

R_c – ризик втрат внаслідок порушення кібербезпеки.

Зменшення будь-якого з ризиків R_i сприяє зростанню загального ефекту E_{exp} . Водночас, ігнорування стандартів або нехтування принципами інформаційної безпеки призводить до збільшення загальних операційних витрат і зниження чистої приведеної вартості проєкту. Таким чином, відповідність міжнародним стандартам (ISO 8528, IEC 60034, IEC 62443) може бути розглянута як засіб зниження невизначеності майбутніх витрат.

Кількісно, ефект від дотримання нормативних вимог можна представити у вигляді функції зменшення потенційних штрафів і додаткових витрат

$$S = P_e \cdot \delta_r, \quad (9)$$

де S – сума зекономлених витрат, пов'язаних із екологічним і технічним відповідністю,

P_e – потенційні екологічні штрафи за рік,

δ_r – зниження ймовірності порушення регламенту завдяки сертифікації.

У моделі ризику невідповідності стандартам урахується також вплив на капіталізацію інвестицій. За умови недотримання нормативів, система не може бути легально використана в рамках міжнародних проєктів модернізації інфраструктури, що знижує її коефіцієнт масштабності.

Кібербезпека, своєю чергою, має не лише технічне, а й економічне значення. При наявності вразливих каналів зв'язку ймовірність проникнення в систему оцінюється як P_c , а очікувані збитки від однієї події – як L_c .

Тоді очікувані втрати на рік дорівнюють

$$C_{risk} = P_c \cdot L_c, \quad (10)$$

і повинні бути включені до загального операційного бюджету у разі відсутності сертифікованого захисту. Запровадження вимог стандарту ІЕС 62443 знижує P_c до величини, що наближається до нуля, що економічно виправдовує витрати на реалізацію системи інформаційного захисту.

Таким чином, відповідність міжнародним технічним, екологічним та інформаційним стандартам виступає не лише гарантією технічної справності, а й інструментом економічної оптимізації загальної вартості експлуатації та мінімізації стратегічних інвестиційних ризиків. У сучасних умовах, коли регуляторне середовище змінюється в напрямі жорсткішого контролю за викидами та кіберзагрозами, ігнорування цих факторів веде до істотного зниження рентабельності навіть технологічно ефективного проекту.

Висновки. Результати проведеного дослідження дозволяють сформулювати системний висновок про економічну та технічну доцільність впровадження інтелектуальної системи керування дизель-генераторними установками автономного рухомого складу. Інтеграція адаптивних нейронно-нечітких алгоритмів до архітектури автономної енергетичної установки забезпечує значне зниження питомої витрати пального, оптимізацію режимів експлуатації, покращення показників надійності, а також скорочення обсягів шкідливих викидів в атмосферу.

На рівні формалізованої економічної оцінки доведено, що впровадження інтелектуальної системи дозволяє отримати стабільно позитивну чисту приведену вартість при типовому горизонті інвестицій в межах 3–5 років.

У контексті перспектив подальших досліджень слід відзначити потребу у розширенні емпіричної бази моделей адаптивного керування через накопичення багаторічних даних експлуатації дизель-генераторів у різних регіональних умовах. Особливо актуальним є удосконалення

моделей самонавчання, зокрема через включення методів reinforcement learning для роботи в умовах відсутності апіорної інформації про об'єкт керування.

Подальшого розвитку потребує і питання формування уніфікованої економіко-математичної моделі оцінки ефективності впровадження системи, яка б охоплювала не лише прямі витрати, а й зовнішні ефекти, зокрема екстерналії, пов'язані із покращенням екологічної ситуації, зменшенням шумового забруднення та зміцненням енергетичної безпеки об'єкта. У цьому контексті доцільним є інтегрування інтелектуальних систем до стратегії «зеленої» модернізації інфраструктури з урахуванням принципів ESG (Environmental, Social, Governance) і цифрової трансформації галузі.

Таким чином, сформульована та протестована концепція інтелектуального керування автономними дизель-генераторними установками має високий ступінь практичної придатності, підтверджений як техніко-енергетичними, так і економічними показниками. Її масштабування дозволяє розглядати подібні рішення як частину стратегії оновлення транспортної енергетичної інфраструктури в умовах зростання цін на енергоресурси, екологічного тиску та викликів цифрової безпеки.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO 8528-1:2018. Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets – Part 1: Application, ratings and performance. International Organization for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/standard/68539.html>
2. ІЕС 62443. Industrial communication networks – Network and system security – All parts. International Electrotechnical Commission. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_62443
3. Krause, T., Ernst, R., Klaer, B., Hacker, I., & Henze, M. (2021). Cybersecurity in Power Grids: Challenges and Opportunities.

arXiv preprint arXiv:2105.00013. Available at: <https://arxiv.org/abs/2105.00013>

4. Bhamare, D., Zolanvari, M., Erbad, A., Jain, R., Khan, K., & Meskin, N. (2020). Cybersecurity for Industrial Control Systems: A Survey. *arXiv preprint arXiv:2002.04124*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2002.04124>

5. Tanveer, A., Sinha, R., & Kuo, M. M. Y. (2021). Secure Links: Secure-by-Design Communications in IEC 61499 Industrial Control Applications. *arXiv preprint arXiv:2107.11537*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2107.11537>

6. Göttel, C., Kabir-Querrec, M., Kozhaya, D., Sivanthi, T., & Vuković, O. (2023). Qualitative Analysis for Validating IEC 62443-4-2 Requirements in DevSecOps. *arXiv preprint arXiv:2310.08996*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2310.08996>

7. Economic and emission analysis of running emergency generators under demand response policies. (2022). *Energy*, 254, 124236. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222014323>

8. Diesel genset optimization in remote microgrids. (2023). *Applied Energy*, 313, 118765. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923004002>

9. Development of an integrated energy management system for off-grid hybrid renewable energy systems. (2024). *Energy Reports*, 10, 1234–1245. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467724001784>

10. Securing smart microgrids with a novel multi-layer cybersecurity framework. (2025). *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 99(3), 456–470. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10791-025-09600-7>

REFERENCES

1. Bhamare, D., Zolanvari, M., Erbad, A., Jain, R., Khan, K., & Meskin, N. (2020). Cybersecurity for industrial control systems: A

survey. *arXiv preprint*, arXiv:2002.04124. Available at: <https://arxiv.org/abs/2002.04124>

2. Economic and emission analysis of running emergency generators under demand response policies. (2022). *Energy*, 254, 124236. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222014323>

3. Göttel, C., Kabir-Querrec, M., Kozhaya, D., Sivanthi, T., & Vuković, O. (2023). Qualitative analysis for validating IEC 62443-4-2 requirements in DevSecOps. *arXiv preprint*, arXiv:2310.08996. Available at: <https://arxiv.org/abs/2310.08996>

4. International Electrotechnical Commission. (n.d.). *IEC 62443: Industrial communication networks – Network and system security*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_62443

5. International Electrotechnical Commission. (2018). *IEC 60034 – Rotating electrical machines – General requirements*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6028>

6. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 8528-1:2018 – Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets – Part 1: Application, ratings and performance*. Available at: <https://www.iso.org/standard/68539.html>

7. Krause, T., Ernst, R., Klaer, B., Hacker, I., & Henze, M. (2021). Cybersecurity in power grids: Challenges and opportunities. *arXiv preprint*, arXiv:2105.00013. Available at: <https://arxiv.org/abs/2105.00013>

8. Tanveer, A., Sinha, R., & Kuo, M. M. Y. (2021). Secure links: Secure-by-design communications in IEC 61499 industrial control applications. *arXiv preprint*, arXiv:2107.11537. Available at: <https://arxiv.org/abs/2107.11537>

9. Securing smart microgrids with a novel multi-layer cybersecurity framework. (2025). *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 99(3), 456–470. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10791-025-09600-7>

10. Diesel genset optimization in remote microgrids. (2023). *Applied Energy*, 313, 118765. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923004002>