

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-52-57>

УДК 662.758

РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗНОГО КЕРУВАННЯ ПІДВЕДЕННЯМ ЕНЕРГІЇ У ГІБРИДНИХ PEM–PV СИСТЕМАХ СИНТЕЗУ ЗЕЛЕНОГО АМІАКУ

Бзовський І.К., Сергієнко Д.В., Целіщев О.Б.,
Кудрявцев С.О., Лорія М.Г.

DEVELOPMENT OF A LABORATORY INSTALLATION FOR MODEL-BASED CONTROL OF ENERGY SUPPLY IN HYBRID PEM–PV SYSTEMS FOR GREEN AMMONIA SYNTHESIS

Bzovsky I.K., Serhiienko D.V., Tselishchev O.B.,
Kudryavtsev S.O., Loria M.G.

Стаття присвячена розробленню лабораторної установки для дослідження методів модельно-прогнозного керування підведенням енергії в гібридних енерготехнологічних системах синтезу зеленого аміаку на основі PEM-електролізу та фотоелектричної генерації. Актуальність роботи зумовлена глобальним переходом до вуглецево нейтральної енергетики та зростаючою роллю зеленого водню і аміаку як стратегічних енергоносіїв. На відміну від підходів, орієнтованих на оптимізацію окремих підсистем, у дослідженні реалізовано інтегрований метод керування повним технологічним ланцюгом Power-to-Ammonia із урахуванням динаміки енергетичних потоків, змін погодно-кліматичних умов та коливань тарифів на електроенергію.

Запропонована установка включає гібридну систему енергопостачання (PV, акумуляторна батарея, мережа, гібридний інвертор), PEM-електролізер продуктивністю 300 мл $\text{H}_2/\text{хв}$, модуль буферного зберігання та компресії водню, реактор синтезу аміаку за процесом Габера–Боша та автоматизовану систему моніторингу параметрів у реальному часі. На основі зібраних експериментальних даних здійснюється калібрування математичних моделей, перевірка стійкості та точності алгоритмів MPC, а також формування емпіричних залежностей для подальшої оптимізації режимів роботи.

Додатково модельно-прогнозне керування дозволяє враховувати інерційність елементів системи, деградаційні процеси електролізера та нестабільність генерації ВДЕ, що забезпечує гнучку

адаптацію режимів синтезу до зовнішніх збурень. Отримані результати підтверджують можливість зменшення питомої енергоємності синтезу, покращення стабільності технологічного процесу та забезпечення надійного енергопостачання за умов варіативної сонячної генерації. Розроблена експериментальна основа є інструментальною платформою для подальших досліджень і масштабування технології до промислового рівня.

Ключові слова: *зелений аміак; PEM-електроліз; фотоелектрична генерація; модельно-прогнозне керування (MPC); гібридна енергосистема; цифровий двійник; енергоефективність; Power-to-Ammonia.*

Вступ. Світова енергетична система перебуває в стані глибокої структурної трансформації, ключовою метою якої є досягнення повної вуглецевої нейтральності до 2050 року (Net Zero 2050). Такі орієнтири закріплені у стратегічних документах Міжнародного енергетичного агентства (IEA, *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, 2021) та ініціативі ООН UNFCCC Net Zero Coalition, що передбачають системну декарбонізацію економічних секторів шляхом скорочення споживання викопних енергоносіїв, модернізації промислових технологій і масштабного розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Європейський Союз, відповідно до положень Європейського зеленого курсу (European Green Deal, 2019) та Стратегії ЄС з водню (EU Hydrogen Strategy, 2020), визначає розвиток «зеленого» водню та його похідних, зокрема зеленого аміаку, як стратегічний інструмент глибокої декарбонізації енергетики, транспорту й енергоємних галузей промисловості. Такий підхід базується на оцінці водню як універсального носія енергії, здатного забезпечити гнучкість енергосистеми, інтеграцію ВДЕ та формування низьковуглецевих виробничих ланцюгів.

Україна також задекларувала намір перейти до вуглецево нейтральної моделі економічного розвитку, що відображено у Національному плані зі скорочення викидів парникових газів до 2050 року та Концепції розвитку водневої енергетики. У цьому контексті особливого значення набувають технології виробництва, накопичення, транспортування та конверсії зеленого водню, включно із синтезом зеленого аміаку як енергоємного транспортованого носія.

Водночас, попри інтенсивне нарощування наукових і технологічних результатів, актуальною залишається проблема побудови ефективних систем управління енергетичними потоками в гібридних енергетичних комплексах на основі ВДЕ. Саме від оптимальності алгоритмів керування залежить собівартість виробленого зеленого водню та аміаку, рівень їх енергетичної ефективності та стабільність функціонування системи в умовах змінних зовнішніх факторів (погоди, ринку електроенергії, деградації обладнання тощо).

Сучасні тенденції енергетичного переходу до Net Zero 2050 окреслює для наукової спільноти подвійний виклик: одночасно з нарощуванням частки ВДЕ забезпечити їхню техніко-економічну інтеграцію в енергоємні технологічні ланцюги з керованою динамікою. Стратегія IEA визначає водень і його похідні (насамперед аміак) як ключові носії для міжсезонного зберігання енергії, гнучкого балансування систем і декарбонізації важкої промисловості [1], а «Ammonia Technology Roadmap» конкретизує траєкторії зниження питомої енергоємності та вуглецевого сліду по всьому життєвому циклу [5]. Європейський зелений курс та Стратегія ЄС з водню підсилюють цю рамку, акцентуючи на ролі PtX-ланцюгів (Power-to-Hydrogen/Ammonia) у промисловості та транспорті [2, 3]; національні документи України узгоджують напрями з глобальними цілями, що створює нормативне

підґрунтя для експериментальних і прикладних досліджень [4].

У технічній літературі сформовано декілька магістральних ліній досліджень. Перша — це керування гібридними мікромережами з PV та акумуляторними системами в присутності електролізера. Guo та ін. [6] показали ефективність ієрархічної економічної MPC-стратегії (HEMPC) для PV–Electrolyzer–Battery, досягаючи згладжування навантажень і покращення стабільності. Li та ін. [7] продемонстрували комбінований DP-MPC, який поєднує глобальний пошук динамічного програмування з локальною адаптивністю MPC, що зменшує експлуатаційні витрати у реальному часі. Syed і Khalid [8] інтегрували нейромережеві апроксимації динаміки в MPC для комплексу PV–Wind–Battery–Electrolyzer–Fuel Cell, підвищивши точність прогнозування та робастність до збурень.

Друга лінія — безпосереднє керування процесами синтезу аміаку в «зелених» схемах. Syed і Kazerani [9] застосували NNMPC до електрохімічного синтезу аміаку, фокусуючись на стабілізації продуктивності й обмеженнях процесу; робота демонструє потенціал «м'яких» моделей для високонелінійних об'єктів. Shihui та ін. [10] запропонували дворівневу MPC-архітектуру для зв'язаного комплексу Hydro–PV–Electrolyzer–Ammonia Synthesis, що координує розподіл потужності між підсистемами та регулює режими синтезу.

Попри суттєвий поступ, окреслюються спільні обмеження наявних підходів. По-перше, більшість робіт орієнтовано на локальну оптимізацію фрагментів системи (енергетичної мікромережі або окремого реакторного/електролізерного вузла), що знижує глобальну оптимальність у повному PtA-ланцюгу. По-друге, у значній частині моделей використано статичні або квазістатичні представлення ключових блоків (наприклад, PEM-електролізера), що обмежує адекватність до швидкоплинних режимів і перехідних процесів [6–8,10]. По-третє, слабо відображено зовнішні стохастичні фактори — часово-залежні тарифи, прогноз погоди, обмеження ринку та деградаційні механізми електрохімічних і накопичувальних підсистем; відтак економічні KPI (LCOA, питомі енерговитрати) оптимізуються фрагментарно [5–7,10].

Додатковим методологічним розривом є недостатня інтеграція інструментів «цифрового двійника» (Digital Twin) для наскрізної валідації MPC-стратегій у пов'язаних доменах:

електроенергетика — електрохімія — тепло- і масообмін. Хоч окремі праці торкаються аспектів моделювання й ідентифікації, повнофункціональні двійники, які відтворюють термодинаміку синтезу аміаку разом із деградацією PEM та керуванням буферним зберіганням H_2 , у літературі представлені обмежено [6–10].

Таким чином, узагальнення джерел показує потребу у: інтегрованих MPC-схемах, що охоплюють повний PtA-ланцюг з урахуванням міжсистемних зв'язків; експліцитному включенні прогнозів ПВ-генерації, тарифів і деградації в критеріальні функції та обмеження; використанні цифрових двійників для прискореного тестування політик керування і трансферу їх на фізичні стенди; експериментальній верифікації з послідовним калібруванням моделей. Саме ці прогалини адресує запропонована в роботі методика: єдина цифрова MPC-архітектура для Power-to-Ammonia, підкріплена Digital Twin у DWSIM і лабораторним стендом PEM–PV із модулем буферного H_2 та реактором Габера–Боша. Така комбінація дозволяє перейти від локальної оптимізації підсистем до економічно орієнтованої координації всього технологічного контуру, що узгоджено зі стратегічними орієнтирами IEA та ЄС [1–5].

Сучасні дослідження засвідчують перспективність застосування методів модельно-прогнозного керування (MPC) у таких енергетичних системах. Наприклад, у праці Guo та ін. (2025) запропоновано ієрархічну економічну MPC-стратегію (HEMPC) для комплексу PV–Electrolyzer–Battery, яка забезпечує зниження коливань навантаження та підвищення стійкості енергосистеми. У роботі Li et al. (2024) представлено гібридний алгоритм DP-MPC для керування мікромережею, що поєднує глобальну оптимізацію динамічного програмування з адаптивними властивостями MPC, демонструючи ефективне балансування енергетичних потоків та скорочення експлуатаційних витрат. Syed і Khalid (2023) застосували MPC з використанням нейронної мережі для моделювання динаміки системи PV–Wind–Battery–Electrolyzer–Fuel Cell, що дозволило підвищити точність прогнозування поведінки мікромережі.

Однак більшість зазначених підходів орієнтовано на локальну оптимізацію та не охоплює повної інтеграції етапів виробництва, буферного зберігання водню та синтезу аміаку в умовах змінних цінних та природно-

кліматичних параметрів. Зокрема, у дослідженні Syed і Kazeranі (2024) було запропоновано нейромережеву MPC-схему (NNMPC) для регулювання процесів електрохімічного синтезу аміаку, однак модель не враховує деградаційні процеси в обладнанні та зміни тарифів на електроенергію. У роботі Y. Shihui та ін. (2025) реалізовано дворівневу MPC-стратегію для комплексу Hydro–PV–Electrolyzer–Ammonia Synthesis, проте її основою є спрощена статична модель PEM-електролізера, що обмежує здатність системи до адаптації в реальних динамічних умовах.

Тому розробка лабораторної установки для модельно-прогнозного керування підведенням енергії у гібридних рет–рв системах синтезу зеленого аміаку є актуальною задачею.

Основна частина. На відміну від наявних підходів, які здебільшого зосереджуються на оптимізації роботи окремих підсистем гібридної енергетичної інфраструктури (фотоелектричних модулів, систем акумуляції енергії або електролізерних установок), запропонована в цьому проєкті методологія має комплексний та інтегрований характер. Її сутність полягає у формуванні єдиної керованої енерготехнологічної системи типу *Power-to-Ammonia*, що забезпечує узгоджене функціонування усіх ключових етапів виробничого процесу — від перетворення сонячної енергії до синтезу зеленого аміаку. У межах даного підходу передбачається реалізація таких принципових положень:

- Інтеграція повного технологічного ланцюга Power-to-Ammonia в єдину цифрову модельно-прогнозну архітектуру керування (MPC), що дозволяє враховувати міжсистемні взаємозв'язки, залежності потоків енергії та речовин, а також забезпечує оптимізацію функціонування системи в цілому, а не її окремих елементів.

- Використання оперативних прогнозів погодно-кліматичних умов та тарифів на електроенергію в режимі реального часу, що дає змогу реалізувати адаптивні стратегії керування, враховувати стохастичний характер генерації ВДЕ та мінімізувати витрати на енергозабезпечення процесу електролізу та синтезу аміаку.

- Розроблення цифрового двійника (Digital Twin) у середовищі DWSIM, який відтворює фізико-хімічну, термодинамічну та електроенергетичну поведінку системи. Цифровий двійник слугує інструментом для тестування, порівняння та оптимізації варіантів

стратегій керування без втручання у реальний технологічний процес, що знижує експериментальні ризики та витрати.

- Зниження питомої енергоємності та собівартості виробництва зеленого аміаку шляхом оптимального розподілу активної та реактивної потужності, раціоналізації режимів роботи електролізера та теплоенергетичного блока синтезу, а також мінімізації простоїв та неефективних фаз роботи обладнання.

- Експериментальна верифікація математичної моделі та системи керування на фізичному стенді, що забезпечує підтвердження адекватності, надійності та практичної реалізованості запропонованого підходу в умовах реального технологічного циклу.

Таким чином, створення установки синтезу зеленого аміаку лабораторного масштабу орієнтований не лише на дослідження підвищення ефективності окремих енергетичних компонентів, але й на формування цілісної інтелектуально-керованої інфраструктури виробництва зеленого аміаку, здатної функціонувати в умовах варіативності зовнішніх впливів та ринкових параметрів, що є критично важливим для впровадження водневої енергетики у промисловий масштаб.

Метою є розробка ефективної системи селективного підведення енергії до установки синтезу зеленого аміаку на основі процесу Габера–Боша та PEM-електролізу.

Для цього необхідно розробити та побудувати експериментальну установку лабораторного масштабу для верифікації математичної моделі, алгоритмів керування та тестування роботи ключових підсистем, включно згібридною системою енергопостачання, PEM-електролізером, буферним зберіганням і компресією водню, подачею азоту та підготовкою реагентів, модулем синтезу аміаку, системою відокремлення та збору продукту, а також автоматизованою системою моніторингу.

Для підтвердження коректності розробленої математичної моделі та оцінки ефективності алгоритмів модельно-прогнозного керування було створено експериментальну лабораторну установку, яка реалізує технологічний ланцюг виробництва зеленого водню та синтезу аміаку в малому масштабі. Основним елементом установки є PEM-електролізер із продуктивністю близько 300 мл H_2 /хв, що забезпечує потенційний вихід до 0,18 кг NH_3 на добу залежно від параметрів рециркуляції та режимів синтезу.

Експериментальна установка має модульну структуру та включає такі основні підсистеми:

- Гібридна система енергопостачання, яка об'єднує фотоелектричні панелі, акумуляторну батарею, мережеве резервне живлення та гібридний інвертор для балансування потоків електроенергії та стабілізації навантаження.

- PEM-електролізер, що виконує електрохімічне розкладання води з отриманням водню високої чистоти.

- Система буферного зберігання та компресії водню, яка забезпечує згладжування коливань у його подачі на подальші стадії процесу.

- Модуль синтезу аміаку за процесом Габера–Боша з можливістю регулювання основних технологічних параметрів (тиску, температури, співвідношення реагентів).

- Автоматизована система моніторингу та збору даних, що включає датчики тиску, температури, витрати газових потоків, а також електричних параметрів (напруга, сила струму, споживана та віддана потужність).

Під час експериментів здійснюється реєстрація часових рядів параметрів роботи кожної підсистеми. Отримані дані використовуються для калібрування математичної моделі, ідентифікації динамічних характеристик елементів системи, а також для оцінювання точності та стійкості алгоритмів модельно-прогнозного керування. На основі експериментальних вимірювань формуються регресійні та емпіричні залежності, що дозволяють врахувати реальні втрати, інерційність та межі робочих режимів обладнання.

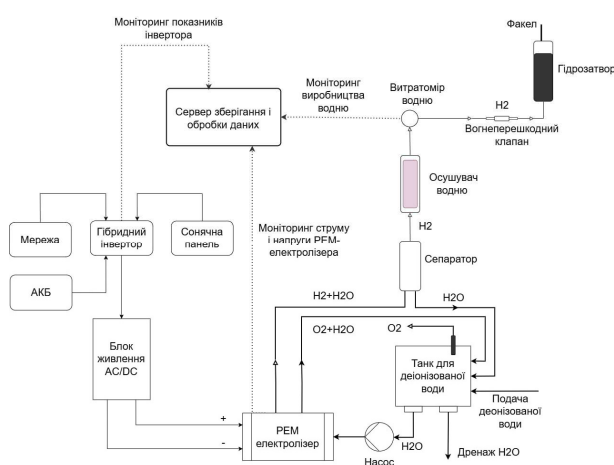


Рис. Схема лабораторної установки PEM-електролізу потужністю 300 мл/хв

Опис технологічної схеми лабораторної установки РЕМ-електролізу

Живлення установки здійснюється від гібридної енергетичної системи, яка включає фотоелектричну панель, акумуляторну батарею та гібридний інвертор, що працює в режимі SBU (Solar – Battery – Utility). У цьому режимі забезпечується пріоритетне використання енергії від сонячної панелі; у разі її недостатності живлення надходить від акумуляторної батареї, а при її розряді або відсутності сонячного випромінювання — від електромережі. Інвертор подає живлення на AC/DC-перетворювач, який живить установку постійним струмом з можливістю плавного регулювання сили струму до 20 А. Це дає змогу досліджувати роботу РЕМ-електролізера за різних навантажень.

До бака подається деіонізована вода, що відповідає вимогам до максимальної електропровідності не більше ніж 2 мкСм/см. Вода за допомогою насоса через фільтр очищення надходить до РЕМ-електролізера, у якому відбувається електролітичне розкладання води на водень і кисень.

Отримані продукти відводяться окремими каналами:

- кисень відводиться у атмосферу;
- водень проходить через осушувач на основі силікагелю, після чого надходить до масового витратоміра, який вимірює об'ємну витрату в діапазоні 0–500 мл/хв із точністю $\pm 1,5\%$.

Після вимірювання водень спрямовується через гідрозатвор і вогнеперешкодний клапан, які виконують функцію зворотного захисту, запобігаючи потраплянню повітря або полум'я назад у систему. На кінцевому етапі водень спалюється на факелі, що забезпечує безпечно відведення продуктів реакції.

Для підвищення безпеки всі силові лінії обладнані автоматичними вимикачами:

- між інвертором і акумуляторною батареєю — для захисту від перевантаження та короткого замикання;
- між мережею та інвертором — для захисту від перенапруги з боку мережі;
- між інвертором та електролізером — для оперативного відключення електролізера у разі несправності.

Моніторинг параметрів системи здійснюється за допомогою контролера Arduino UNO R4 Wi-Fi та датчиків, які вимірюють силу

струму та напругу на клеммах електролізера. Отримані дані передаються на сервер збору та обробки інформації по протоколу UART, де виконуються їх збереження і аналіз. Дані моніторингу виробництва водню, а також споживання енергії від фотоелектричної панелі, АКБ і мережі надходять на сервер по протоколу RS485.

Лабораторна установка забезпечує повний цикл виробництва водню використовуючи енергію сонячної генерації (окрім етапу очищення і деіонізації води).

Установка РЕМ-електролізу змонтована у металевому корпусі, який містить насос, бак для дистильованої води, фільтр, сепаратор і AC/DC-перетворювач для живлення електролізера (розрахований на максимальний струм 20 А) з можливістю регулювання сили струму. Містить виходи під кисень і водень (зовнішній діаметр 8мм, використовуються поліуретанові з'єднувальні трубки), дренажний отвір та отвір для подачі води.

Висновок. Було розроблено та створено установку синтезу зеленого аміаку лабораторного масштабу на основі РЕМ-електролізу та гібридної енергосистеми, яка дозволить реалізувати алгоритми MPC для селективного підведення енергії до установки. Запровадження MPC дозволить оптимізувати використання енергії з різних джерел живлення, забезпечуючи їх узгоджену роботу та стабільне енергопостачання за умов змінної сонячної генерації.

Література

1. International Energy Agency (IEA), *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: IEA, 2021.
2. European Commission, *The European Green Deal*. COM(2019) 640 final, Brussels, 2019.
3. European Commission, *A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe*. COM(2020) 301 final, Brussels, 2020.
4. Ministry of Energy of Ukraine, *Concept for the Development of Hydrogen Energy in Ukraine*. Kyiv, 2021. (in Ukrainian)
5. International Energy Agency (IEA), *Ammonia Technology Roadmap: Towards More Sustainable Nitrogen Fertilizer Production*. Paris: IEA, 2021.
6. X. Guo, F. Gu, H. Liu, Y. Yu, R. Li, and J. Wang, "Sustainable PV-hydrogen-storage microgrid energy management using a hierarchical economic model predictive control framework," *Energy Informatics*, vol. 8, no. 18, 2025.
7. Q. Li, X. L. Zou, Y. C. Pu, and W. R. Chen, "Real-time energy management method for electric-

- hydrogen hybrid energy storage microgrids based on DP-MPC,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 324–333, 2024.
8. M. A. Syed and M. Khalid, “An intelligent model predictive control strategy for stable solar–wind renewable power dispatch coupled with hydrogen electrolyzer and battery energy storage,” *International Journal of Energy Research*, vol. 2023, pp. 1–17, Mar. 2023, doi: 10.1155/2023/4531054.
 9. M. A. Syed and M. Kazerani, “A neural network-based model predictive approach for controlled electrochemical green ammonia production,” in *Proc. IECON 2024 - 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/IECON55916.2024.10905904.
 10. Y. Shihui, Z. Lu, Z. Liu, G. Zhao, and H. Liu, “Double-layer power optimisation and regulation method for hydro-photovoltaic hydrogen production ammonia synthesis coupling system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 248, p. 111887, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.epsr.2025.111887.

Bzovsky I.K., Serhiienko D.V., Tselishchev O.B., Kudryavtsev S.O., Loria M.H. Development of a laboratory installation for model-based control of energy supply in hybrid PEM–PV systems for green ammonia synthesis

The article is devoted to the development of a laboratory setup for researching methods of model-based predictive control of energy supply in hybrid energy technology systems for green ammonia synthesis based on PEM electrolysis and photovoltaic generation. The relevance of the work is due to the global transition to carbon-neutral energy and the growing role of green hydrogen and ammonia as strategic energy carriers. Unlike approaches focused on optimising individual subsystems, the study implements an integrated method for controlling the entire Power-to-Ammonia technological chain, taking into account the dynamics of energy flows, changes in weather and climate conditions, and fluctuations in electricity tariffs.

The proposed installation includes a hybrid power supply system (PV, storage battery, grid, hybrid inverter), a PEM electrolyser with a capacity of 300 ml H₂/min, a hydrogen buffer storage and compression module, an ammonia synthesis reactor based on the Haber-Bosch process, and an automated real-time

parameter monitoring system. Based on the collected experimental data, mathematical models are calibrated, the stability and accuracy of MPC algorithms are verified, and empirical dependencies are formed for further optimisation of operating modes.

In addition, model predictive control allows for the inertia of system elements, electrolyser degradation processes, and the instability of renewable energy generation to be taken into account, ensuring flexible adaptation of synthesis modes to external disturbances. The results obtained confirm the possibility of reducing the specific energy consumption of synthesis, improving the stability of the technological process, and ensuring a reliable energy supply under conditions of variable solar generation. The developed experimental basis is an instrumental platform for further research and scaling of the technology to an industrial level.

Keywords: green ammonia; PEM electrolysis; photovoltaic generation; model predictive control (MPC); hybrid energy system; digital twin; energy efficiency; Power-to-Ammonia.

Бзовський Ігор Костянтинович – аспірант факультету інженерії Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, asp-161-23-14@snu.edu.ua

Сергієнко Дмитро Васильович – аспірант факультету інженерії Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, sergienko_dmitri@ukr.net

Целішев Олексій Борисович – д.т.н., професор, проректор з наукової роботи, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, celishev@snu.edu.ua

Кудрявцев Сергій Олександрович – к.т.н., доцент, декан факультету інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, kudryavcevev@snu.edu.ua

Лорія Марина Геннадіївна – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп’ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, m_loria@snu.edu.ua

Статтю подано 08.09.2025.