



МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РОБАСТНОСТІ ТА ЖИВУЧОСТІ МОБІЛЬНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ПЛАТФОРМ З УРАХУВАННЯМ НАДІЙНОСТІ

Вступ. Розроблено комплексну модель надійності, робастності та живучості мобільної роботизованої платформи (МРП) із послідовно-паралельною архітектурою. Метою роботи є проведення математичного моделювання й аналізу надійності елементів МРП на основі законів розподілу Вейбулла й експоненціального закону, а також оцінювання впливу резервування та структурної надмірності на загальну стійкість системи до відмов. Встановлено, що критичними елементами МРП є: шасі, двигун, контролер, оскільки вони послідовно з'єднані та мають низький рівень відмовостійкості без резервування, на відміну від паралельно з'єднаних сенсорних і комунікаційних компонентів.

Методи. До методів належать такі: методи розрахунку надійності з використанням послідовно-паралельних схем; оцінювання часу безвідмовної роботи (МТТФ); моделювання з використанням розподілу Вейбулла й експоненціального розподілу; чутливості для аналізу впливу елементів на надійність системи; оцінювання робастності та живучості системи в умовах змін середовища або несправностей.

Результати. На основі побудованих моделей отримано числові значення МТТФ для всіх елементів МРП. Найвищі показники безвідмовної роботи зафіксовано для шасі (135 412 год) та акумуляторної батареї (124 914 год), тоді як найменшу надійність демонструють комунікаційні модулі Wi-Fi (80 000 год) та BLE (70 000 год). Значення МТТФ усієї МРП становить 21 188 год, близько 2,4 року безперервної експлуатації.

Побудовані графіки чутливості показали, що найбільший вплив на загальну надійність мають шасі, контролер і двигун. Вони є пріоритетними для резервування або створення деградованих режимів. Робастність системи за однієї відмови ($\Delta \leq 1$) оцінено через зниження ймовірності безвідмовної роботи. Проте із часом (понад 100 000 год) надійність знижується нижче 5%, що підкреслює важливість обліку зносу компонентів. Для підвищення живучості МРП має працювати за відмови до двох платформ, планувати маршрути за надійністю, підтримувати деградований режим і динамічно перерозподіляти завдання.

Висновки. Запропонована модель дає змогу з високою точністю оцінювати надійність МРП з урахуванням її структури, типу з'єднань і функціональних особливостей елементів. Результати вказують на необхідність резервування критичних компонентів і підвищення робастності системи для забезпечення стійкості до відмов. Представлену методику можна використовувати для планування сервісного обслуговування, прогнозування життєвого циклу й оптимізації роботи МРП у динамічному середовищі.

Ключові слова: мобільна роботизована платформа (МРП), надійність, робастність, послідовно-паралельна структура, чутливість компонентів, оптимізація маршрутів.

Вступ

Все частіше сучасні промислові підприємства використовують мобільні роботизовані платформи (МРП). Такі платформи часто ефективно застосовують у логістиці, автоматизації виробничих процесів для забезпечення гнучкості виробництва. Проте в таких умовах МРП піддаються підвищеним ризикам щодо відмови компонентів через різноманітні причини, наприклад пил, вібрації, електромагнітні завади тощо. Це негативно впливає на їхню надійність і безперервність роботи всієї системи МРП у внутрішньологістичних системах промислових підприємств.

Традиційні підходи до оцінювання надійності часто не враховують взаємозв'язків між підсистемами, резервування й адаптивні стратегії розгортання роботизованих платформ. У зв'язку із цим постає необхідність у розробленні комплексної моделі оцінювання робастності системи МРП, яка дозволить:

- оцінювати вплив надійності окремих компонентів (датчиків, зв'язку, шасі, обчислювачів) на загальну працездатність;
- забезпечити прийняття інженерних рішень щодо вибору конфігурацій і рівня резервування для досягнення заданої готовності МРП.

Постановка задачі – розробити математичну модель оцінювання робастності та живучості МРП з урахуванням надійності компонентів та умов готовності в промисловому середовищі.

Основні завдання:

1. Проаналізувати архітектуру МРП та її критичні підсистеми (сенсори, виконавчі механізми, комунікації, обчислювальні модулі) з погляду відмовостійкості.
2. Побудувати модель надійності окремої платформи, використовуючи розподіли Вейбулла й експоненціальні моделі для компонентів.
3. Сформулювати математичну модель системи з умовою готовності типу "m з n", що описує робастність і живучість у вигляді ймовірності працездатності за наявності не менше ніж m справних платформ.
4. Розробити програмний засіб для обчислення та візуалізації функцій надійності, інтенсивності відмов, очікуваного часу безвідмовної роботи, а також дослідження впливу параметрів компонентів на загальну робастність і живучість.
5. Провести чисельне моделювання й аналіз сценаріїв роботи МРП у промисловому середовищі з урахуванням характерних значень МТТФ, МТBF, $\lambda(t)$ та інших показників.
6. Сформулювати рекомендації щодо архітектурних рішень, що підвищують робастність і живучість МРП у реальних умовах експлуатації.



Огляд літературних джерел. Публікацію (Luo, 2023) присвячено забезпеченню безпечної та робастної автономії в системах із великою кількістю роботів, що діють у складних і змінних середовищах. Автори пропонують підходи до стійкої взаємодії між гетерогенними роботами та людьми з урахуванням можливих збоїв у зв'язку та відмовами роботів. Наукова новизна полягає у поєднанні безпеки та робастності для досягнення коректної поведінки роботів ще на етапі проектування. В роботі Stetter (2022) розглянуто підхід до підвищення відмовостійкості технічних систем шляхом цілеспрямованого проектування, зокрема й на прикладі автоматизованого транспортного засобу (AGV). Автори описують методичну основу, алгоритми й інструменти, що дозволяють інтегрувати діагностичність, керованість і структурну надмірність уже на етапі розроблення продукту. Наукова новизна полягає у створенні системного підходу до fault-tolerant design, який охоплює як концептуальні, так і геометричні аспекти технічних рішень, сприяючи підвищенню прозорості й ефективності інженерного проектування.

Автори (Fazlollahatabar et al., 2017) моделюють надійність складних систем автономних роботів у виробничих умовах шляхом розроблення методів оцінювання й оптимізації надійності. Їх розробили за допомогою блок-схем надійності, дерев відмов і стохастичних процесів, приділяючи особливу увагу критичним компонентам роботизованих систем. Наукова новизна роботи полягає в інтеграції дерева рішень за критерієм ризику з вартісним аналізом, а також у застосуванні комбінованих підходів для структурно-логічного аналізу складних роботизованих систем. В роботі (Bensaid Amrani et al., 2023) розглянуто прогнозування надійності мехатронних систем на етапі проектування, що є ключовим для зменшення витрат і кількості прототипів. Автори аналізують існуючі кількісні та якісні підходи до моделювання надійності з урахуванням особливостей мехатроніки як динамічної, інтерактивної, а також конфігурувальні системи. Наукова новизна полягає в критичному огляді сучасних методологій прогнозування надійності та виявленні їхніх слабких місць для подальшого розвитку нових підходів і інструментів.

В роботі Betzer et al. (2024) представлено аналіз надійної роботи автономного мобільного робота в умовах невизначеності за допомогою цифрового двійника, який здійснює верифікацію поведінки робота в режимі реального часу. Автори використовують протокол MQTT і систему моніторингу TeSSLa для виявлення відхилень у роботі, пов'язаних із шумами датчиків і змінами навколишнього середовища. Наукова новизна полягає у впровадженні хмарного цифрового двійника як "наглядового" механізму, здатного не лише аналізувати, а і втручатися в управління роботом у разі загрози порушення вимог безпеки чи продуктивності.

У публікації Panchal (2023) запропоновано двофазну методику оцінювання надійності турбінного агрегату цукрового заводу на основі інтуїтивно-нечіткої логіки (Intuitionistic Fuzzy) та підходу Lambda-Tau. Автори застосували вирази серійно-паралельного з'єднання для розрахунку показників надійності з урахуванням функцій належності та неналежності, що дозволяє враховувати розмитість і невизначеність вхідних даних. Наукова новизна полягає у використанні інтуїтивно-нечіткої логіки для точнішого моделювання впливу зміни розкиду значень на доступність системи та планування її технічного обслуговування.

Грунтовний огляд сучасного стану систем керування з відмовостійкістю (FTCS), зокрема і їх типів, методів реалізації та сфер застосування представлено у публікації (Amin, & Hasan, 2019). Автори аналізують активні, пасивні та гібридні підходи до Fault Tolerant Control, а також розглядають типові відмови сенсорів і виконавчих механізмів, питання стабільності та надійності таких систем. Наукова новизна полягає в систематизації новітніх розробок і виявленні актуальних наукових прогалин, що слугує орієнтиром для подальших досліджень у сфері FTCS.

У публікації Maza (2025) розглядається нова проблема керування двосторонніми AGV у разі збоїв сенсорів, зокрема в умовах часткової втрати спостережуваності подій. Автори пропонують подієво-орієнтовану архітектуру керування на основі теорії супервізорного керування (SCT), доповнену діагностичним шаром для підвищення відмовостійкості системи. Наукова новизна полягає у синтезі керуючих автоматів, які враховують інформацію з діагностичних автоматів, що дозволяє уникати тупикових ситуацій навіть за умов сенсорних порушень, а також у використанні стохастичних таймованих автоматів для оцінювання ймовірності безвідмовної роботи. У дослідженні (Purwaningsih et al., 2025) проаналізовано перехід від напівручного транспортування матеріалів до повністю автоматизованої системи на основі AGV у виробничих умовах країн, що розвиваються. За допомогою моделювання дискретних подій і теорії черг оцінено ефективність, витрати та якість продукції для трьох сценаріїв: ручне керування, 2 та 3 AGV. Наукова новизна полягає у кількісному обґрунтуванні переваг впровадження AGV на детермінованих виробничих лініях, що дозволяє підвищити надійність системи й обґрунтовано приймати управлінські рішення. У публікації (Cai et al., 2024) досліджено надійність визначення відносного кута між AGV та ціллю за допомогою методу Angle-of-Arrival із використанням IoT-сенсорів від TI та u-blox відповідно до стандарту Bluetooth 5.1. Проведено порівняльне оцінювання точності сенсорів у симуляції та реальних умовах, після чого кращий варіант інтегровано в систему навігації AGV. Наукова новизна полягає в першому систематичному аналізі застосування AoA-сенсорів для зовнішньої навігації AGV, що відкриває перспективи їхнього використання в складних реальних середовищах. Автори роботи Zheng et al. (2024) розглянули проблему ненадійності Wi-Fi-зв'язку в системах AGV у промисловому середовищі та запропонували альтернативне рішення на основі протоколу WIA-FA. Дослідники розробили нову структуру суперкадрів і стратегію повторної передачі SSER, що забезпечує впорядковану та надійну передачу даних між AGV і мережею. Наукова новизна полягає у впровадженні послідовного розкладу передачі, який динамічно оптимізує фазу підйому та спуску даних, значно покращуючи надійність зв'язку у складних умовах. У статті (Li, & Schulze, 2024) запропоновано підхід до підвищення надійності та доступності AGV-систем у виробничому середовищі за допомогою прогнозного технічного обслуговування на базі нейронної мережі з довготривалою короткочасною пам'яттю (LSTM). Метод дозволяє аналізувати історичні дані, виявляти закономірності та передбачати потенційні відмови або потребу в обслуговуванні компонентів AGV та суміжного обладнання. Наукова новизна полягає у впровадженні AI-методу для проактивного керування технічним станом AGV-систем, що забезпечує мінімізацію простоїв і підвищення ефективності виробництва. У публікації (Yin et al., 2023) розроблено метод планування маршруту для автономних наземних транспортних засобів (AGV), що враховує не лише оптимальність шляху, а і його надійність в умовах складного рельєфу та ймовірних відмов. Автори інтегрували фізично обґрунтоване моделювання динаміки руху з аналізом надійності мобільності AGV, застосували методи сурогатного моделювання й алгоритм



RRT*. Наукова новизна полягає в поєднанні аналізу ймовірнісних відмов мобільності з алгоритмічним плануванням траєкторії, що дозволяє прокладати безпечні маршрути у невизначених позашляхових умовах.

Методи

Надійність МРП описує поведінку окремих її компонентів або всієї системи в нормальних умовах. Робастність враховує структурну надмірність, резервування, адаптацію та стійкість до збоїв. Тому висока робастність системи дає змогу підтримувати задану надійність навіть за виходу з ладу окремих компонентів. Тобто робастність – це архітектурна властивість, яка не гарантує відсутність відмов, але зменшує їхній вплив. Живучість відображає здатність системи зберігати функціональність і ефективність роботи навіть за наявності множинних пошкоджень або тривалого впливу несприятливих умов, забезпечуючи швидке відновлення або адаптацію до нових обставин.

Модель надійності окремої платформи будують на основі основних підсистем МРП. До них належать: шасі, двигун, контролер, які з'єднані послідовно, та камера, лідар, комунікація, які з'єднані паралельно. Якщо в послідовно з'єднаних підсистемах немає резервування, то вони мають низький рівень відмовостійкості. Паралельно з'єднані елементи мають вищу відмовостійкість за рахунок надлишковості. Тому критичними елементами є: двигун, шасі, контролер. Вони потребують структурного резервування або деградованого режиму для підвищення надійності.

За функціональним блоком компоненти МРП можна класифікувати за підсистемами і з'єднанням (табл. 1).

Таблиця 1

Класифікація компонентів МРП за підсистемами і з'єднанням

Компонент	Підсистема	Функціональність	Тип з'єднання	Критичність	Примітка
Акумуляторна батарея	Енергетична	Живлення всіх компонентів МРП	Послідовне	Висока	Без живлення система не функціонує
Шасі	Механічна / мобільність	Основа структури, несна конструкція	Послідовне	Висока	Вихід з ладу = повна зупинка МРП
Двигун	Виконавча	Приводить платформу в рух	Послідовне	Висока	Вихід з ладу двигуна = втрата рухливості
Контролер	Обчислювальна	Керування, прийняття рішень	Послідовне	Висока	Відповідає за процес управління всіма підсистемами
Камера	Сенсорна	Візуальна навігація	Паралельне	Середня	Використовується у парі з лідаром або як резерв
LIDAR	Сенсорна	Обхід перешкод, побудова карти	Паралельне	Середня	Може працювати без камери або навпаки
Wi-Fi / BLE	Комунікаційна	Передача даних, зв'язок із мережею	Паралельне	Середня	Використовуються як дублювальні канали

Розглядається модель надійності МРП середнього класу, тобто це автоматизований транспортний засіб масою близько 600 кг, що складається з елементів із розподілом Вейбулла та експоненціальним розподілом часу до відмови. Елементи, що з'єднані послідовно: акумуляторна батарея, шасі, двигун, контролер. Елементи, які з'єднані паралельно: камера, лідар і комунікація (Wi-Fi, BLE). Архітектура МРП має послідовно-паралельну структуру і зображена на рис. 1.

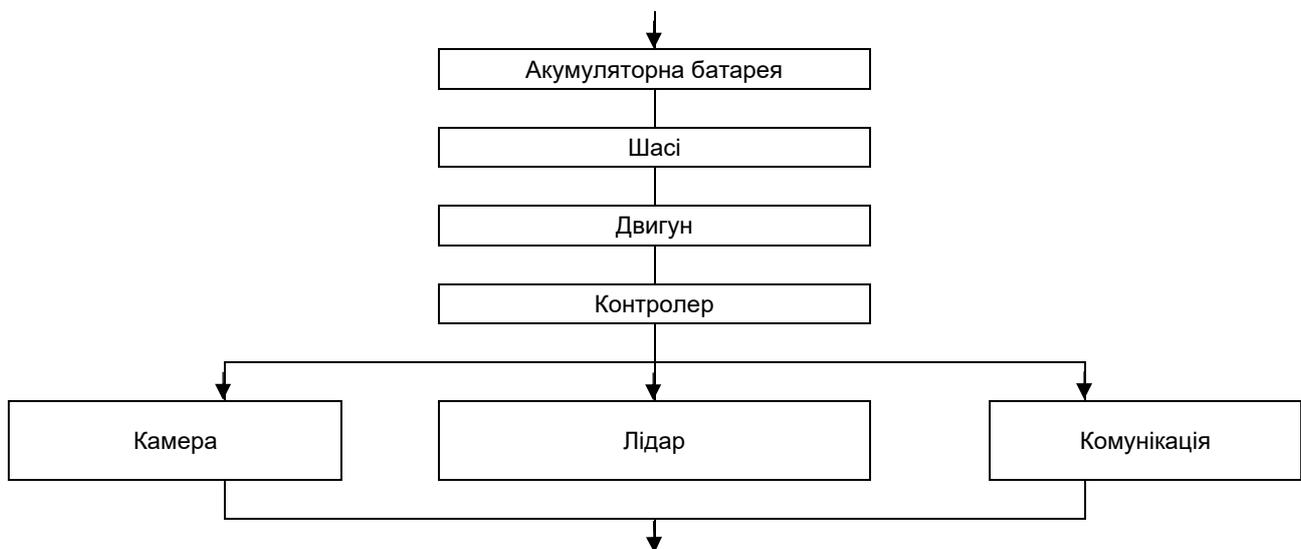


Рис. 1. Архітектура МРП



Закону розподілу Вейбулла підпорядковуються: шасі, контролер та акумуляторна батарея. Зокрема функцію надійності для шасі обчислюють за формулою

$$R_C(t) = \exp[-(\lambda_C t)^{k_C}], \quad (1)$$

де λ_C – параметр масштабу (інтенсивність відмов), обернений до характерного часу безвідмовної роботи; k_C – параметр форми (shape), який визначає характер старіння: $k_C < 1$ – фаза "дитячої смертності" (initial failures); $k_C = 1$ – експоненціальний розподіл (постійна ймовірність відмови); $k_C > 1$ – старіння (failure rate зростає із часом); t – час у годинах (або секундах, залежно від одиниць).

Для контролера функція надійності

$$R_{Ctrl}(t) = \exp[-(\lambda_{Ctrl} t)^{k_{Ctrl}}]. \quad (2)$$

Для акумуляторної батареї функцію надійності обчислюють за формулою

$$R_B(t) = \exp[-(\lambda_B t)^{k_B}]. \quad (3)$$

Експоненціальному закону розподілу підпорядковуються такі елементи МРП: двигун, камера, лідар, Wi-Fi і BLE. Формула для обчислення функції надійності двигуна:

$$R_M(t) = \exp(-\lambda_M t). \quad (4)$$

Функція надійності камери:

$$R_{Cam}(t) = \exp(-\lambda_{Cam} t). \quad (5)$$

Функція надійності лідара:

$$R_{LID}(t) = \exp(-\lambda_{LID} t). \quad (6)$$

Функція надійності Wi-Fi:

$$R_{WiFi}(t) = \exp(-\lambda_{WiFi} t). \quad (7)$$

Функція надійності BLE:

$$R_{BLE}(t) = \exp(-\lambda_{BLE} t). \quad (8)$$

Функцію надійності послідовно з'єднаних елементів обчислюємо, перемножуючи функції надійності кожного з елементів, а саме: акумуляторної батареї, шасі, контролера та двигуна:

$$R_{ser}(t) = R_B(t)R_C(t)R_{Ctrl}(t)R_M(t). \quad (9)$$

Функцію надійності паралельно з'єднаних елементів обчислюємо, перемножуючи функції надійності Wi-Fi і BLE:

$$R_{comm}(t) = 1 - (1 - R_{WiFi}(t))(1 - R_{BLE}(t)). \quad (10)$$

Функцію надійності для паралельно з'єднаних камери, лідара та комунікаційної системи знайдемо за формулою

$$R_{par}(t) = 1 - (1 - R_{Cam}(t))(1 - R_{LID}(t)). \quad (11)$$

Загальна функція надійності МРП матиме вигляд $t \in [0; 2000]$:

$$R_{AGV}(t) = R_{ser}(t)R_{par}(t). \quad (12)$$

Отже загальна функція надійності МРП виглядає так:

$$R_{AGV}(t) = R_B(t)R_C(t)R_M(t)R_{Ctrl}(t)[1 - (1 - R_{Cam}(t))(1 - R_{LID}(t))1 - (1 - R_{WiFi}(t))(1 - R_{BLE}(t))]. \quad (13)$$

Інтенсивність відмов для елементів, що підпорядковуються закону Вейбулла, обчислимо як

$$\lambda_i(t) = k_i \lambda_i^{k_i} t^{k_i-1}. \quad (14)$$

Інтенсивність відмов для елементів, що підпорядковуються експоненціальному закону, розраховуємо за формулою

$$\lambda_i(t) = \lambda_i. \quad (15)$$

Обчислюємо інтенсивність відмов для послідовно з'єднаних елементів: акумуляторної батареї, шасі, контролера та двигуна:

$$\lambda_{ser}(t) = \lambda_B(t) + \lambda_C(t) + \lambda_{Ctrl}(t) + \lambda_M(t). \quad (16)$$

Інтенсивність відмов паралельної частини МРП обчислюємо як

$$\lambda_{par}(t) = \frac{f_{par}(t)}{R_{par}(t)}. \quad (17)$$

Загальну інтенсивність відмов МРП знаходимо за формулою

$$\lambda_{AGV}(t) = \lambda_{ser}(t) + \lambda_{par}(t)\lambda_{par}(t). \quad (18)$$

Частота відмов МРП:

$$a(t) = \int_0^t \lambda_{AGV}(u) du. \quad (19)$$



Імовірність відмови МРП:

$$Q(t) = 1 - R_{AGV}(t). \tag{20}$$

Готовність, враховуючи, що МРП працює без відновлення:

$$A(t) \approx R_{AGV}(t). \tag{21}$$

Очікуваний залишковий час до відмови:

$$T(t) = \frac{\int_t^\infty R_{AGV}(u)du}{R_{AGV}(t)}. \tag{22}$$

Середній час безвідмовної роботи (MTTF) для елементів, що підпорядковуються закону Вейбулла:

$$MTTF_i = \frac{1}{\lambda_i} \Gamma(1 + \frac{1}{k_i}). \tag{23}$$

Середній час безвідмовної роботи (MTTF) для елементів, що підпорядковуються експоненціальному закону:

$$MTTF_i = \frac{1}{\lambda_i}. \tag{24}$$

Середній час безвідмовної роботи (MTTF) для паралельних компонентів МРП:

$$MTTF_{par} = \frac{1}{\frac{1}{MTTF_{Cam}} + \frac{1}{MTTF_{LID}} + \frac{1}{MTTF_{comm}}}. \tag{25}$$

Середній час безвідмовної роботи для комунікаційної системи, яка складається з Wi-Fi і BLE:

$$MTTF_{comm} = (\frac{1}{MTTF_{WiFi}} + \frac{1}{MTTF_{BLE}})^{-1}. \tag{26}$$

Загальний MTTF МРП приблизно такий:

$$MTTF_{AGV} \approx (\frac{1}{MTTF_{ser}} + \frac{1}{MTTF_{par}})^{-1}, \tag{27}$$

де загальний MTTF МРП для паралельно з'єднаних елементів розраховуємо як

$$MTTF_{ser} = MTTF_B + MTTF_C + MTTF_{Ctrl} + MTTF_M. \tag{28}$$

Робастність МРП визначає її здатність зберігати працездатність за наведених нижче умов. Загальна математична модель робастності надійності МРП:

$$R_{AGV}^\Delta(t) = \prod_{i \in V \setminus \Delta} R_i(t) [\prod_{j \in S \setminus \Delta} (1 - R_j(t))], \tag{29}$$

де $V = \{B, C, M, Ctrl\}$ – ключові вузли (батарея, корпус, двигуни, контролер), $S = \{Cam, LID, WiFi, BLE\}$ – сенсорно-комунікаційна система, $\Delta \subseteq V \cup S \cup E$ – порушені компоненти або зв'язки, $R_j(t)$ – функція надійності компонента j .

Умовна робастність враховує, що компоненти з дельта вважаються відмовленими, тобто $R_i(t) = 0, i \in \Delta$. Умову k -робастності описують так: система є k -робастною, якщо за будь-якої множини існує k відмов. Тобто, навіть якщо відмовлять будь-які k компоненти (вузли або канали), загальна надійність системи повинна залишатись вищою за мінімум.

$$R_{AGV}^\Delta(t) \geq R_{min}, \forall \Delta \subseteq V \cup E, |\Delta| \leq k. \tag{30}$$

Чутливість компонентів обчислюємо для оцінювання впливу кожного компонента на загальну надійність:

$$S_i(t) = \frac{\partial R_{AGV}(t)}{\partial R_i(t)} = \frac{R_{AGV}(t)}{R_i(t)}. \tag{31}$$

Компоненти з найбільшими значеннями є найкритичніші, і саме їх потрібно резервувати. Оптимізацію маршрутів МРП здійснюють на основі множини шляхів:

$$P = \{1, 2, \dots, n\}. \tag{32}$$

Результати

На рис. 2 зображено графіки основних характеристик надійності МРП. А саме: інтенсивність відмов, функцію напрацювання на відмову, функцію очікування часу до відмови, імовірність роботи системи, імовірність відмови, готовність МРП.

Згідно з наведеними графіками, розраховано середній час безвідмовної роботи (MTTF) для окремих компонентів автоматизованої мобільної платформи. В табл. 2 наведено середній час безвідмовної роботи кожного з елементів МРП.

Таблиця 2

Середній час безвідмовної роботи кожного елемента МРП

Елемент МРП	Батарея	Шасі	Контролер	Двигун	Камера	Лідар	Wi-Fi	BLE
MTTF (години)	124914	135412	110829	110000	120000	100000	80000	70000

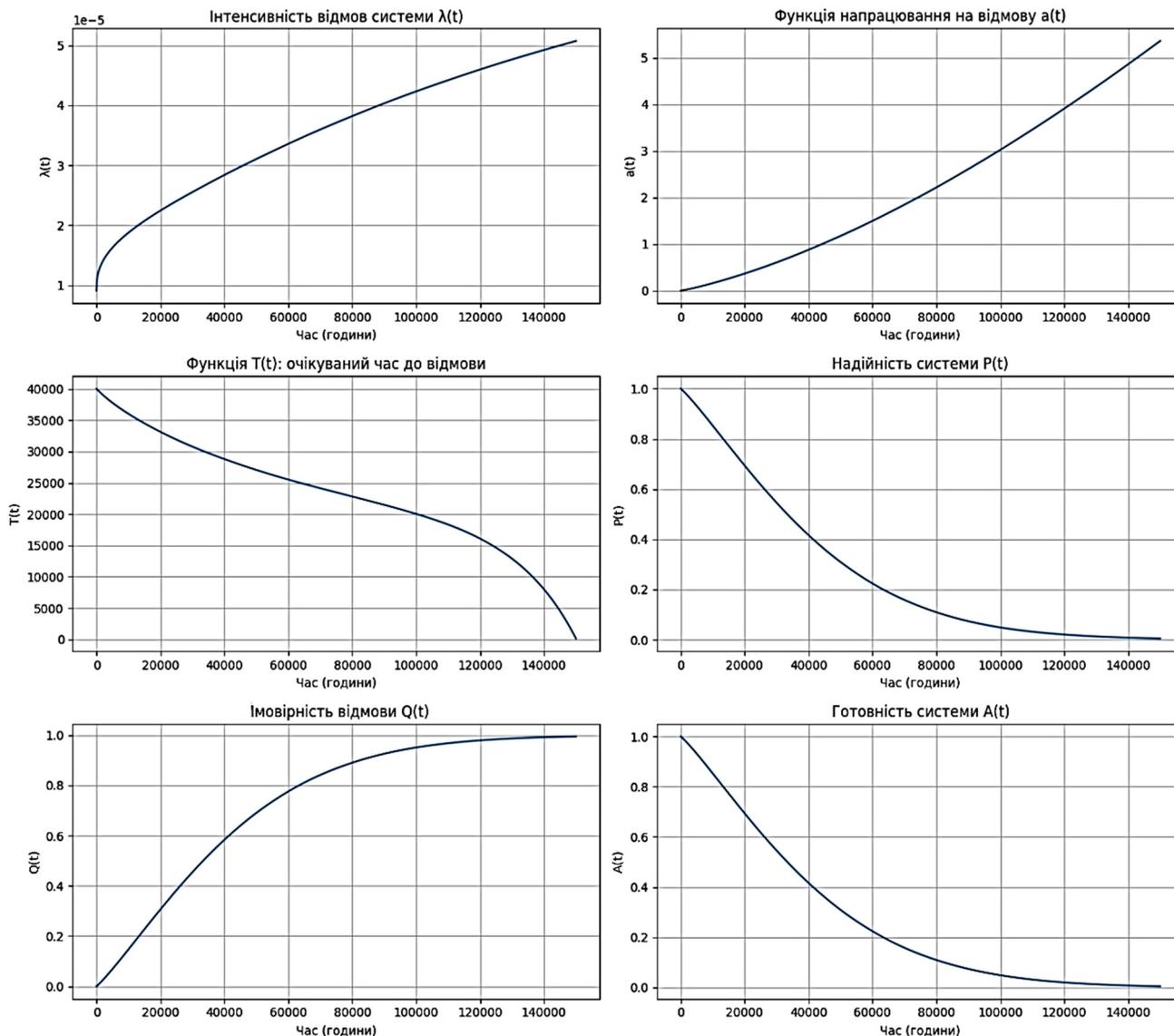


Рис. 2. Графіки основних характеристик надійності МРП

Найдовший МТТФ мають шасі (135 412 год) та акумулятор (124 914 год), що свідчить про їхню високу надійність. Контролер, двигун і камера мають трохи нижчі значення, близько 110 000–120 000 год. Найменшу надійність мають бездротові модулі зв'язку: Wi-Fi – 80 000 год, а BLE – 70 000 год. Через те, що для зв'язку використовують або Wi-Fi, або BLE (умова "або", тобто паралельна робота), МТТФ цієї групи становить лише 37 333 год.

Коли розглядається паралельна група компонентів (камера, LIDAR і зв'язок), загальний МТТФ ще нижчий – лише 22 164 години. Це означає, що в разі відмови будь-якого із цих трьох елементів система втрачає функціональність. У підсумку, орієнтовне МТТФ усієї системи AGV становить близько 21 188 год, що відповідає приблизно 2,4 року безперервної роботи. Це дає змогу оцінити часові межі надійної експлуатації системи та планувати обслуговування чи модернізацію компонентів.

На рис. 3 зображено графіки чутливості елементів МРП та робастності МРП для одночасно однієї відмови її елементів.

Система МРП початково має максимальну надійність 100 %. Через 10 000 год вона знижується до приблизно 85 %, а далі поступово падає, досягаючи близько 0,5 % після 30 000 год і менше 1 % після 140 000 год. Мінімальні значення надійності трохи нижчі за номінальні, що враховує можливі коливання параметрів. Загалом, система надійна на початковому етапі, але із часом її робастність значно знижується.

У табл. 3 представлено розраховані значення часу для номінальних значень без відмов елементів МРП ($R_{nominal}$) та з однією відмовою (R_{min} при $\Delta \leq 1$), а також чутливість компонентів до загальної надійності МРП. При $R_{min} |\Delta| \leq 1$ – це робастність, тобто здатність МРП зберігати працездатність за однієї відмови компонента (напр., втрата зв'язку Wi-Fi або BLE).

На початку роботи системи ($t = 0$ год) її надійність становить 100 %, тобто система повністю працездатна. Із часом надійність поступово знижується. Через 10 000 год вона залишається досить високою – близько 85 % за номінальним значенням і трохи менше з урахуванням варіацій (R_{min}). Далі, зі зростанням часу експлуатації, надійність падає: через 50 000 год вона становить уже близько 30 %, а через 100 000 год – менше 5 %.

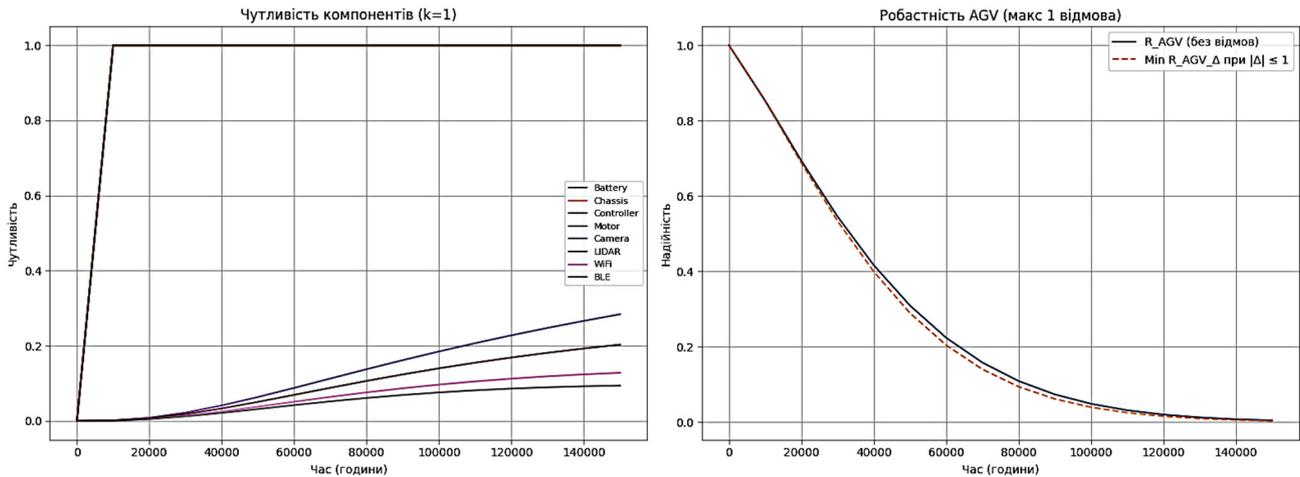


Рис. 3. Графіки чутливості елементів МРП і робастності МРП для одночасно однієї відмови її елементів

Таблиця 3

Значення часу для номінальних значень без відмов елементів МРП, а також чутливість компонентів до загальної надійності МРП за однієї відмови елементів МРП

t (години)	$R_{nominal}$	$R_{min} \mid \Delta \leq 1$	Батарея	Шасі	Контролер	Двигун	Камера	Лідар	Wi-Fi	BLE
0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10000.0	0.853	0.8518	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0014	0.0011	0.0009	0.0008
20000.0	0.6935	0.6877	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0084	0.0069	0.0054	0.0046
30000.0	0.5454	0.5333	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0221	0.018	0.0138	0.0118
40000.0	0.4164	0.3993	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0411	0.0331	0.0251	0.0211
50000.0	0.3093	0.2896	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0636	0.0506	0.0378	0.0315
60000.0	0.2238	0.2042	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0879	0.0693	0.051	0.042
70000.0	0.1581	0.1402	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1128	0.0881	0.0639	0.052
80000.0	0.1091	0.0941	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1376	0.1064	0.0759	0.0611
90000.0	0.0736	0.0617	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1617	0.1238	0.0868	0.069
100000.0	0.0487	0.0397	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1849	0.14	0.0966	0.0758
110000.0	0.0316	0.025	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2069	0.155	0.1051	0.0815
120000.0	0.0201	0.0155	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2279	0.1688	0.1125	0.086
130000.0	0.0126	0.0095	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2476	0.1813	0.1187	0.0895
140000.0	0.0078	0.0057	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2663	0.1927	0.1239	0.0922
150000.0	0.0047	0.0034	1.0	1.0	1.0	1.0	0.284	0.2031	0.1281	0.094

Мінімальні значення надійності (R_{min}), які враховують можливі коливання параметрів, завжди трохи нижчі за номінальні, але тенденція зниження із часом однакова. До 150 000 год система має дуже низьку ймовірність безвідмовної роботи – менше 0,5 %. Отже, система із часом втрачає свою працездатність, і для забезпечення надійної роботи потрібно планувати профілактичне обслуговування або заміну компонентів до того, як надійність стане критично низькою.

На рис. 4 зображено графіки чутливості елементів МРП та робастності МРП для одночасних двох відмов її елементів.

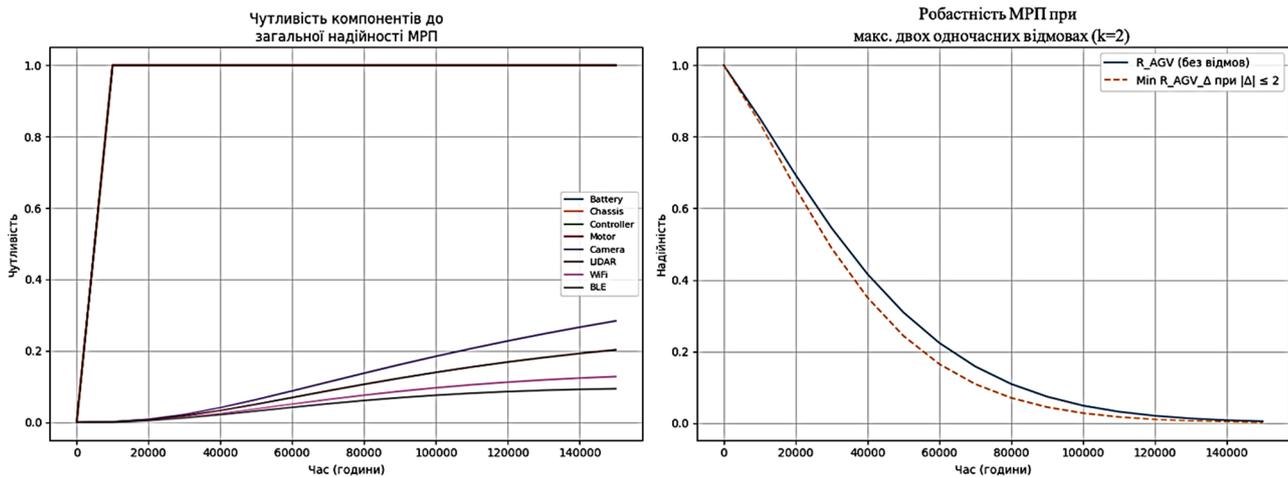


Рис. 4. Графіки чутливості елементів МРП і робастності МРП для одночасних двох відмов її елементів

Система МРП за максимальної кількості відмов (дві одночасні відмови) має високу надійність на початку експлуатації, що становить близько 85 % після 10 000 годин. Із часом надійність поступово знижується і після 150 000 год падає майже до нуля. Мінімальні значення надійності трохи нижчі за номінальні через можливі варіації. Загалом, система стабільна на початковому етапі, але із часом потребує профілактики або заміни для підтримки робастності.

У табл. 4 представлено розраховані значення часу для номінальних значень без відмов елементів МРП ($R_{nominal}$) та з двома одночасними відмовами елементів МРП (R_{min} при $|\Delta| \leq 2$), а також чутливість компонентів до загальної надійності МРП. Якщо $R_{min}|\Delta| \leq 2$, то маємо справу із живучістю, тобто здатністю МРП продовжувати виконання місії навіть за двох відмов.

Таблиця 4

Значення часу для номінальних значень без відмов елементів МРП, а також чутливість компонентів до загальної надійності МРП за двох відмов елементів МРП

t (години)	$R_{nominal}$	$R_{min} \Delta \leq 2$	Батарея	Шасі	Контролер	Двигун	Камера	Лідар	Wi-Fi	BLE
0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10000.0	0.853	0.8397	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0014	0.0011	0.0009	0.0008
20000.0	0.6935	0.6564	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0084	0.0069	0.0054	0.0046
30000.0	0.5454	0.489	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0221	0.018	0.0138	0.0118
40000.0	0.4164	0.3507	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0411	0.0331	0.0251	0.0211
50000.0	0.3093	0.2437	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0636	0.0506	0.0378	0.0315
60000.0	0.2238	0.1647	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0879	0.0693	0.051	0.042
70000.0	0.1581	0.1087	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1128	0.0881	0.0639	0.052
80000.0	0.1091	0.0702	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1376	0.1064	0.0759	0.0611
90000.0	0.0736	0.0444	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1617	0.1238	0.0868	0.069
100000.0	0.0487	0.0276	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1849	0.14	0.0966	0.0758
110000.0	0.0316	0.0169	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2069	0.155	0.1051	0.0815
120000.0	0.0201	0.0102	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2279	0.1688	0.1125	0.086
130000.0	0.0126	0.006	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2476	0.1813	0.1187	0.0895
140000.0	0.0078	0.0035	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2663	0.1927	0.1239	0.0922
150000.0	0.0047	0.002	1.0	1.0	1.0	1.0	0.284	0.2031	0.1281	0.094



Робастність ($|\Delta| \leq 1$) МРП визначається як стабільність у разі одиначної відмови. Система лишається повністю працездатною, навіть якщо один компонент виходить із ладу, наприклад, BLE чи камера. Функція надійності основних компонентів (контролер, двигун, шасі, батарея) змінюється від 1.0 до 150 000 год. Це вказує на надлишковість або високу надійність МРП, яка необхідна на промислових підприємствах. Наприклад за 100 000 год $R_{nominal} = 0.0487$ (без відмов), а $R_{min} |\Delta| \leq 1 = 0.0397$. Це означає, що відбулося падіння менш ніж на 20 %, тобто одна відмова практично не впливає на функціонування МРП.

Живучість ($|\Delta| \leq 2$) виглядає, як адаптація до фатальних сценаріїв. Наприклад, при $t = 100\ 000$ год $R_{min} |\Delta| \leq 2 = 0.0276$, $R_{min} |\Delta| \leq 2 = 0.0397$, що на 30 % менше. R_{min} падає швидше, ніж за одиначної відмови. Причому, хоча ймовірність виконання завдання суттєво падає, МРП все ще здатна функціонувати, тобто система виживає в режимі деградації. На 140 000 год $R_{nominal} = 0.0078$, $R_{min} |\Delta| \leq 2 = 0.0035$, а це означає, що ймовірність виконання з урахуванням двох відмов удвічі нижча, але все ще ненульова. Тобто МРП може виконати завдання, але для цього повинен від'їхати в безпечну зону, подати сигнал, навіть у випадку відмови, наприклад, BLE + Wi-Fi, або камери + LIDAR. Отже живучість забезпечується за рахунок: деградованих режимів роботи; місцевих автономних рішень і резервного контролю.

Дискусія і висновки

На основі проведених досліджень найменш надійними елементами МРП є: акумуляторна батарея, лідар, Wi-Fi- та BLE-модулі. Акумуляторна батарея має швидке зниження надійності після 50 000 год. Лідар має стрімке зростання ймовірності відмов ($R \approx 0.28$) у разі 150 000 год. Wi-Fi-модуль має схильність до частих збоїв ($R \approx 0.8$ на 100 000 год), а він є критичним для зв'язку. У BLE-модуля функція надійності $R \approx 0.09$ на 150 000 год, тобто є майже гарантована відмова. Інші компоненти (шасі, контролер, двигун, камера) мають дуже високу надійність ($R \approx 1.0$ до 150 000 год) і не вимагають негайного втручання.

Підвищення надійності можна здійснювати на компонентному рівні. А саме, для акумуляторної батареї запровадити моніторинг стану з прогнозом деградації, використовувати LiFePO₄ або твердотільні батареї з вищим MTTF і забезпечити модульну заміну батарей без зупинки платформи. Для лідара: обрати бездзеркальні або твердотільні лідари з меншою кількістю рухомих частин, регулярно калібрувати їх і тримати у вологозахисних корпусках, а також використовувати систему самодіагностики для виявлення часткових відмов. Надійність Wi-Fi- та BLE-модулів можна підвищити так: обрати промислові модулі зв'язку з антивібраційним захистом, запровадити виявлення втрати зв'язку й автоматичний перезапук модулів.

Для підвищення робастності на системному рівні необхідно здійснити резервування критичних компонентів. А саме, встановити подвійний лідар або ф'южн із камерою для компенсації втрати, а також подвійний канал зв'язку (Wi-Fi + BLE або Wi-Fi + LoRa/5G). Механізм перемикання між модулями за втрати Wi-Fi забезпечує автоматичний перехід на BLE або офлайн-режим. Також необхідно прогнозувати збої шляхом побудови функції $\lambda(t)$ та запуску превентивного обслуговування. На рівнях модульної архітектури забезпечити швидку заміну лідару, батареї чи зв'язку без демонтажу всієї платформи.

Щоб підвищити живучість на рівні виконання поставлених перед МРП завдань, необхідно формувати їхню кількість так, щоб за відмови до двох одиниць МРП, система продовжувала працювати, наприклад, із 10 платформ лише 7 мають бути обов'язково справні ($m = 7$, $n = 10$). Планувати маршрути з урахуванням ризиків. Найвищий пріоритет давати платформам із найвищою надійністю $R(t)$ та нижчою $\lambda(t)$. Також МРП повинна мати можливість продовжити роботу у деградованому режимі без зв'язку (локальна навігація, останній маршрут). Центральний диспетчер має перерозподіляти завдання між справними МРП, щойно деякі з них вийдуть із ладу.

Загалом МРП характеризується високою надійністю критичних механічних та обчислювальних модулів, однак сенсори та бездротові комунікації є "вузьким місцем". Для підвищення робастності й живучості слід орієнтуватися на резервування, модульність, адаптивну маршрутизацію та превентивну діагностику. Це дозволить зберігати працездатність навіть у разі часткових або повторних відмов окремих компонентів чи платформ.

Джерела фінансування. Це дослідження не отримало жодного гранта від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

Список використаних джерел

- Amin, A. A., & Hasan, K. M. (2019). A review of fault tolerant control systems: Advancements and applications. *Measurement*, 143, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.083>
- Bensaid Amrani, N., Benmoussa, S., Boukhniher, M., & Habbal, A. (2023). Evaluating the predicted reliability of mechatronic systems: State of the art. *Mechanical Engineering: An International Journal (MEIJ)*, 3(2), 12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7801706>
- Betzer, J. S., Boudjadar, J., Frasheri, M., & Talasila, P. (2024). Digital twin enabled runtime verification for autonomous mobile robots under uncertainty. In *Proceedings of the 28th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT 2024)* (pp. 10–17). <https://doi.org/10.1109/DS-RT62209.2024.00012>
- Cai, Z., Zhang, F., Tan, Y., Kessler, S., & Fotner, J. (2024). Integration of an IoT sensor with angle-of-arrival-based angle measurement in AGV navigation: A reliability study. *Journal of Industrial Information Integration*, 42, Article 100707. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100707>
- Fazlollahabbar, H., & Akhavan Niaki, S. T. (2017). *Reliability models of complex systems for robots and automation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22491>
- Li, L., & Schulze, L. (2024). Failure prediction of automated guided vehicle systems in production environments through artificial intelligence. *Tehnički glasnik*, 18(2), 268–272. <https://doi.org/10.31803/tg-20240416185206>
- Luo, W. (2023). Towards safe and resilient autonomy in multi-robot systems. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 37(13), Article 15449. <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i13.26816>
- Maza, S. (2025). Diagnostic-constrained fault-tolerant control of bi-directional AGV transport systems with fault-prone sensors. *ISA Transactions*, 158, 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2025.01.014>
- Panchal, D. (2023). Reliability analysis of turbine unit using intuitionistic fuzzy Lambda–Tau approach. *Reports in Mechanical Engineering*, 4(1), 47–61. <https://doi.org/10.31181/rme040117042023p>
- Purwaningsih, R., Shintyastuti, A. R., Arvianto, A., & Hapsari, C. A. P. (2025). Evaluating the impact of autonomous material handling on the performance of production system: A simulation approach. *Sinergi*, 29(2), 139–146. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2025.2.004>
- Yin, J., Li, L., Mourelatos, Z. P., Liu, Y., Gorsich, D., & Singh, A. (2023). Reliable global path planning of off-road autonomous ground vehicles under uncertain terrain conditions. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3317833>
- Zheng, M., Feng, B., Zhao, Y., & Liang, W. (2024). Ordered and reliable retransmission method for wireless AGV systems based on WIA-FA. *Information and Control*, 53(5), 616–626. <https://doi.org/10.13976/j.cnki.xk.2024.3165>



References

- Amin, A. A., & Hasan, K. M. (2019). A review of fault tolerant control systems: Advancements and applications. *Measurement*, 143, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.083>
- Bensaid Amrani, N., Benmoussa, S., Boukhnifer, M., & Habbal, A. (2023). Evaluating the predicted reliability of mechatronic systems: State of the art. *Mechanical Engineering: An International Journal (MEIJ)*, 3(2), 12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7801706>
- Betzer, J. S., Boudjadar, J., Frasher, M., & Talasila, P. (2024). Digital twin enabled runtime verification for autonomous mobile robots under uncertainty. In *Proceedings of the 28th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT 2024)* (pp. 10–17). <https://doi.org/10.1109/DS-RT62209.2024.00012>
- Cai, Z., Zhang, F., Tan, Y., Kessler, S., & Fottner, J. (2024). Integration of an IoT sensor with angle-of-arrival-based angle measurement in AGV navigation: A reliability study. *Journal of Industrial Information Integration*, 42, Article 100707. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100707>
- Fazlollahtabar, H., & Akhavan Niaki, S. T. (2017). *Reliability models of complex systems for robots and automation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22491>
- Li, L., & Schulze, L. (2024). Failure prediction of automated guided vehicle systems in production environments through artificial intelligence. *Tehnicki glasnik*, 18(2), 268–272. <https://doi.org/10.31803/tg-20240416185206>
- Luo, W. (2023). Towards safe and resilient autonomy in multi-robot systems. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 37(13), Article 15449. <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i13.26816>
- Maza, S. (2025). Diagnostic-constrained fault-tolerant control of bi-directional AGV transport systems with fault-prone sensors. *ISA Transactions*, 158, 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2025.01.014>
- Panchal, D. (2023). Reliability analysis of turbine unit using intuitionistic fuzzy Lambda–Tau approach. *Reports in Mechanical Engineering*, 4(1), 47–61. <https://doi.org/10.31181/rme040117042023p>
- Purwaningsih, R., Shintyastuti, A. R., Arvianto, A., & Hapsari, C. A. P. (2025). Evaluating the impact of autonomous material handling on the performance of production system: A simulation approach. *Sinergi*, 29(2), 139–146. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2025.2.004>
- Yin, J., Li, L., Mourelatos, Z. P., Liu, Y., Gorsich, D., & Singh, A. (2023). Reliable global path planning of off-road autonomous ground vehicles under uncertain terrain conditions. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3317833>
- Zheng, M., Feng, B., Zhao, Y., & Liang, W. (2024). Ordered and reliable retransmission method for wireless AGV systems based on WIA-FA. *Information and Control*, 53(5), 616–626. <https://doi.org/10.13976/j.cnki.xk.2024.3165>

Отримано редакцією журналу / Received: 06.07.25

Прорецензовано / Revised: 08.07.25

Схвалено до друку / Accepted: 14.09.25

Olena PAVLIUK, DSc (Engin.), Assoc. Prof.
 ORCID ID: 0000-0003-4561-3874
 e-mail: olena.m.pavliuk@plnu.u
 Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

MODEL FOR ASSESSING THE ROBUSTNESS AND SURVIVAL OF MOBILE ROBOTIC PLATFORMS TAKING INTO ACCOUNT RELIABILITY

Background. This publication develops a comprehensive model of reliability, robustness, and survivability of a mobile robotic platform (MRP) with a series-parallel architecture. The aim of the work is to perform mathematical modeling and analysis of the reliability of MRP components based on Weibull and exponential distribution laws, as well as to assess the impact of redundancy and structural redundancy on the overall system resilience to failures. It was established that the critical elements of the MRP are the chassis, motor, and controller, as they are connected in series and have a low level of fault tolerance without redundancy, unlike the sensor and communication components connected in parallel.

Methods. Reliability calculation using series-parallel schemes; evaluation of mean time to failure (MTTF); modeling using Weibull and exponential distributions; sensitivity analysis to evaluate the impact of components on system reliability; assessment of system robustness and survivability under environmental changes or faults.

Results. Based on the constructed models, numerical MTTF values were obtained for all MRP components. The highest fault-free operation times were recorded for the chassis (135,412 hours) and the battery (124,914 hours), while the lowest reliability was demonstrated by the Wi-Fi communication modules (80,000 hours) and BLE modules (70,000 hours). The MTTF for the entire MRP is 21,188 hours, approximately 2.4 years of continuous operation. Sensitivity graphs showed that the chassis, controller, and motor have the greatest impact on overall reliability. These are priorities for redundancy or the creation of degraded modes. The system robustness with one failure ($\Delta \leq 1$) was evaluated through the decrease in probability of fault-free operation. However, over time (beyond 100,000 hours), reliability drops below 5%, highlighting the importance of accounting for component wear. To increase survivability, the MRP should operate with up to two platform failures, plan routes based on reliability, support degraded mode, and dynamically redistribute tasks.

Conclusions. The proposed model enables highly accurate reliability assessment of the MRP considering its structure, connection types, and functional features of components. The results indicate the need for redundancy of critical components and increased system robustness to ensure failure resilience. The presented methodology can be used for maintenance planning, lifecycle forecasting, and optimization of MRP operation in dynamic environments.

Keywords: mobile robotic platform (MRP), reliability, robustness, series-parallel structure, component sensitivity, route optimization.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.