

О. С. Проскурін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, просп. Академіка Глушкова, 42, Київ, 03680, Україна

Концепція розподіленої ROS-системи для автоматизації дистанційних операцій з паливовмісними матеріалами на об'єкті «Укриття»

Ключові слова:

об'єкт «Укриття»,
лавоподібні паливовмісні
матеріали,
ROS,
роботизовані системи,
цифровий двійник,
SLAM,
дистанційне керування

Проблема вилучення лавоподібних паливовмісних матеріалів із об'єкта «Укриття» характеризується екстремальними радіаційними умовами (до 10^3 – 10^4 Р/год) та складною геометрією приміщень. Традиційне телеуправління роботизованими комплексами супроводжується проблемами низької ситуаційної обізнаності оператора, високим когнітивним навантаженням та ризиком помилок. Закриті пропрієтарні системи ускладнюють інтеграцію та адаптацію. Запропоновано концепцію нової розподіленої архітектури для автоматизації дистанційних операцій, що базується на відкритому фреймворку Robot Operating System (ROS2). Система передбачає розділення обчислювальних рівнів: високопродуктивний центральний сервер у безпечній зоні для задач планування, навігації та обробки даних, а також радіаційно стійкі мікроконтролери (з використанням micro-ROS) безпосередньо на виконавчих модулях. Запропоновано гібридний навігаційний підхід, що поєднує методи SLAM, AMCL, фільтрацію EKF/UKF та інноваційний механізм корекції позиції відносно цифрового двійника (Digital Twin Alignment). Наведено результати проміжної експериментальної апробації концепції на функціональному прототипі, що підтвердили життєздатність архітектури та надійність комунікаційного стеку (micro-ROS).

Вступ

Проблема вилучення лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ) в об'єкті «Укриття» Чорнобильської АЕС є одним із найскладніших та найкритичніших викликів у сучасній ядерній інженерії. У підреакторних приміщеннях об'єкта, за різними оцінками, накопичено близько 180 т опроміненого палива, що входить до складу приблизно 1250 т ЛПВМ. Рівні радіації у місцях їхньої локалізації сягають 10^3 – 10^4 Р/год, що повністю виключає можливість перебування людини.

Жорсткі радіаційні умови, складна геометрія завалів та приміщень суттєво обмежують ефектив-

ність традиційних демонтажних операцій. Існуюча практика використання дистанційно керованої техніки (телеуправління) спирається виключно на візуальну інформацію з камер. Це створює низку фундаментальних проблем: низьку ситуаційну поінформованість оператора, складність у сприйнятті тривимірного простору, оцінці відстаней та взаємного розташування об'єктів. Як наслідок, це призводить до збільшення тривалості виконання операцій, високого когнітивного навантаження на оператора та підвищеного ризику помилок.

Більше того, значна частина роботизованих рішень, що застосовуються в ядерній галузі, працюють на основі пропрієтарного програмного забезпечення.

© О. С. Проскурін, 2025. License CC BY 4.0

Їхні закриті інтерфейси ускладнюють інтеграцію з іншими сенсорами, унеможливають швидку адаптацію до мінливих умов середовища та впровадження сучасних алгоритмів автоматизації.

Таким чином, постає нагальна потреба в розробці принципово нових підходів до автоматизації дистанційних операцій. Такі підходи мають мінімізувати участь людини, забезпечувати високу точність та надійність, а також мати гнучку, відкриту та масштабовану архітектуру. Використання сучасних фреймворків, таких як Robot Operating System (ROS), у поєднанні з концепцією цифрового двійника (Digital Twin), відкриває перспективи для створення роботизованих систем нового покоління, здатних виконувати завдання в екстремальних умовах об'єкта «Укриття».

Стан проблеми

Перехід від прямого телеуправління до супервізорного (напіваавтономного) контролю є світовим трендом у робототехніці для небезпечних середовищ. Основою для таких систем де-факто став фреймворк ROS, а згодом його нова ітерація — ROS2. Як зазначено в [1], ROS2 був розроблений з урахуванням вимог до надійності, безпеки та роботи в реальному часі, що є критичним для промислових та ядерних застосувань. Проблематика навігації роботів у радіаційно забруднених зонах активно досліджується. А. West [2] пропонує використання багатопланових карт витрат (layered costmaps) для уникнення іонізуючого випромінювання, інтегруючи дозиметричні дані безпосередньо в навігаційний стек ROS, зокрема через реалізацію, продемонстровану в дослідженні К. Groves [3]. Це дослідження демонструє підходи до автономної розвідки невідомого ядерного середовища з використанням радіаційно орієнтованої навігації, що дозволяє роботу автономно будувати карту радіаційного фону.

Водночас ключовою технологією для підвищення ситуаційної обізнаності та безпеки стає концепція цифрового двійника (Digital Twin, DT). У ядерній галузі DT дозволяє проводити моделювання, планування операцій та тренування персоналу без ризику [4]. У [5] аналізують можливості та виклики застосування DT у критично важливих для безпеки робототехнічних додатках, підкреслюючи його роль у верифікації та валідації поведінки системи.

На відміну від підходів [5], що використовують DT переважно для верифікації планів, наведена робота пропонує механізм для прямої корекції

навігаційної похибки в реальному часі шляхом зіставлення з еталонною моделлю двійника. Це дослідження спрямоване на пошук комплексного рішення, яке б об'єднувало:

- 1) розподілену архітектуру (ROS2 на сервері та micro-ROS на радіаційно стійких контролерах);
- 2) гібридний навігаційний стек, що поєднує SLAM/AMCL із корекцією відносно еталонного цифрового двійника (DT Alignment);
- 3) відкриту та модульну платформу, специфічно адаптовану для завдань з вилучення ЛПБМ в умовах об'єкта «Укриття». Наше дослідження [6] є одним із кроків у напрямку створення такої інтегрованої системи.

Постановка завдань дослідження

Метою цієї роботи є розробка та обґрунтування концепції розподіленої робототехнічної системи на базі ROS2 для автоматизації дистанційних операцій із ЛПБМ у межах об'єкта «Укриття». Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

- 1) розробити ієрархічну програмно-апаратну архітектуру, що розділяє високо- та низькорівневі обчислення для роботи в умовах підвищеної радіації;
- 2) розробити гібридний навігаційний стек, що інтегрує методи SLAM, AMCL та механізм вирівнювання відносно цифрового двійника (DT Alignment);
- 3) інтегрувати модулі системи (сервер, контролери, сенсори) з використанням відкритих протоколів ROS2 та micro-ROS;
- 4) провести експериментальну валідацію ключових компонентів архітектури, зокрема надійності зв'язку micro-ROS, на функціональному прототипі.

Архітектура системи

Запропонована система (рис. 1) має ієрархічну розподілену архітектуру, побудовану на базі фреймворку ROS2. Фундаментальною основою ROS2 є стандарт промислового рівня DDS (Data Distribution Service). Це забезпечує децентралізовану комунікацію peer-to-peer (P2P) між усіма компонентами системи (вузлами), а не жорстку клієнт-серверну модель. Архітектура логічно розділена на два рівні.

1. *Високий рівень (обчислювальні вузли).* Це набір вузлів ROS2, що можуть бути розподілені на одному або декількох комп'ютерах у безпечній зоні. У поточній реалізації це один сервер, що виконує складні обчислення: SLAM, локалізацію (AMCL), планування траєкторій (Nav2 Stack, MoveIt 2), фільтрацію (EKF/

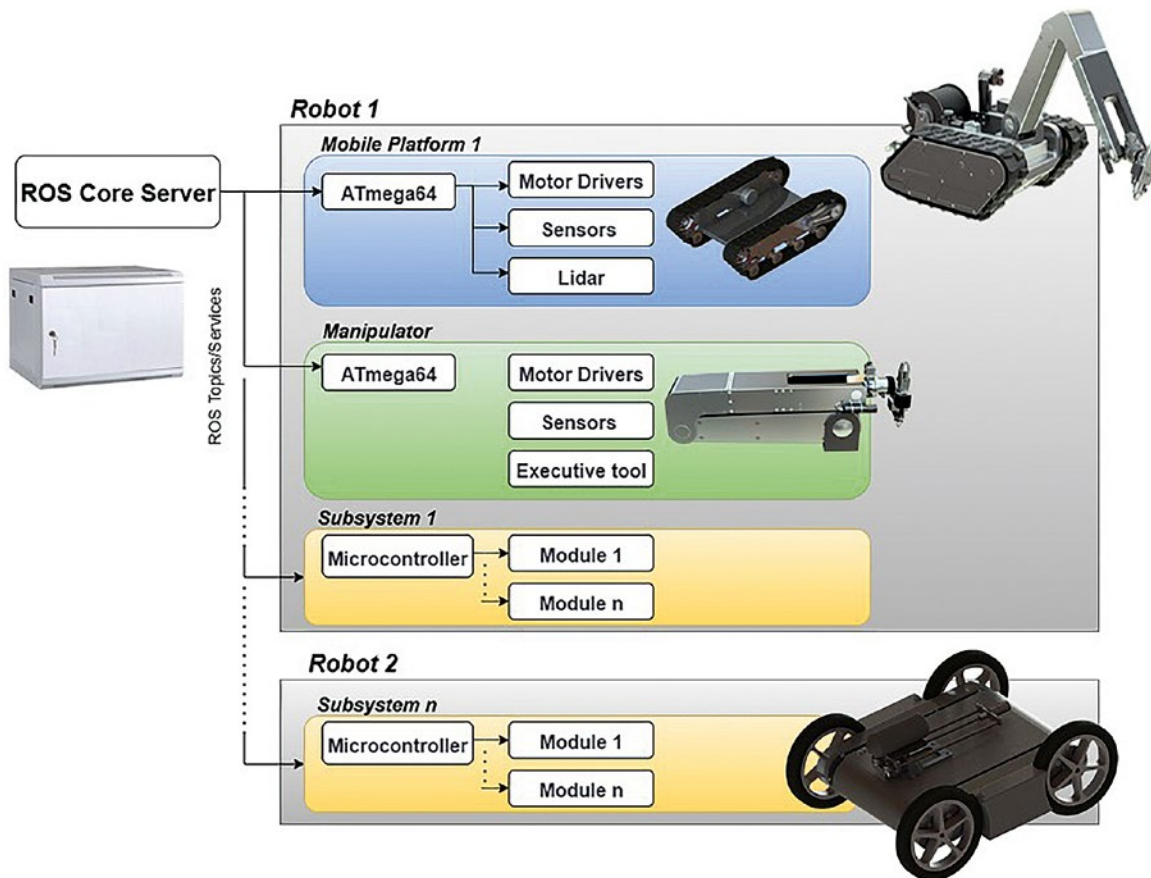


Рис. 1. Структура розподіленої ROS-системи

UKF), візуалізацію (RViz) та взаємодію з цифровим двійником. Завдяки DDS така архітектура є масштабованою: додаткові високорівневі контролери (наприклад, окремий вузол для AI-аналізу, станція оператора) можуть бути легко додані до мережі та взаємодіяти з іншими вузлами напряму.

2. *Низький рівень (контролери)*. Радіаційно стійкі мікроконтролери (наприклад, ATmega64; у прототипі — ESP32), розташовані безпосередньо на роботі. Вони виконують завдання в реальному часі: пряме управління виконавчими механізмами (драйвери двигунів, сервоприводи) та збір «сирих» даних із датчиків (LiDAR, IMU, енкодери).

3. *Комунікаційний міст (micro-ROS)*. Зв'язок між високим та низьким рівнями забезпечується через micro-ROS agent. Цей агент діє як міст, що транслює повідомлення DDS у протокол micro-ROS RTPS (Real-Time Publish-Subscribe) для мікроконтролерів. Це дає змогу низькорівневим контролерам «нативно» публікувати (publish) дані сенсорів у загальну мережу DDS та підписуватися (subscribe) на топіки команд.

Апаратна конфігурація робота описується у форматі URDF (Unified Robot Description Format), що слу-

гує «цифровим паспортом» платформи. URDF визначає кінематичну модель, візуальні та колізійні моделі ланок, а також положення сенсорів. Це дозволяє вузлу robot_state_publisher автоматично розраховувати та публікувати трансформації (TF) між усіма компонентами робота. Кінематична конфігурація описується гомогенною матрицею трансформації T :

$$T = \prod_{i=1}^n A_i(\theta_i), \quad (1)$$

де A_i — матриця трансформації для i -го з'єднання; θ_i — поточне значення кута або зміщення.

Взаємодія високорівневих вузлів (рис. 2) відбувається повністю через P2P-механізми DDS (топіки, сервіси, трансформації TF). Наприклад, вузол robot_state_publisher використовує модель URDF та дані про стан з'єднань (що надходять від вузла micro-ROS agent) для публікації дерева трансформацій (TF). На це TF-дерево підписуються інші незалежні вузли: Nav2 Stack та MoveIt 2. Nav2 Stack підписується на дані сенсорів (наприклад, топік /pointcloud2) та дані про одометрію (від вузла robot_localization) для побудови карти перешкод (Costmap). Він публікує команди

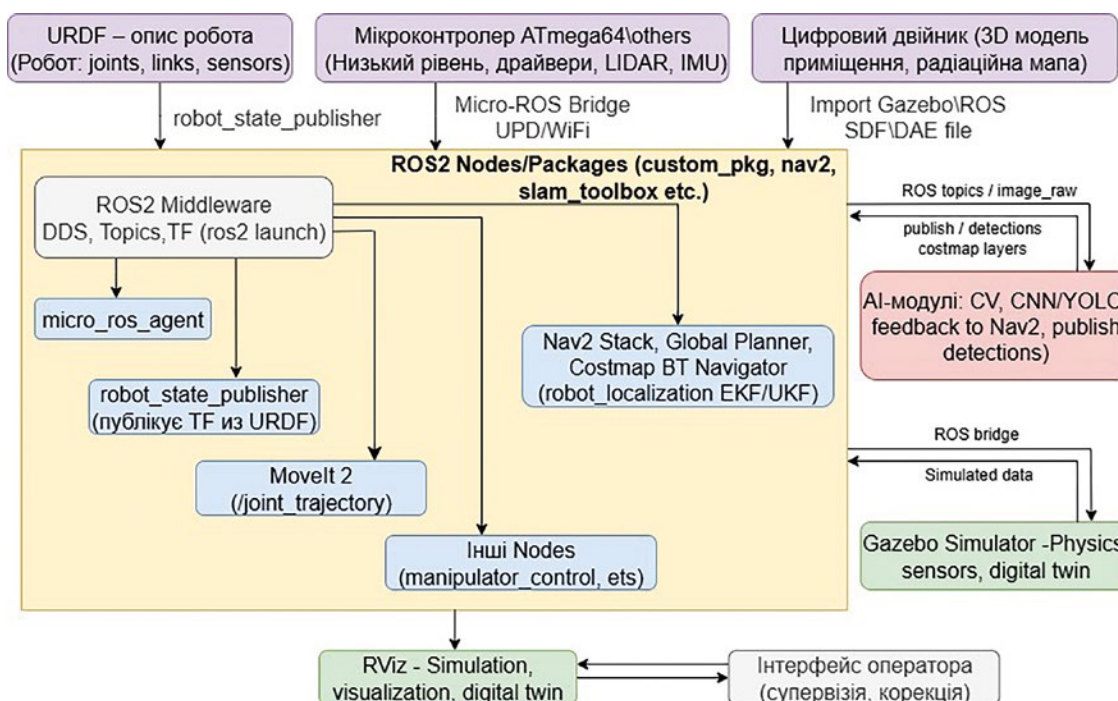


Рис. 2. Схема архітектури розподіленої системи ROS2

керування швидкістю (топик /cmd_vel), на які підписаний micro-ROS agent. Аналогічно MoveIt 2 планує траєкторії для маніпулятора (топик /joint_trajectory).

Гібридний навігаційний стек

Для навігації в складних умовах об'єкта «Укриття» запропоновано гібридний підхід (рис. 3), що комбінує декілька алгоритмів для досягнення робастності та точності.

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Використовується на етапі розвідки для створення динамічних 2D/3D-карт приміщень у процесі руху (наприклад, пакети slam_toolbox або Cartographer).

AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization). Використовується для локалізації на вже наявній статичній карті. Це адаптивний частинковий фільтр, що постійно коригує оцінку позиції робота.

Sensor Fusion (EKF/UKF). Для отримання гладкої та стабільної оцінки одометрії використовується пакет robot_localization, що реалізує розширений фільтр Калмана (EKF). Він поєднує дані з різних джерел (одометрія коліс, IMU, візуальна одометрія, дані SLAM/AMCL). Система описується нелінійними функціями стану f та спостереження h :

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k) + \omega_k, z_k = h(x_k) + v_k, \quad (2)$$

де x_k — вектор стану (положення, орієнтація); u_k — керуюча команда; z_k — вимірювання; ω_k, v_k — гауссові шуми. EKF лінеаризує ці функції для отримання оцінки стану.

Digital Twin Alignment (вирівнювання по DT). Для боротьби з накопиченням похибки (дрейфом) SLAM та EKF запроваджено механізм корекції відносно еталонної CAD-моделі приміщення (цифрового двійника). Хмара точок p від поточних даних LiDAR

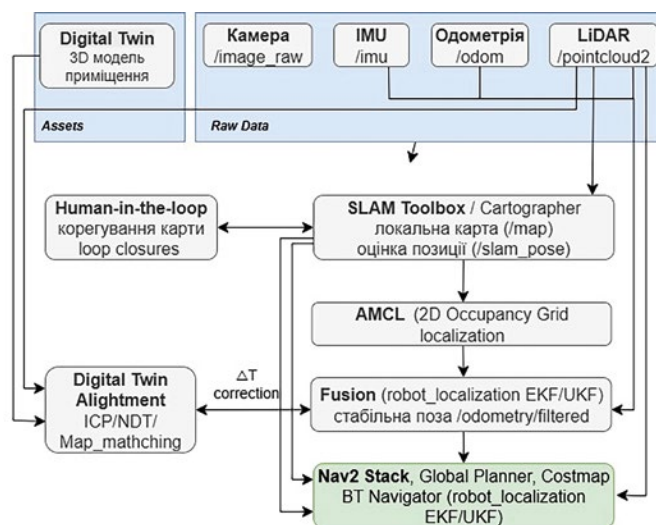


Рис. 3. Схема формування навігаційного стеку

зіставляється з еталонною моделлю q за допомогою алгоритмів ICP (Iterative Closest Point) або NDT (Normal Distributions Transform). Шукається жорстка трансформація, $T = \{R, t\}$, що мінімізує середньоквадратичну відстань:

$$T^* = \arg \min \sum_{i=1}^N \|Rp_i + t - q_{i(match)}\|^2. \quad (3)$$

Ця корекція (ΔT) періодично «виправляє» позицію робота на глобальній карті.

Human-in-the-loop. Система надає оператору можливість через інтерфейс RViz коректувати помилки замикання петель SLAM або анотувати семантичні області (наприклад, ЛПБМ) на карті.

Інтерпретація та апробація результатів

На проміжному етапі дослідження було проведено розробку та апробацію функціонального прототипу для валідації ключових аспектів запропонованої архітектури.

Було зібрано прототип (рис. 4), що складається з: мобільної платформи на гусеничному ходу; високорівневого сервера (мікрокомп'ютер Steam Deck з Ubuntu 24.04 та ROS2 Noble), що виконує роль центрального сервера;

низькорівневих контролерів (ESP32), що під'єднуються через micro-ROS agent для управління приводами та збору даних;

сенсорного комплексу (LiDAR RPLIDAR A1M8) та маніпулятора.

Результати тестування представлено нижче.

1. *Верифікація архітектури ROS/micro-ROS.* Проведено тестування надійності зв'язку між ESP32 (агент) та Steam Deck (сервер) через Wi-Fi. Експерименти показали стабільну передачу даних з'єднання. Це підтверджує високу надійність обраного підходу для комунікації між розподіленими вузлами.

2. *Інтеграція сенсорів та приводів.* Дані з LiDAR коректно публікувалися в ROS2 топіки, що є передумовою для роботи SLAM-алгоритмів. Управління руховою установкою (через драйвери BTS7960) та маніпулятором (сервоприводи) успішно здійснювалося через стандартні повідомлення ROS2 (/cmd_vel, /joint_trajectory).

3. *Візуалізація та цифровий двійник.* Моделі платформи та маніпулятора були коректно описані в URDF-файлах, що дало змогу налаштувати їх візуалізацію в RViz та симуляцію в Gazebo.

Проміжні результати демонструють успішне розв'язання поставлених завдань щодо розробки та валідації розподіленої ROS-системи. Створено та протестовано функціональний прототип, що підтверджує життєздатність запропонованої архітектури та надійність програмно-апаратного стеку.

Висновки

Запропоновано та обґрунтовано концепцію розподіленої робототехнічної системи на базі ROS2 та

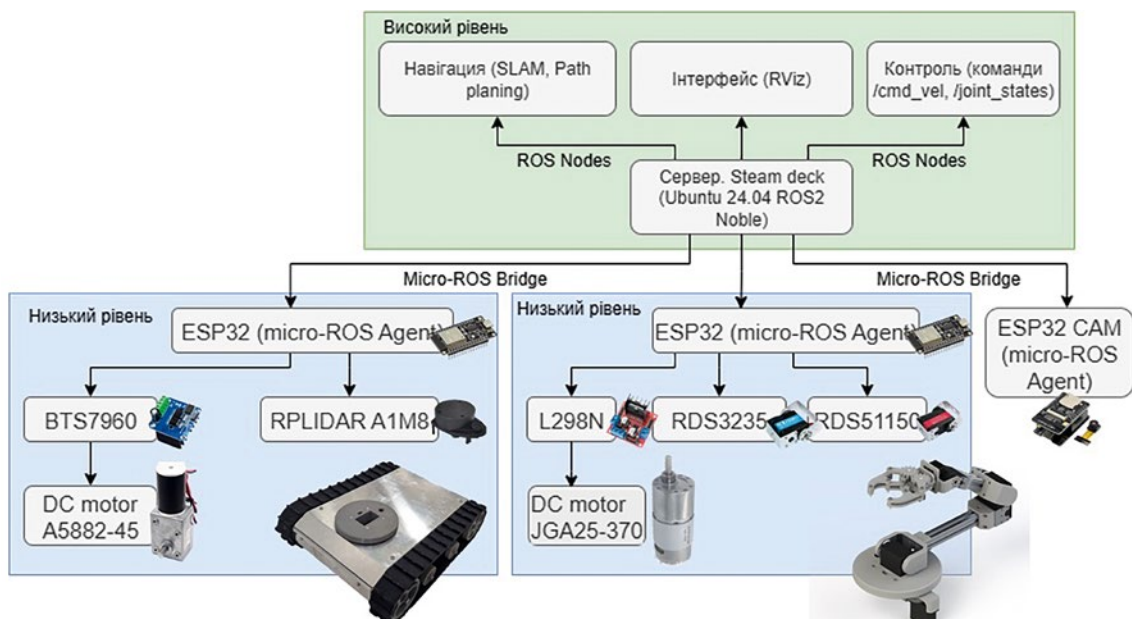


Рис. 4. Тестова платформа та її компоненти

micro-ROS, яка є ефективним рішенням для автоматизації дистанційних операцій з ЛПБМ в екстремальних умовах об'єкта «Укриття». Розроблена ієрархічна архітектура, що розділяє обчислювальні рівні, дозволяє винести складні обчислення у безпечну зону, залишаючи на борту лише радіаційно стійкі низькорівневі контролери. Експериментально підтверджено працездатність архітектурної концепції на функціональному прототипі; зокрема досягнуто низької затримки комунікаційного каналу micro-ROS, що є критичною передумовою для систем реального часу. Крім того, використання гібридного навігаційного стеку, доповненого механізмом вирівнювання по цифровому двійнику (Digital Twin Alignment), значно підвищує ситуаційну обізнаність оператора та створює основу для реалізації напіваавтономного (супервізорного) виконання завдань. Модульність та використання відкритих стандартів (ROS2) забезпечують гнучкість, масштабованість та легкість інтеграції нового обладнання, що є перевагою над закритими пропрієтарними системами.

Подальші дослідження будуть зосереджені на комплексній валідації навігаційних алгоритмів (SLAM/AMCL) на прототипі з інтегрованим IMU-сенсором, а також на кількісній оцінці точності локалізації під час використання методу Digital Twin Alignment.

Список використаної літератури

1. Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild / S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey [et al.] // Science Robotics. – 2020. – Vol. 5, No. 49. – eabm6074. – doi.org/10.1126/scirobotics.abm6074.
2. West A. Real-time avoidance of ionising radiation using layered costmaps for mobile robots / A. West // Frontiers in Robotics and AI. – 2022. – Vol. 9. – Art. 862067. – doi.org/10.3389/frobt.2022.862067.
3. Robotic exploration of an unknown nuclear environment using radiation informed autonomous navigation / K. Groves, E. Hernandez, A. West [et al.] // Robotics. – 2021. – Vol. 10, No. 2. – Art. 78. – doi.org/10.3390/robotics10020078.
4. Kochunas B. Digital Twin concepts with uncertainty for nuclear power applications / B. Kochunas, X. Huan // Energies. 2021. – Vol. 14. – Art. 4235. – doi.org/10.3390/en14144235.
5. Baidya S. Digital Twin in safety-critical robotics applications: Opportunities and challenges / S. Baidya, S. K. Das // arXiv. – 2022. – arXiv:2210.03520.
6. Multi-robot radiation reconnaissance in the Chornobyl NPP Exclusion Zone / M. Saveliev, V. Shtefan, O. Proskurin [et al.] // Nuclear and Radiation Safety. – 2024. – Vol. 4 (104). – P. 41–49. – doi.org/10.32918/nrs.2024.4(104).05.

O. S. Proskurin

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 36a, Kirova St., Chornobyl, 07270, Ukraine
Institute of Mathematical Machines and Systems Problems, NAS
of Ukraine, 42, Akademika Hlushkova Ave, Kyiv, 03680, Ukraine*

The Distributed ROS-Based System Concept for Automation of Remote Operations with Fuel-Containing Materials at the Shelter Object

The problem of extracting lava-like fuel-containing materials (LFCM) from the Shelter object is characterized by extreme radiation conditions (up to 10^3 – 10^4 R/h) and complex facility geometry. Traditional teleoperation of robotic systems faces challenges of low operator situational awareness, high cognitive load, and a significant risk of error. Closed, proprietary systems further complicate integration and adaptation. This paper proposes a novel distributed architecture concept for automating remote operations, based on the open-source Robot Operating System (ROS2) framework. The system features a separation of computational levels: a high-performance central server in a safe zone for planning, navigation, and data processing tasks, and radiation-hardened microcontrollers (utilizing micro-ROS) directly on the actuator modules. A hybrid navigation approach is proposed, combining SLAM and AMCL methods, EKF/UKF filtering, and an innovative position correction mechanism based on Digital Twin Alignment. The results of an intermediate experimental validation of the concept on a functional prototype are presented, confirming the architecture's viability and the reliability of the communication stack (micro-ROS).

Keywords: Shelter object, LFCM, ROS, robotic systems, digital twin, SLAM, remote operation.

References

1. Macenski S., Foote T., Gerkey B., Lalancette C., Smart W.D. (2020). Robot Operating System 2: Design, architecture, and

- uses in the wild. *Science Robotics*, vol. 5 (49), eabm6074. doi.org/10.1126/scirobotics.abm6074.
2. West A. (2022). Real-time avoidance of ionising radiation using layered costmaps for mobile robots. *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 9, art. 862067. doi.org/10.3389/frobt.2022.862067.
3. Groves K., Hernandez E., West A., Wright T., Lennox B. (2021). Robotic exploration of an unknown nuclear environment using radiation informed autonomous navigation. *Robotics*, vol. 10 (2), art. 78. doi.org/10.3390/robotics10020078.
4. Kochunas B., Huan X. (2021). Digital Twin concepts with uncertainty for nuclear power applications. *Energies*, vol. 14, art. 4235. doi.org/10.3390/en14144235.
5. Baidya S., Das S. K. (2022). Digital Twin in safety-critical robotics applications: Opportunities and challenges. arXiv: 2210.03520.
6. Saveliev M., Shtefan V., Proskurin O., Pantin M., Martin P. G., Grechaninov, V., Havrylko Ye. (2024). Multi-robot radiation reconnaissance in the Chornobyl NPP Exclusion Zone. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 4 (104), pp. 41–49. doi.org/10.32918/nrs.2024.4(104).05.

Надійшла / Received 07.11.2025

Рекомендована до друку / Accepted 16.11.2025