DOI: 10.58254/viti.9.2026.12.151

УДК 004.942:621.865.8

Куцаєв В. В. ORCID: 0000-0001-8213-4739 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Семитківська І. В. ORCID: 0009-0000-9962-5032 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Скоропад С. І. ORCID: 0009-0002-3712-5301 (ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського)
Цимбал І. В. ORCID: 0000-0001-7294-3794 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ЗАСТОСУВАННЯ СИМУЛЯЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА GAZEBO ДЛЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті обґрунтовано доцільність застосування симуляційного середовища Gazebo як цифрового науково-експериментального полігону для дослідження автономних робототехнічних систем. Показано, що науковий потенціал Gazebo полягає не лише у візуалізації руху робота, а у створенні відтворюваного, параметризованого та метрично контрольованого середовища, у якому можуть бути задані модель світу, модель робота, сенсорна система, алгоритмічний стек, експериментальні сценарії, протокол дослідження та масив даних. Запропоновано методологічну схему Gazebo-експерименту у вигляді формалізованого дослідницького контуру, що поєднує фізичне моделювання, сенсорну генерацію даних, ROS2-інтеграцію, сценарне варіювання та кількісне оцінювання результатів.

Для підвищення доказовості симуляційного дослідження сформовано систему метрик, яка охоплює похибку локалізації, похибку побудови карти, час виконання місії, довжину траєкторії, кількість зіткнень, небезпечних зближень, перепланувань, частку успішних запусків та інтегральний показник ризику місії. Сформульовано леми про відтворюваність симуляційної конфігурації, метричне спостереження результатів і порівняння алгоритмічних конфігурацій, на основі яких запропоновано теорему про метричну валідність симуляційного експерименту в Gazebo.

Проведена модельна апробація на прикладі автономної навігації мобільного робота засвідчила закономірне погіршення показників ефективності за умов ускладнення сценаріїв і деградації сенсорної інформації. Отримані результати підтверджують можливість використання Gazebo як проміжної ланки між теоретичним моделюванням, програмною реалізацією алгоритмів і подальшою фізичною апробацією робототехнічних систем.

Ключові слова: *Gazebo, робототехнічні системи, симуляційне моделювання, ROS 2, SLAM, цифровий полігон, автономна навігація, сенсорне моделювання, sim-to-real.*

V. Kutsaiev, I. Semytkivska, S. Scoropad, I. Tsymbal. Application of the Gazebo simulation environment for scientific research in the field of robotic systems

The article substantiates the feasibility of using the Gazebo simulation environment as a digital scientific and experimental testbed for studying autonomous robotic systems. It is shown that the scientific potential of Gazebo lies not only in visualizing robot motion, but also in creating a reproducible, parameterized, and metrically controlled environment in which a world model, robot model, sensor system, algorithmic stack, experimental scenarios, research protocol, and data set can be explicitly defined. A methodological scheme of a Gazebo-based experiment is proposed as a formalized research loop that combines physical modeling, sensor data generation, ROS2 integration, scenario variation, and quantitative assessment of results.

To strengthen the evidential value of simulation-based research, a system of metrics is developed, including localization error, map-building error, mission completion time, path length, number of collisions, near-collision events, replanning operations, mission success rate, and an integral mission risk indicator. Lemmas on the reproducibility of the simulation configuration, metric observability of results, and comparability of algorithmic configurations are formulated. On this basis, a theorem on the metric validity of a simulation experiment in Gazebo is proposed.

A model-based approbation using the example of autonomous navigation of a mobile robot demonstrated a regular deterioration of performance indicators under increasing scenario complexity and degradation of sensor information. The obtained results confirm the possibility of using Gazebo as an intermediate methodological link between theoretical modeling, software implementation of algorithms, and subsequent physical validation of robotic systems.

Keywords: *Gazebo, robotic systems, simulation modeling, ROS 2, SLAM, digital polygon, autonomous navigation, sensor modeling, sim-to-real.*

Постановка проблеми. Сучасні наукові дослідження у сфері робототехнічних систем дедалі частіше потребують не лише теоретичного обґрунтування алгоритмів, а й їхньої багаторазової експериментальної перевірки в умовах наближених до реального фізичного середовища. Особливо це стосується автономної навігації, багатосенсорного сприйняття,

планування траєкторій, координації груп роботів, адаптивного керування та взаємодії робота з динамічними об’єктами. Проведення таких експериментів безпосередньо на фізичних роботах часто є дорогим, тривалим, технічно ризикованим і недостатньо відтворюваним [1]. У цьому контексті симуляційні середовища стають важливим елементом наукової методології.

Gazebo історично створювався як відкрите середовище для тривимірного динамічного моделювання багатороботних систем. У класичній праці [2] N. Koenig і A. Howard підкреслювалося, що Gazebo має заповнити нішу між простими двовимірними симуляторами та складними фізичними експериментами, забезпечуючи моделювання складних тривимірних середовищ для мобільних роботів. Сучасний Gazebo Sim розвиває цю ідею як відкрите середовище робототехнічної симуляції з підтримкою фізики, рендерингу, сенсорних моделей, графічного інтерфейсу, плагінів, асинхронного обміну повідомленнями та сервісів. Важливо також враховувати зміну технологічного контексту: Gazebo Classic досяг кінця життєвого циклу у січні 2025 року, тому для нових наукових досліджень доцільно орієнтуватися саме на сучасну лінійку Gazebo Sim та її інтеграцію з ROS 2.

Попри широке використання Gazebo в освітній та інженерній практиці, у наукових роботах його нерідко описують спрощено, лише як середовище для «перевірки роботи робота». Такий підхід не повністю розкриває його дослідницький потенціал. Gazebo може бути використаний як інструмент формування контрольованої експериментальної реальності, у якій дослідник має змогу задавати геометрію середовища, фізичні параметри об’єктів, моделі сенсорів, рівень шумів, сценарії руху перешкод, конфігурації роботів і програмні алгоритми керування.

Наукова проблема полягає у визначенні того, яким чином Gazebo може бути формалізований не лише як програмне забезпечення, а як елемент дослідницької методології: тобто як середовище для постановки гіпотези, побудови експериментального сценарію, збирання даних, кількісної оцінки результатів і підготовки алгоритмів до подальшої фізичної апробації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових джерел засвідчує, що симуляційні середовища стали одним із ключових інструментів сучасних досліджень у галузі робототехніки, автономних мобільних платформ, багатосенсорної навігації та алгоритмічного керування. Їхня роль полягає не лише у візуальній демонстрації поведінки робота, а й у забезпеченні контрольованої, відтворюваної та параметризованої експериментальної бази для перевірки наукових гіпотез. Однією з фундаментальних праць [2] з цієї теми є робота N. Koenig та A. Howard, у якій Gazebo було представлено як відкрите тривимірне динамічне середовище для багатороботної симуляції, призначене для відтворення складних умов функціонування мобільних роботів. Саме ця праця заклала методологічне підґрунтя для розуміння Gazebo як інструмента швидкої перевірки концепцій, стратегій і алгоритмів у робототехніці.

У сучасному технологічному контексті Gazebo розглядається вже не тільки як симулятор руху роботів, а як повноцінна відкрита платформа робототехнічної симуляції. Офіційна документація [3] Gazebo Sim визначає його як open-source robotics simulator, що надає користувачам можливості високоточного фізичного моделювання, рендерингу, сенсорних моделей, графічного інтерфейсу, плагінів, асинхронного обміну повідомленнями та сервісів. Така архітектура створює передумови для використання Gazebo як цифрового експериментального полігону, у якому можуть одночасно відтворюватися фізична динаміка робота, інформаційна картина середовища, робота сенсорів і керуюча логіка автономної системи.

Важливою тенденцією останніх років є перехід від Gazebo Classic до сучасної лінійки Gazebo Sim. За офіційними повідомленнями спільноти Gazebo [4], Gazebo Classic, зокрема Gazebo 11, досяг закінчення життєвого циклу 31 січня 2025 року, а користувачам рекомендовано переходити на сучасні LTS-версії Gazebo, зокрема Harmonic або Fortress.

Це має принципове значення для наукових досліджень, оскільки довгостроково відтворювані експерименти, навчальні курси, дисертаційні роботи та програмні прототипи доцільно будувати вже з урахуванням сучасної архітектури Gazebo Sim і ROS 2.

Окремий науково-технологічний напрямок пов'язаний з інтеграцією Gazebo та ROS 2. У роботі [5] S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette та W. Woodall ROS 2 розглядається як нове покоління робототехнічної програмної архітектури, орієнтованої на модульність, масштабованість, надійність, сенсорну обробку, планування, мобільність та автономність. У цьому контексті Gazebo перестає бути ізольованим середовищем моделювання і перетворюється на фізично-сенсорний шар ширшої робототехнічної екосистеми, у якій ROS 2 забезпечує комунікаційний, алгоритмічний та виконавчий рівні. Значна частина сучасних досліджень застосовує Gazebo для перевірки алгоритмів автономної навігації мобільних роботів [6]. У цьому контексті важливе місце посідає Navigation2, або Nav2, який є сучасним навігаційним стеком ROS 2 для мобільних роботів і дає змогу реалізовувати рух у складних середовищах із виконанням користувацьких завдань. Використання Gazebo разом із Nav2 створює основу для побудови відтворюваних експериментів, у яких можна оцінювати якість траєкторії, час досягнення цілі, кількість перепланувань, стабільність руху, уникання перешкод і поведінку робота за різних конфігурацій середовища.

Ще одним важливим напрямом є дослідження SLAM та картографування. У роботі [7] S. Macenski та I. Jambrecic, для задач SLAM у динамічному світі показаний інструмент SLAM Toolbox. У поєднанні з Gazebo такий інструментарій дозволяє створювати контрольовані експериментальні сцени, у яких еталонна геометрія середовища відома заздалегідь, а побудована роботом карта може бути кількісно порівняна з референтною моделлю. Це особливо важливо для наукових робіт, де необхідно не лише продемонструвати функціонування SLAM-алгоритму, а й оцінити його стійкість до шумів сенсорів, динамічних перешкод, неповних даних і змін структури середовища.

В українському науково-освітньому контексті окремої уваги заслуговує навчальний посібник [8] А. П. Бернацького, що присвячений практичному програмуванню робототехнічних систем із використанням симулятора Gazebo ROS, з акцентом на військове застосування. Науково-практична значущість зазначеного посібника полягає в тому, що Gazebo ROS у ньому розглядається не ізольовано, а як модульне середовище розробки автономних роботів, де кожен компонент системи може бути представлений окремим вузлом, що взаємодіє з іншими через стандартизовані комунікаційні механізми. На відміну від багатьох робіт, у яких Gazebo використовується переважно для перевірки окремого алгоритму навігації, SLAM, уникання перешкод або сенсорної конфігурації, А. Бернацький репрезентує ширший навчально-дослідницький підхід. Автор показує Gazebo ROS як середовище формування цілісної архітектури автономної та розподіленої робототехнічної системи. Це дозволяє пов'язати практичне програмування роботів із задачами сценарного моделювання, військово-технічної підготовки, багатороботної взаємодії, AI-підтримки та подальшої інженерної й науково-дослідної діяльності у сфері робототехніки.

Таким чином, наявні дослідження та публікації формують кілька взаємопов'язаних напрямів застосування Gazebo. Перший напрям пов'язаний із загальною ідеєю тривимірної багатороботної симуляції, започаткованою в ранніх роботах N. Koenig і A. Howard. Другий напрям стосується розвитку сучасного Gazebo Sim як відкритої платформи з фізичним, сенсорним і програмним рівнями моделювання. Третій напрям пов'язаний з інтеграцією Gazebo та ROS 2, що дозволяє створювати повний програмно-алгоритмічний стек автономного робота. Четвертий напрям охоплює прикладні дослідження навігації, SLAM, сенсорного сприйняття та багатороботної координації. П'ятий напрям, представлений зокрема роботою А. П. Бернацького, розширює застосування Gazebo у бік навчально-дослідницького, військово-прикладного та сценарно-орієнтованого моделювання робототехнічних систем.

Водночас аналіз джерел показує, що більшість робіт зосереджується або на технічних можливостях Gazebo, або на перевірці окремих алгоритмів. Незважаючи на значну кількість праць, присвячених використанню Gazebo для моделювання робототехнічних систем, недостатньо дослідженим залишається питання його методологічної формалізації як цілісної науково-експериментальної платформи. Наявні джерела переважно розкривають Gazebo як інструмент симуляції, перевірки окремих алгоритмів або навчального програмування роботів, тоді як подальшого розвитку потребує підхід, у межах якого Gazebo розглядається як відтворюване, параметризоване та метрично контрольоване середовище для постановки гіпотез, проведення серій експериментів, оцінювання невизначеності, порівняння алгоритмів і підготовки автономних робототехнічних систем до переходу від симуляційного до реального середовища.

Мета дослідження. Метою статті є обґрунтування застосування Gazebo як наукового інструменту для проведення експериментальних досліджень робототехнічних систем.

Виклад основного матеріалу. У сучасних дослідженнях робототехнічних систем Gazebo доцільно розглядати не лише як програмний симулятор для візуалізації руху робота, а як цифрове науково-експериментальне середовище, у межах якого дослідник може формувати контрольовані умови, задавати параметри середовища, моделювати фізичну поведінку робототехнічної платформи, відтворювати сенсорні потоки, інтегрувати алгоритми керування та здійснювати кількісну оцінку результатів. Такий підхід дозволяє перейти від демонстраційного використання Gazebo до його методологічного застосування як інструмента наукового експерименту. На відміну від фізичного полігону, де значна частина умов має випадковий або важко контрольований характер, Gazebo дозволяє створити параметризоване середовище, у якому кожна змінна може бути зафіксована, змінена або повторена в серії експериментів. Це є принципово важливим для наукових досліджень, оскільки забезпечує відтворюваність, порівнюваність і метричну контрольованість результатів.

У межах запропонованого підходу Gazebo виконує функцію цифрового експериментального полігону, який поєднує фізичне моделювання, сенсорну генерацію даних, програмно-алгоритмічне керування та аналітичну обробку результатів. Саме така інтеграція дозволяє використовувати Gazebo не лише для попереднього тестування роботів, а й для постановки наукових гіпотез, проведення серій експериментів, оцінювання ефективності алгоритмів і підготовки до подальшої фізичної апробації.

Методологічна схема дослідження в Gazebo має будуватися не як випадкова послідовність запуску симуляції, а як цілісний науковий експеримент, у якому визначаються об'єкт, предмет, гіпотеза, змінні, сценарії, метрики, протокол повторення та критерії інтерпретації результатів. У такій логіці Gazebo стає проміжною ланкою між математичною моделлю робототехнічної системи, програмною реалізацією алгоритму та майбутнім фізичним експериментом.

У загальному вигляді дослідницький контур у Gazebo можна подати як систему (1):

$$E_G = \langle W, R, S, A, C, M, P, D \rangle, \tag{1}$$

де W – модель симуляційного світу; R – модель робота або групи роботів; S – система сенсорів; A – алгоритмічний стек керування; C – набір експериментальних сценаріїв; M – система метрик оцінювання; P – протокол проведення експерименту; D – масив отриманих експериментальних даних.

Така формалізація дозволяє розглядати Gazebo не як допоміжну програмну оболонку, а як структуровану платформу наукового дослідження. Кожен елемент цієї системи має власну функцію: модель світу задає умови експерименту; модель робота визначає фізичні й кінематичні властивості платформи; сенсорна система формує інформаційний образ середовища; алгоритмічний стек забезпечує автономну поведінку; сценарії задають умови

перевірки; метрики дозволяють кількісно оцінити результат; протокол забезпечує повторюваність; дані створюють основу для подальшого аналізу. Візуалізація методологічної схеми Gazebo-експерименту показана на рис.1.

Для того щоб використання Gazebo у науковому дослідженні мало не лише демонстраційний, а й доказовий характер, результати симуляції повинні бути представлені через систему кількісних метрик. Сам факт успішного руху робота в середовищі Gazebo ще не є достатньою підставою для наукового висновку. Наукову цінність має не візуальне спостереження за поведінкою моделі, а можливість виміряти, порівняти й інтерпретувати цю поведінку за визначеними показниками.

У загальному вигляді систему метрик для оцінювання результатів експерименту в Gazebo можна подати як множину (2).

$$M = \{e_{loc}, e_{map}, T_{mission}, L_{path}, N_{coll}, N_{near}, N_{replan}, C_{cpu}, P_{succ}, R_{mission}\}, \quad (2)$$

де e_{loc} – похибка локалізації; e_{map} – похибка побудови карти; $T_{mission}$ – час виконання місії; L_{path} – фактична довжина траєкторії; N_{coll} – кількість зіткнень; N_{near} – кількість небезпечних зближень; N_{replan} – кількість перепланувань; C_{cpu} – обчислювальне навантаження; P_{succ} – частка успішних запусків; $R_{mission}$ – інтегральний показник ризику місії.

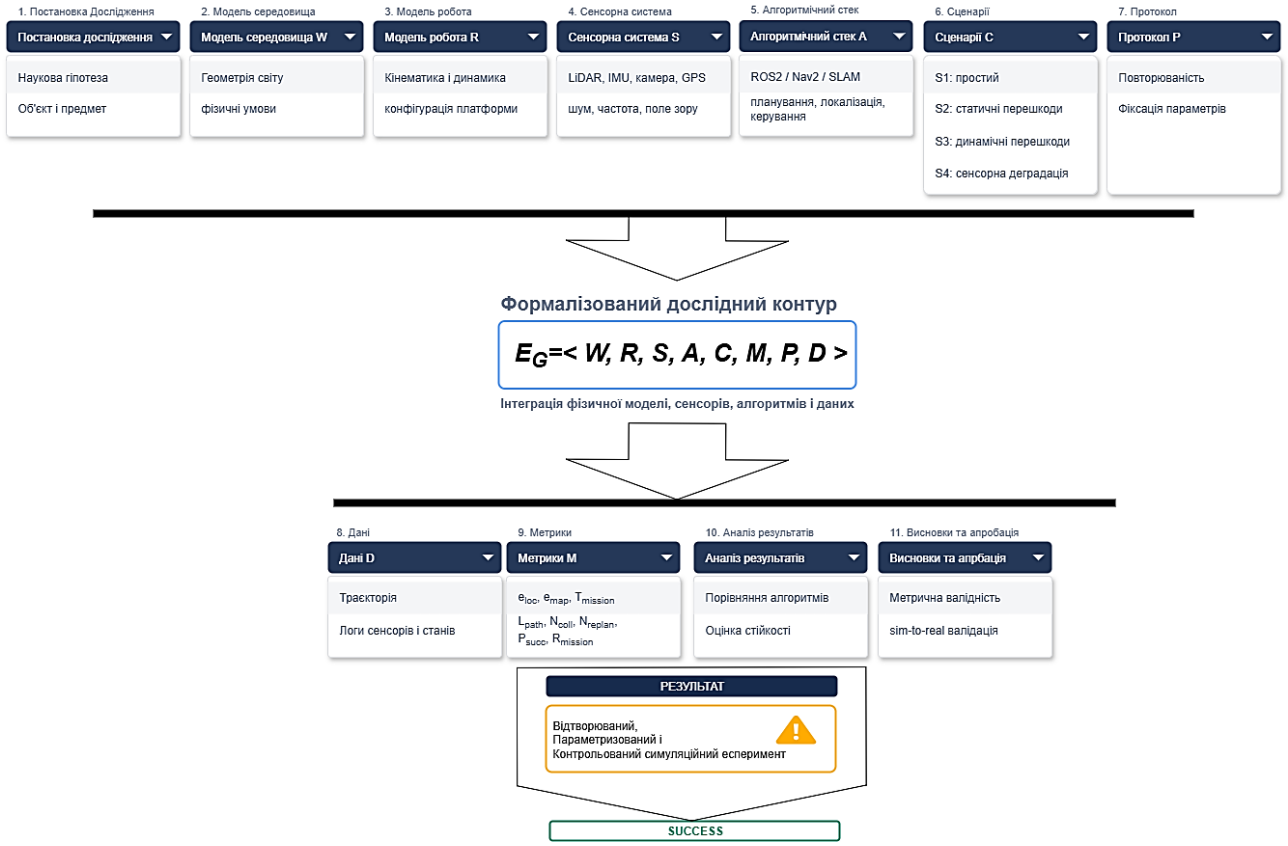

Рис. 1. Візуалізація методологічної схеми Gazebo-експерименту

Вибір конкретних метрик залежить від предмета дослідження. Для задач автономної навігації ключовими є час виконання місії, довжина траєкторії, кількість зіткнень, небезпечних зближень і перепланувань. Для задач SLAM основне значення мають похибка локалізації, похибка побудови карти, накопичення дрейфу та якість замикання циклів. Для багатороботних систем доцільно додатково враховувати ефективність координації, кількість

конфліктів траєкторій, час колективного виконання завдання, стійкість групи до втрати окремих агентів і якість обміну інформацією.

Частку успішного виконання місії можна визначити як (3):

$$P_{succ} = \frac{N_{total}}{N_{success}}, \tag{3}$$

де $N_{success}$ – кількість успішних запусків, у яких робот досяг цільової точки без порушення заданих обмежень, а N_total – загальна кількість запусків у відповідному сценарії. Цей показник дозволяє оцінювати не одиничний результат, а стабільність поведінки робототехнічної системи в серії повторюваних експериментів.

Для оцінювання надмірності траєкторії доцільно використовувати відносне збільшення довжини маршруту (4):

$$\Delta L = \frac{L_{path} - L_{ref}}{L_{ref}} \cdot 100\%, \tag{4}$$

де L_{path} – фактична довжина траєкторії, пройдена роботом у симуляційному середовищі, а L_{ref} – довжина еталонного або найкоротшого маршруту. Ця метрика дозволяє визначити, наскільки траєкторія робота відхиляється від оптимальної внаслідок перепланувань, уникання перешкод, нестабільності локального планувальника або динамічних змін середовища.

Для складніших сценаріїв доцільно вводити інтегральний показник ризику місії (5):

$$R_{mission} = \alpha N_{coll} + \beta_{Nnear} + \gamma \Delta L + \delta T_{norm}, \tag{5}$$

де N_{coll} – кількість зіткнень; N_{near} – кількість небезпечних зближень; ΔL – відносне збільшення довжини маршруту; T_{norm} – нормований час виконання місії; α, β, γ, δ – вагові коефіцієнти, що визначають значущість кожного компонента ризику. У такому вигляді показник $R_{mission}$ дозволяє перейти від аналізу окремих параметрів до узагальненої оцінки якості виконання завдання.

Разом із тим сама наявність метрик ще не гарантує наукової коректності експерименту. Необхідно, щоб симуляційна конфігурація була відтворюваною, результати є метрично спостережуваними, а порівняння алгоритмів буде методологічно коректним. Для формального обґрунтування цього положення доцільно ввести низку допоміжних тверджень.

Лема 1. Лема про відтворюваність симуляційної конфігурації

Якщо для експерименту в Gazebo зафіксовано модель світу *W*, модель робота *R*, сенсорну конфігурацію *S*, алгоритмічний стек *A*, сценарій *C*, систему метрик *M*, протокол проведення експерименту *P*, початкові умови та версії програмного забезпечення, тоді повторний запуск експерименту за тим самим протоколом забезпечує відтворюваність умов дослідження в межах заданої симуляційної моделі.

Формально це можна подати виразами (6; 7):

$$E_G^{(i)} = \langle W, R, S, A, C, M, P \rangle, \tag{6}$$

$$E_G^{(j)} = \langle W, R, S, A, C, M, P \rangle. \tag{7}$$

Отже, експерименти $E_G^{(i)}$ та $E_G^{(j)}$ є конфігураційно еквівалентними, якщо всі їхні визначальні компоненти збігаються.

Зміст цієї леми полягає в тому, що Gazebo дозволяє відокремити досліджувану змінну від фонових факторів. Якщо модель світу, модель робота, сенсори, сценарій, протокол і

початкові умови залишаються незмінними, то відмінності в результатах можуть бути пов'язані або з контрольовано введеною випадковістю, або з внутрішніми властивостями досліджуваного алгоритму. Це створює передумови для повторюваності експериментів і накопичення статистично значущих результатів.

Лема 2. Лема про метричну спостережуваність результатів

Якщо для експерименту визначено систему метрик M, а кожна метрика має однозначний спосіб обчислення на основі даних симуляції D, то результат експерименту може бути представлений не лише якісно, а й кількісно. Інакше кажучи, для кожного запуску експерименту існує відображення (8):

$$f: D \to M, \tag{8}$$

де D – масив даних, отриманих під час симуляції; M – множина обчислених показників.

Ця лема означає, що Gazebo дозволяє перейти від візуального спостереження за поведінкою робота до формалізованого аналізу результатів. Якщо під час симуляції фіксуються координати, траєкторія, час, стан сенсорів, команди керування, кількість зіткнень, перепланувань та інші параметри, то поведінка робототехнічної системи може бути оцінена за кількісними критеріями.

Лема 3. Лема про порівнюваність алгоритмічних конфігурацій

Нехай у двох експериментах E_{G1} та E_{G2} однаковими залишаються модель світу W, модель робота R, сенсорна система S, сценарій C, система метрик M і протокол P, але відрізняється алгоритмічний стек (9):

$$A1 \neq A2. \tag{9}$$

Тоді відмінності у значеннях метрик (10),

$$M(A_1) \neq M(A_2), \tag{10}$$

можуть бути використані для порівняльного оцінювання ефективності алгоритмів A_1 та A_2 у межах заданої симуляційної моделі.

Зміст цієї леми полягає в тому, що Gazebo дозволяє будувати коректні порівняльні експерименти. Якщо дослідник змінює лише алгоритм, залишаючи інші компоненти експерименту незмінними, то отримані відмінності в часі місії, довжині траєкторії, кількості зіткнень, кількості перепланувань, похибці локалізації або інтегральному ризику можуть інтерпретуватися як наслідок роботи відповідного алгоритмічного підходу.

Теорема про метричну валідність симуляційного експерименту в Gazebo

Якщо експеримент у Gazebo задано як систему (11)

$$E_G = \langle W, R, S, A, C, M, P, D \rangle, \tag{11}$$

де W – модель світу; R – модель робота; S – сенсорна система; A – алгоритмічний стек; C – сценарій; M – система метрик; P – протокол; D – дані є явно визначеними, відтворюваними та достатніми для обчислення всіх обраних метрик, то Gazebo може використовуватися як метрично валідне симуляційне середовище для порівняльного дослідження алгоритмів автономної робототехнічної системи в межах заданої моделі.

Інакше кажучи, за умови фіксації експериментальної конфігурації, визначення системи метрик і забезпечення збору необхідних даних результатів симуляції може бути використаний для науково обґрунтованого висновку про відносну ефективність алгоритмічних підходів у межах заданого класу сценаріїв.

Доведення:

За *лемою 1*, фіксація моделі світу, моделі робота, сенсорної конфігурації, сценарію, протоколу, початкових умов і версій програмного забезпечення забезпечує відтворюваність симуляційної конфігурації. Це означає, що експеримент може бути повторений у тій самій структурі, а результати не є наслідком неконтрольованої зміни умов середовища.

За *лемою 2*, якщо дані симуляції D дозволяють обчислити множину метрик M, то поведінка робототехнічної системи може бути представлена кількісно. Отже, результат експерименту не обмежується суб'єктивним візуальним спостереженням, а набуває формалізованого вигляду.

За *лемою 3*, якщо в серії експериментів змінюється лише алгоритмічний стек A, а інші компоненти залишаються незмінними, то відмінності у значеннях метрик можуть бути використані для порівняння алгоритмів. Це забезпечує можливість коректного порівняльного аналізу робототехнічних рішень у межах заданої симуляційної моделі.

Таким чином, для виконання зазначених умов Gazebo може бути використаний як метрично валідне середовище для симуляційного дослідження автономних робототехнічних систем. Теорему доведено.

Наслідок 1. Про Gazebo як цифровий експериментальний полігон

Якщо Gazebo забезпечує відтворюваність симуляційної конфігурації, метричну спостережуваність результатів і порівнюваність алгоритмічних конфігурацій, то він може бути інтерпретований як цифровий експериментальний полігон для дослідження автономних робототехнічних систем. Цей наслідок є методологічно важливим, оскільки дозволяє розглядати Gazebo не лише як програмний симулятор, а як структурований простір наукової перевірки, у якому експеримент має власну логіку, змінні, сценарії, метрики, протокол і критерії інтерпретації.

Наслідок 2. Про межі наукової інтерпретації результатів

Результати, отримані в Gazebo, є науково значущими в межах заданої симуляційної моделі, якщо всі параметри експерименту явно визначені, а метрики обчислюються за єдиним протоколом. Однак ці результати не повинні інтерпретуватися як повний еквівалент фізичного експерименту без додаткової перевірки на реальній робототехнічній платформі. Цей наслідок дозволяє уникнути головного методологічного ризику – надмірного ототожнення симуляційної поведінки з реальною поведінкою робототехнічної системи. Gazebo забезпечує внутрішню валідність симуляційного експерименту, але не гарантує автоматичного подолання sim-to-real gap.

Отже, система метрик у поєднанні з формально визначеними умовами відтворюваності, спостережуваності та порівнюваності дозволяє надати експериментам у Gazebo статусу науково обґрунтованої симуляційної валідації. У цьому полягає ключова методологічна відмінність між простим використанням Gazebo як середовища демонстрації та його застосуванням як цифрового науково-експериментального полігону.

Наукові переваги Gazebo доцільно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з умовами метричної валідності симуляційного експерименту. Тобто важливим є не лише те, що Gazebo дозволяє моделювати роботів, а те, що він забезпечує умови для відтворюваності, спостережуваності, порівнюваності та кількісного аналізу результатів. Однією з ключових переваг є відтворюваність експерименту. У фізичному середовищі складно повністю повторити одні й ті самі умови, оскільки змінюються освітлення, стан поверхні, заряд батарей, якість зчеплення коліс, положення об'єктів, зовнішні завади й інші чинники. У Gazebo дослідник може зберегти модель світу, параметри робота, початкові координати, сценарії руху перешкод і програмну конфігурацію, після чого багаторазово повторювати експеримент у контрольованих умовах. Другою перевагою є керованість змінних. Дослідник може цілеспрямовано змінювати лише один параметр, наприклад рівень шуму LiDAR, швидкість динамічної перешкоди, коефіцієнт тертя поверхні або тип локального планувальника,

залишаючи інші умови незмінними. Це створює можливість для коректного порівняння алгоритмів і виявлення причинно-наслідкових зв'язків між параметрами системи та її поведінкою. Третьою перевагою є метрична спостережуваність. У Gazebo можна фіксувати координати робота, траєкторію, швидкість, стан сенсорів, команди керування, кількість зіткнень, час виконання місії, кількість перепланувань та інші параметри. Це дозволяє перетворити поведінку робототехнічної системи на масив даних, придатний для подальшого кількісного аналізу. Четвертою перевагою є доступ до еталонних даних, або ground truth. У реальному експерименті точне положення робота, об'єктів і перешкод не завжди легко виміряти. У Gazebo дослідник може отримати істинні координати, орієнтацію, швидкість і стан об'єктів, що дозволяє кількісно оцінювати похибку локалізації, якість SLAM, точність детекції та відповідність запланованої траєкторії фактичній. П'ятою перевагою є безпека досліджень. Алгоритми автономного керування, особливо на ранніх етапах розробки, можуть містити помилки, які у фізичному середовищі можуть призвести до пошкодження обладнання, зіткнення з перешкодами або небезпечної поведінки робота. Gazebo дозволяє перевіряти такі алгоритми у віртуальному середовищі без ризику для людей, техніки та матеріальної бази. Шостою перевагою є масштабованість експериментів. У фізичному полігоні кількість роботів, сенсорів, сценаріїв і повторів часто обмежена ресурсами. У Gazebo можна створити серії експериментів із різною кількістю роботів, різними типами середовищ, десятками варіантів перешкод і різними налаштуваннями алгоритмів. Це особливо важливо для дослідження багатороботних систем, групової координації, ройової поведінки та сценарного моделювання. Сьомою перевагою є інтеграція з ROS/ROS 2, що дозволяє використовувати Gazebo як частину повного робототехнічного програмного стеку. Алгоритми, перевірені в симуляції, потенційно можуть бути перенесені на фізичну платформу з меншими змінами, ніж у випадку повністю ізольованого симулятора. Це створює передумови для реалізації логіки sim-to-real, у якій симуляція є проміжним етапом між теоретичною розробкою та фізичною апробацією. Таким чином, наукова перевага Gazebo полягає не лише в доступності чи зручності моделювання, а в тому, що він дозволяє побудувати відтворюваний, метрично спостережуваний і порівнюваний експериментальний контур. Саме ці властивості є підставою для розгляду Gazebo як цифрового науково-експериментального полігону.

Апробація запропонованого підходу. Для апробації запропонованої методологічної схеми доцільно використати модельний експеримент з автономної навігації мобільного робота в середовищі Gazebo. Такий експеримент є достатньо універсальним для академічної статті, водночас він дозволяє продемонструвати всі ключові елементи запропонованої методології: модель світу, модель робота, сенсори, алгоритмічний стек, сценарії, метрики, протокол і дані.

Метою апробації є перевірка можливості використання Gazebo як цифрового експериментального полігону для оцінювання поведінки мобільного робота під час виконання навігаційного завдання в середовищах різної складності. Як базову платформу можна використати диференціальний мобільний робот типу TurtleBot3 або узагальнену модель UGV із LiDAR, IMU та одометрією. Алгоритмічний стек може включати ROS 2, Nav2, SLAM Toolbox або попередньо побудовану карту, глобальний планувальник, локальний планувальник і вузол логування експериментальних даних.

Апробаційний експеримент доцільно побудувати на чотирьох сценаріях. Перший сценарій $S1$: просте середовище без динамічних перешкод, у якому робот рухається від стартової точки до цілі за заздалегідь побудованою картою. Другий сценарій $S2$: середовище зі статичними перешкодами, вузькими проходами та необхідністю локального перепланування. Третій сценарій $S3$: динамічне середовище, у якому з'являються рухомі об'єкти, що змушують робота змінювати траєкторію та адаптувати швидкість. Четвертий сценарій $S4$: середовище із деградацією сенсорної інформації, де вводяться шум LiDAR, пропуски одометрії або затримки оновлення даних.

Для кожного сценарію задається однакове навігаційне завдання: робот має перейти зі стартової точки P_s до цільової точки P_g, уникаючи зіткнень і дотримуючись обмежень швидкості. Кожен сценарій повторюється у серії запусків, що дозволяє оцінити не одиничну поведінку робота, а стабільність алгоритмічного стеку в заданому класі умов.

Результати апробації пропонується надати у такому форматі (табл. 1):

Таблиця 1

Пропозиція щодо формату апробаційних результатів

Сценарій	**Зміст сценарію**	**Основна перевірка**	**Очікувана дослідницька цінність**
S_1	Просте середовище без динамічних перешкод	Базова працездатність навігації	Перевірка коректності моделі, карти й навігаційного стеку
S_2	Статичні перешкоди та вузькі проходи	Локальне планування й уникання перешкод	Оцінка якості маршруту та перепланувань
S_3	Динамічні об'єкти в середовищі	Адаптивність руху	Оцінка стійкості до змінної обстановки
S_4	Сенсорний шум і затримки	Стійкість до невизначеності	Оцінка впливу деградації даних на результат

Для демонстрації застосовності запропонованої методологічної схеми було змодельовано результати серії експериментів автономної навігації мобільного робота в середовищі Gazebo. Умовно прийнято, що для кожного сценарію виконано $N_{total} = 20$ запусків. Еталонна довжина маршруту становила $L_{ref} = 10{,}0$ м. Як базовий час для нормування прийнято середній час виконання місії у простому середовищі S_1.

Інтегральний показник ризику місії (5) розраховано за формулою (12):

$$R_{mission} = 10N_{coll} + 0{,}8N_{near} + 0{,}05\Delta L + 2T_{norm}, \quad (12)$$

де N_{coll} – середня кількість зіткнень за один запуск; N_{near} – середня кількість небезпечних зближень; ΔL – відносне збільшення довжини маршруту, %; T_{norm} – нормований час виконання місії. Менше значення $R_{mission}$ відповідає меншому інтегральному ризику. Результати апробаційного експерименту наведені в таблиці 2.

Отримані результати демонструють очікувану залежність між складністю сценарію та ефективністю автономної навігації (рис. 2). У сценарії *S*1, що відповідає простому середовищу без динамічних перешкод, робот успішно виконав усі 20 запусків, а показник P_{succ} становив 1,00. Це свідчить про базову працездатність моделі робота, карти, сенсорної конфігурації та навігаційного стеку. У сценарії *S*2, де були введені статичні перешкоди та вузькі проходи, частка успішних запусків знизилася до 0,90. Одночасно зросли час виконання місії, довжина траєкторії, кількість перепланувань і показник ризику $R_{mission}$. Це вказує на те, що навіть статичне ускладнення середовища потребує активнішої роботи локального планувальника й збільшує навігаційну надмірність маршруту. У сценарії S3, що містив динамічні перешкоди, успішність знизилася до 0,75. Найбільш помітним є зростання кількості небезпечних зближень і перепланувань. Це свідчить про збільшення навантаження на локальний планувальник, який має адаптувати траєкторію в умовах змінної обстановки. Зростання $R_{mission}$ до 9,98 демонструє підвищення інтегрального ризику виконання місії.

Таблиця 2

Результати апробаційного експерименту

Сценарій	$\frac{N_{success}}{N_{total}}$	P_{succ}	$T_{mission}$, с	L_{path}, м	ΔL, %	N_{coll}	N_{near}	N_{replan}	$R_{mission}$
*S*1: просте середовище	20/20	1,00	42,0 ± 2,4	10,4 ± 0,3	4,0	0,00 ± 0,00	0,20 ± 0,40	1,1 ± 0,5	2,36
*S*2: статичні перешкоди	18/20	0,90	56,8 ± 4,9	11,6 ± 0,8	16,0	0,10 ± 0,31	1,35 ± 0,80	3,7 ± 1,1	5,58
*S*3: динамічні перешкоди	15/20	0,75	73,5 ± 8,7	13,0 ± 1,5	30,0	0,25 ± 0,44	3,10 ± 1,40	7,8 ± 2,0	9,98
*S*4: сенсорна деградація	12/20	0,60	84,2 ± 10,6	14,1 ± 1,8	41,0	0,40 ± 0,58	4,20 ± 1,70	10,4 ± 2,	13,42

Найскладнішим виявився сценарій *S*4, у якому моделювалася деградація сенсорної інформації. Частка успішних запусків знизилася до 0,60, а середній час виконання місії та довжина траєкторії досягли найбільших значень. Це пояснюється тим, що шум LiDAR, пропуски одометрії або затримки оновлення даних безпосередньо впливають на якість локалізації, стабільність планування та своєчасність реакції на перешкоди.

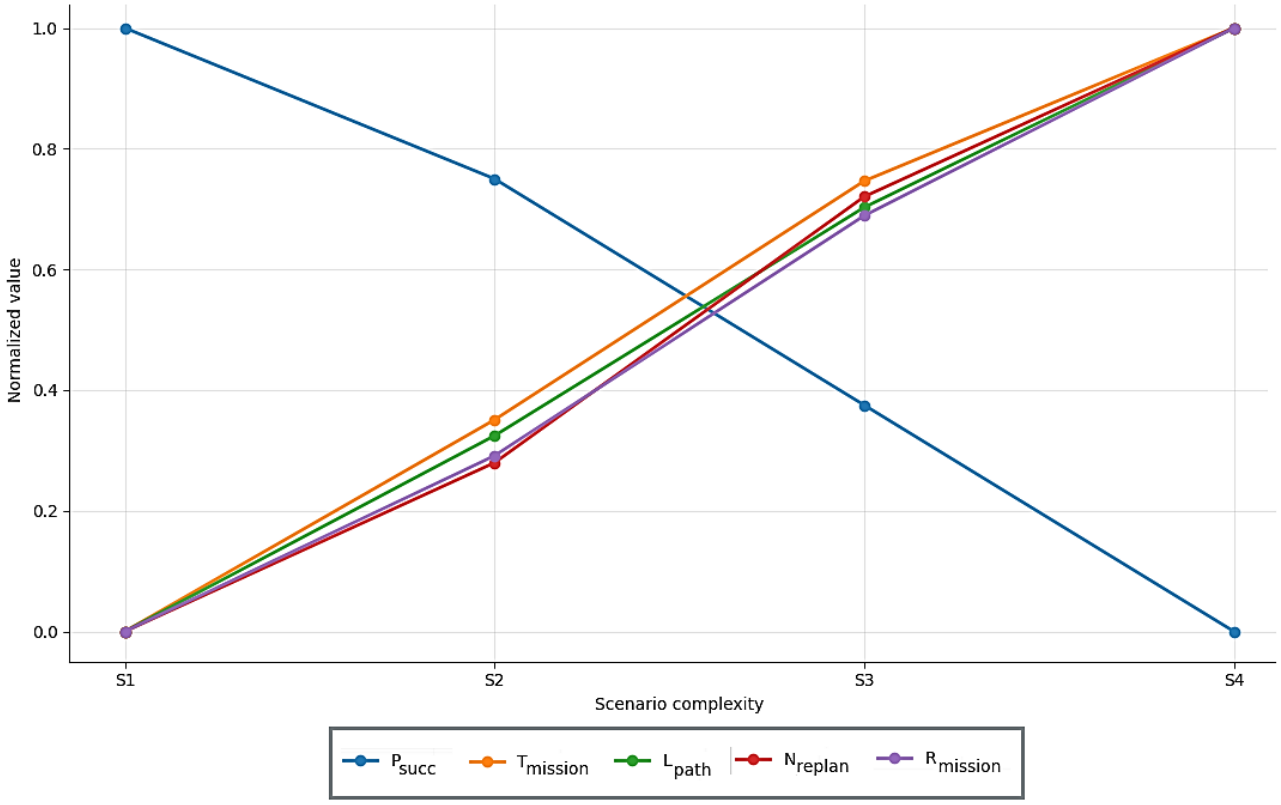

Рис. 2. Графік залежностей ключових показників від складності сценарію

За результатами проведеної апробації встановлено, що ускладнення симуляційного середовища призводить до послідовного зниження частки успішного виконання місії, збільшення часу проходження маршруту, зростання довжини траєкторії, кількості перепланувань, небезпечних зближень та інтегрального ризику місії. У простому сценарії *S*1 частка успішних запусків становила $P_{succ} = 1{,}00$, тоді як у сценарії із сенсорною деградацією

$S4$ цей показник знизився до $P_{succ} = 0{,}60$. Водночас інтегральний показник ризику $R_{mission}$ зріс з 2,36 до 13,42 умовних одиниць.

Отримана тенденція підтверджує методологічну доцільність використання Gazebo як цифрового експериментального полігону, оскільки середовище дозволяє не лише візуально спостерігати поведінку робота, а й кількісно оцінювати зміну ефективності автономної системи за різних умов. Застосування єдиної системи метрик дає змогу порівнювати сценарії між собою та визначати межі стійкості алгоритмічного стеку до ускладнення середовища й деградації сенсорної інформації.

Висновки та напрями подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність розгляду Gazebo не лише як програмного симулятора робототехнічних систем, а як цифрового науково-експериментального полігону, що забезпечує умови для відтворюваного, параметризованого та метрично контрольованого вивчення автономних робототехнічних систем. Показано, що його наукова цінність полягає не стільки у візуалізації поведінки робота, скільки у можливості формувати керовану симуляційну реальність, у якій можуть бути явно задані модель світу, модель робота, сенсорна система, алгоритмічний стек, сценарії, метрики, протокол дослідження та масив експериментальних даних. Запропонована методологічна схема дозволяє представити експеримент у Gazebo як формалізовану систему, у межах якої кожен елемент виконує окрему дослідницьку функцію: середовище задає умови перевірки, робототехнічна модель визначає фізичні й кінематичні властивості платформи, сенсорна система формує інформаційний образ середовища, алгоритмічний стек забезпечує автономну поведінку, а система метрик створює підстави для кількісної інтерпретації результатів. Такий підхід дає змогу перейти від простого твердження про працездатність алгоритму в симуляції до науково обґрунтованого висновку про те, за яких умов, з якою точністю, стійкістю, повторюваністю та обмеженнями робототехнічна система демонструє задану поведінку.

У межах роботи запропоновано систему метрик для оцінювання симуляційного експерименту, що включає показники похибки локалізації, якості побудови карти, часу виконання місії, довжини траєкторії, кількості зіткнень, небезпечних зближень, перепланувань, обчислювального навантаження, частки успішних запусків та інтегрального ризику місії. Формальне введення лем про відтворюваність симуляційної конфігурації, метричну спостережуваність результатів і порівнюваність алгоритмічних конфігурацій дозволило сформулювати теорему про метричну валідність симуляційного експерименту в Gazebo. Її зміст полягає в тому, що за умови явного визначення моделі, сценарію, протоколу, метрик і даних Gazebo може використовуватися як метрично валідне середовище для порівняльного дослідження алгоритмів автономної робототехнічної системи в межах заданої симуляційної моделі. Модельна апробація запропонованого підходу на прикладі автономної навігації мобільного робота показала, що ускладнення сценаріїв закономірно призводить до зниження частки успішного виконання місії, збільшення часу проходження маршруту, зростання довжини траєкторії, кількості перепланувань, небезпечних зближень та інтегрального ризику. Отримана тенденція підтверджує, що Gazebo може бути використаний не лише для демонстраційного запуску робототехнічної моделі, а й для кількісного аналізу стійкості автономної системи до ускладнення середовища, динамічних перешкод і деградації сенсорної інформації.

Водночас результати, отримані в Gazebo, мають інтерпретуватися з належною науковою обережністю. Запропонована метрична валідність стосується насамперед внутрішньої коректності симуляційного експерименту, а не повної фізичної еквівалентності симуляції та реального середовища. Тому Gazebo не повинен розглядатися як повна заміна фізичного експерименту, однак може виступати ефективним проміжним рівнем між теоретичним моделюванням, програмною реалізацією алгоритмів і подальшою апробацією на реальній робототехнічній платформі.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на проведення поглибленої експериментальної апробації запропонованої методології у Gazebo Sim із використанням ROS 2, Nav2, SLAM Toolbox та кастомних моделей мобільних роботів або НРК. Перспективним є розширення системи сценаріїв, деталізація інтегрального показника ризику місії, порівняння різних алгоритмічних стеків, поширення підходу на багатороботні системи, інтеграція Gazebo з цифровими двійниками й алгоритмами штучного інтелекту, а також вивчення sim-to-real переходу шляхом зіставлення симуляційних результатів із фізичними випробуваннями. У підсумку Gazebo може бути визначений як методологічний міст між теорією, алгоритмічною реалізацією та практичною перевіркою автономних робототехнічних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Perisic A., Perisic B. Digital Twins Verification and Validation Approach through the Quintuple Helix Conceptual Framework. Electronics. 2024. Vol. 13, No. 16. Article 3303.

2. Koenig N., Howard A. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Sendai, Japan, 2004. Vol. 3. P. 2149–2154. DOI: 10.1109/IROS.2004.1389727.

3. Gazebo Sim: A Robotic Simulator [Електронний ресурс] // Gazebo Documentation. Gazebo Project. URL: https://gazebosim.org/libs/sim/.

4. Scott K. Gazebo Classic and Citadel End of Life [x-post Gazebo Sim Community] / K. Scott // Open Robotics Discourse. ROS General. 2024. December 2. URL: https://discourse.openrobotics.org/t/gazebo-classic-and-citadel-end-of-life-x-post-gazebo-sim-community/40931

5. Macenski S. Robot Operating System 2: Design, Architecture, and Uses In The Wild / S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, W. Woodall // Science Robotics. 2022. Vol. 7, No. 66. DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074.

6. Nav2 – Nav2 1.0.0 documentation [Електронний ресурс] // Nav2 Documentation. Open Navigation LLC, 2026. URL: https://docs.nav2.org/

7. Macenski S. SLAM Toolbox: SLAM for the dynamic world / S. Macenski, I. Jambrecic // Journal of Open Source Software. 2021. Vol. 6, No. 61. Article 2783. DOI: 10.21105/joss.02783. URL: https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.02783

8. Бернацький А. П. Практичне програмування роботів: Gazebo Military Edition : навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2025. 232 с. ISBN 978-617-8739-10-2.

Надійшла до редколегії 20.04.2026
Схвалена до друку 22.05.2026.
Дата публікації 29.05.2026.