УДК 681.5 + 519.873 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.32

О. М. ПАВЛЮК
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизованих систем управління
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-4561-3874

М. О. МЕДИКОВСЬКИЙ
доктор технічних наук,
професор кафедри автоматизованих систем управління
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-2492-8578

М. В. МІЩУК
асистент кафедри автоматизованих систем управління
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0001-8723-2514

А. О. ЗАБОЛОТНА
студентка кафедри автоматизованих систем управління
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0003-0389-3801

# ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ПЛАТФОРМ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

*У представленій роботі досліджено проблему забезпечення надійності системи управління мобільними роботизованими платформами (МРП), які часто використовують в сучасних внутрішньо-логістичних системах промислових підприємств. Запропоновано стандартизований підхід оцінки надійності компонентів системи МРП з урахуванням структурної надмірності, послідовно-паралельної архітектури та деградаційних процесів у складних виробничих середовищах. За допомогою математичного моделювання розраховано функції надійності для системи МРП середнього класу вагою від 500 до 1000 кг. Обчислено середній час до відмови MTTF та інтенсивність відмов для ключових компонентів МРП. Як результат дослідження одержано MTBF = 19 802 год, або близько 2.26 років безперервної роботи MTBF є високим показником для середнього класу МРП, які зазвичай мають MTBF у межах 10 000–20 000 год. і є адекватним показником для МРП промислового класу. Інтенсивність відмов $\lambda_{total} = 5.0499 \times 10^{-5}$ 1/год складає середню частоту відмов приблизно 1 раз на 19 800 год. Коефіцієнт готовності A ≈ 0.998991 – це означає, що система буде готова до роботи 99.9 % часу, тобто простої будуть дуже рідкісними. Це відповідає вимогам індустрій до AGV, що працюють на виробничих лініях.*

*На основі розрахунків визначено критичні елементи для резервування і алгоритм реконфігурації системи керування з урахуванням зміни її надійнісних характеристик. Насамперед, відмова окремих компонентів свідчить про те, що найменш надійним компонентом є лідар з найвищою інтенсивністю відмов. Найнадійніший компонент це комунікація з резервуванням (BLE або WiFi) із найнижим λ. Шасі та камера мають високу надійність, що важливо для довготривалого використання. Запропоновані підходи можна використати для підвищення безвідмовності, адаптивності та загальної ефективності внутрішньозаводських логістичних систем в умовах Індустрії 4.0 та 5.0.*

***Ключові слова:*** *мобільна роботизована платформа, надійність, робастність, закон розподілу, середній час до відмови, інтенсивність відмов.*

O. M. PAVLIUK
PhD, Associate Professor at the Department of Automated Control Systems
Institute of Computer Sciences and Information Technologies
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-4561-3874

M. O. MEDYKOVSKYY
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Automated Control Systems
Institute of Computer Sciences and Information Technologies
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-2492-8578

M. V. MISHCHUK
Assistant Lecturer at the Department of Automated Control Systems
Institute of Computer Sciences and Information Technologies
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0001-8723-2514

A. O. ZABOLOTNA
Student at the Department of Automated Control Systems
Institute of Computer Sciences and Information Technologies
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0003-0389-3801

# RELIABILITY ASSESSMENT OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE PLATFORM SYSTEM

*The presented study investigates the problem of ensuring the reliability of the control system for mobile robotic platforms (MRPs), which are commonly used in modern intralogistics systems of industrial enterprises. A standardized approach is proposed for assessing the reliability of MRP system components, taking into account structural redundancy, series-parallel architecture, and degradation processes in complex industrial environments. Using mathematical modeling, reliability functions were calculated for a mid-range MRP system with a payload capacity of 500 to 1000 kg. The Mean Time To Failure (MTTF) and failure rate were computed for key MRP components.*

*As a result of the study, the obtained Mean Time Between Failures (MTBF) is 19,802 hours, or approximately 2.26 years of continuous operation. This MTBF is a high value for mid-range MRPs, which typically exhibit MTBF values in the range of 10,000–20,000 hours, and it is a suitable indicator for industrial-grade platforms.*

*The overall failure rate was determined as $\lambda_{total} = 5.0499 \times 10^{-5}$ failures/hour, which corresponds to an average failure frequency of approximately once every 19,800 hours.*

*The availability coefficient $A \approx 0.998991$ indicates that the system will be operational 99.9 % of the time, meaning downtimes will be extremely rare. This aligns with the requirements for AGVs (Automated Guided Vehicles) operating on production lines.*

*Based on the calculations, critical elements for redundancy were identified, as well as a reconfiguration algorithm for the control system considering changes in its reliability characteristics.*

*The failure of individual components indicates that the least reliable component is the LiDAR, exhibiting the highest failure rate. The most reliable component is the redundant communication module (BLE or WiFi), with the lowest $\lambda$ value. Both the chassis and the camera show high reliability, which is essential for long-term operation.*

*The proposed approaches can be used to enhance the fault tolerance, adaptability, and overall efficiency of intralogistics systems within the frameworks of Industry 4.0 and 5.0.*

***Key words:*** *mobile robotic platform, reliability, robustness, probability distribution law, mean time to failure (MTTF), failure rate.*

## Вступ

Мобільні роботизовані платформи (МРП) в англомовній літературі Mobile Robotic Platforms (MRP) це автономні чи напівавтономні мобільні пристрої, які служать базовою основою для створення різноманітних роботизованих систем. Із їх використанням можна переміщувати вантажі в просторі. На їх основі можна будувати автоматизовані транспортні засоби (AGV), мобільні маніпулятори, роботи для інспекції, доставки, моніторингу тощо. Автоматизовані керовані транспортні засоби (АКТЗ) в англомовній літературі Automated Guided Vehicle (AGV) використовуються для внутрішньозаводської логістики з метою транспортування матеріалів, деталей або готової продукції між різними ділянками підприємства. Вони працюють у загальному просторі промислового підприємства, наприклад, у зонах складу, виробництва та упаковки – паралельно. Якщо виконуються етапи технологічного процесу, які залежать один від одного – послідовно. В сучасних внутрішньозаводських логістичних системах робота МРП координується через центральну або розподілену систему управління. Враховуючи складність такої системи управління МРП, особливо в умовах обмежених ресурсів надзвичайно актуальним стає питання визначення їх надійності та робастності. Надійність системи управління МРП відповідає за її здатність стабільно, безперервно та точно виконувати покладені функції, наприклад, навігацію координацію, безпечну взаємодію, виконання завдань протягом визначеного періоду часу в умовах промислового середовища. Надійність повинна

забезпечувати: безвідмовність, стійкість до відмов, надійний зв'язок, прийняття рішень в реальному часі, відновлення після помилок, кібербезпеку. Робастність системи управління МРП полягає у здатності системи зберігати адекватну продуктивність при порушенні зв'язку, відмові одного або кількох МРП, частковому виході з ладу серверів або шлюзів. Тобто надійність є основою для забезпечення робастності. Без передбачення ймовірності відмов неможливо гарантувати стабільність при збуреннях (переривання або втрата зв'язку між МРП і керуючими серверами; відмова одного або кількох МРП під час виконання завдання; вихід з ладу окремих компонентів інфраструктури, таких як сервери, шлюзи, навігаційні маяки тощо; непередбачені зміни в середовищі такі як раптова поява перешкод, людська активність). Зв'язок між надійністю та робастністю представлений в таблиці 1.

Таблиця 1

**Зв'язок між надійністю та робастністю**

| Надійність | Робастність |
|---|---|
| Запобігає відмовам і забезпечує стабільну роботу | Зберігає адекватну поведінку при вже наявних відмовах чи порушеннях |
| Базується на технічній відмовостійкості | Передбачає гнучкість і адаптивність алгоритмів керування |
| Включає моніторинг, резервування, контроль справності | Включає динамічну реконфігурацію, переназначення маршрутів і завдань |

Тобто в разі раптової втрати зв'язку з одним із шлюзів керуюча система на основі надійної архітектури не допускає повної втрати інформації, наприклад, завдяки локальній автономії кожного МРП. Тобто завдяки робастним алгоритмам система управління МРП швидко перебудовує маршрути інших платформ, перерозподіляє завдання, зберігаючи свою загальну продуктивність.

Логістичні системи промислових підприємств в умовах Індустрій 4.0 та 5.0 які використовують МРП можна описати універсальною моделлю управління з послідовно-паралельною архітектурою. Вона дозволить враховувати структурну надмірність, тобто наявність резервних маршрутів, дублювання вузлів управління та альтернативних платформ. Така надмірність є основою робастного дизайну системи управління. Проте, на практиці виникає потреба у формалізованому підході до оцінки надійності системи, що дозволяє: ідентифікувати критичні компоненти з низькою надійністю; прогнозувати поведінку системи у випадку деградацій або відмов; адаптувати алгоритми розподіленого управління з урахуванням імовірнісної інформації про надійність компонентів.

**Постановка проблеми:** побудувати формалізований підхід до ідентифікації слабких місць, адаптації архітектури, а також реконфігурації системи керування МРП з урахуванням зниження надійності або часткових відмов компонентів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Надійність, безпечна експлуатація та здатність до безперервної роботи МРП у складних умовах безпосередньо впливають на ефективність всього виробництва. Оцінка надійності таких систем розглядається у багатьох наукових дослідженнях. Систематичний огляд [1, 2] акцентує увагу на поєднанні МРП із дронами у виробничих системах. Хоча основний фокус зроблено на функціональній взаємодії, дослідники підкреслюють потребу в забезпеченні високої надійності таких систем оскільки вона є ключовим фактором, що визначає ефективність і безперервність операцій підприємств. Значний огляд сучасного стану розробки сервісних роботів наведено у роботі [3]. Автор систематизував більше 150 публікацій, розглянувши теми функціональної надійності, довговічності, автономності та адаптації сервісних роботів до складних умов експлуатації. У контексті промислових платформ ця робота важлива тим, що висвітлює тренди в стандартизації технічного обслуговування, предиктивної діагностики та автоматичного калібрування систем, що має безпосереднє застосування для систем МРП.

У публікаціях [4, 5] співавтори висвітлюють нові архітектури для мобільних роботів, які інтегрують апаратне та програмне резервування, що значно підвищує стійкість систем до відмов і сприяє більшій безпеці експлуатації на виробництві. Це особливо важливо для платформ промислового підприємства, де зупинки призводять до значних економічних втрат.

У публікаціях [6, 7] представлено науковий прогрес у виявленні та діагностиці відмов у мультиагентних роботизованих системах. Він відкриває нові перспективи для підвищення надійності через швидке локалізування та ізоляцію несправностей, що дозволяє оперативно відновлювати роботу системи без повної зупинки виробництва.

Значущим напрямом є оптимізація руху і маршрутизації МРП, що обговорюється [8, 9, 10]. Впровадження ієрархічного управління і запобігання «заторів» і підвищують загальну надійність логістичних ланцюгів, що є новим кроком в інтеграції систем руху з оцінкою надійності.

Публікації [11, 12] демонструють переваги кооперативної хмарної робототехніки та модульних архітектур для багатоплатформенних систем, що дає змогу не тільки підвищувати надійність, але й забезпечувати гнучкість у масштабуванні виробничих процесів.

Важливим аспектом є питання комунікації і безпеки, що розглядають [10, 12]. Вони підкреслюють наукову новизну у використанні алгоритмів ШІ для моніторингу і захисту каналів зв'язку, що мінімізує ризики відмов через кібератаки і нестабільність мережевого середовища.

В огляді [13] вказується на сучасні обмеження і прогалини в дослідженнях МРП у внутрішній логістиці, що підкреслює необхідність подальшого розвитку надійних систем з урахуванням складності реальних виробничих умов.

У контексті забезпечення надійності МРП важливу роль відіграє архітектура систем управління з допуском до відмов [14] запропоновано нову архітектуру FTC для мобільних маніпуляторів, яка дозволяє зберігати функціональність навіть за умов часткових збоїв апаратного або програмного забезпечення. Автори застосовують гібридний підхід, який поєднує моніторинг стану, діагностику несправностей та адаптивне управління, що є важливим науковим внеском у галузі забезпечення надійності систем у науково-виробничих середовищах.

У публікації [15] автори пропонують нову методологію для оптимізації проєктування, експлуатації та обслуговування багатоплатформенних AGV-систем. Дослідження охоплюють використання стохастичних моделей для прогнозування збоїв та запобігання критичним відмовам. Запропонований підхід дозволяє досягти зниження простоїв та підвищення коефіцієнта готовності системи. Наукова новизна полягає у глибокій інтеграції моделей надійності з експлуатаційними параметрами (наприклад, MTTR, MTTF, λ) на рівні системного проєктування.

**Формулювання мети дослідження**

Розробити метод оцінки надійності системи керування мобільними платформами промислового підприємства з урахуванням структурної надмірності, на основі аналізу функцій надійності (R(t)), середнього часу до відмови (MTTF) та інтенсивності відмов (λ(t)) для визначення слабких місць та адаптації алгоритмів управління в умовах деградації системи.

1. Побудувати математичну модель послідовно-паралельної структури МРП із резервними маршрутами та вузлами.
2. Провести аналітичний розрахунок R(t), MTTF, λ(t) для ключових компонентів (МРП, маршрути, шлюзи, сервери).
3. Розробити критерії визначення критичних елементів, які потребують резервування.
4. Сформулювати алгоритм реконфігурації системи управління у відповідь на зміну характеристик надійності.
5. Інтегрувати надійнісні характеристики в стратегії розподіленого планування завдань та маршрутів МРП.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Математичне формулювання уніфікованої моделі оцінки надійності системи МРП з урахуванням структурної надмірності, послідовно-паралельної архітектури, а також адаптації в умовах деградації системи можна представити таким чином.

Нехай система МРП описана графом

$$G = (V, E) \tag{1}$$

де $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ – множина вузлів системи (МРП, сервери, шлюзи); $E = \{e_{ij}\} \subseteq V \times V$ – множина маршрутів зв'язку або фізичних шляхів (у тому числі резервних).

Надійність компонентів системи обчислюють так. Нехай кожен компонент $i \in V \cup E$ має функцію надійності

$$R_i(t) = P(T_i > t) \tag{2}$$

де $T_i$ – час до відмови компонента $i$.

Інтенсивність відмов $\lambda_i(t)$ обчислюють так, якщо розподіл експоненційний:

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \tag{3}$$

якщо розподіл Вейбулла

$$(t) = e^{-\lambda_i t^{-\beta}}. \tag{4}$$

Середній час до відмови (MTTF):

$$MTTF_i = \int_0^\infty R_i(t)dt. \tag{5}$$

Надійність системи МРП розраховуватиметься згідно типів зв'язку.

Для послідовно-паралельної структури, функція надійності $R_{syst}(t)$ розраховується наступним чином.

Для послідовного з'єднання компонентів:

$$R_{segm}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t). \tag{6}$$

Для паралельного з'єднання (наприклад, резервні маршрути або дубльовані шлюзи):

$$R_{par}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - R_i(t)). \tag{7}$$

Для загальної системи МРП:

$$R_{sys}(t) = F(R_1(t), R_2(t), \ldots, R_n(t)), \quad (8)$$

де $F$ – композиція відповідно до графа $G$ системи.

Здійснимо розрахунок характеристик надійності для модульної МРМ середнього розміру яка має вагу від 500 до 1000 кг. Структура надійності модульної МРП представлена на рисунку 1.

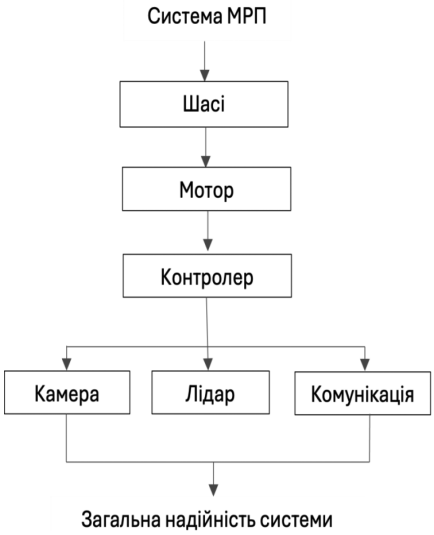


**Рис. 1. Структура надійності модульної МРП**

Згідно цього рисунку шасі мотор та контролер під'єднані послідовно вони утворюють одне серійне з'єднання. Шасі підпорядковується закону Вейбулла, оскільки воно має інтенсивне зношування і часто швидко деградує. Мотор підлягає експоненціальному закону розподілу в зв'язку з тим що є досить надійною надійним елементом системи. Контролер теж підлягає закону Вейбулла. Значеннями коефіцієнта бета в степені можемо враховувати ступінь деградації шасі та контролера.

Наступна частина схеми відповідає за паралельне з'єднання елементів. До неї належить камера, лідар та система комунікації яка включає WiFi та BLE. Камера та лідар описують експоненціальним законом розподілу. Систему комунікації обчислюють як різницю добуток ймовірностей того, що Wi-Fi не спрацює і BLE не спрацює. В цій частині схеми достатньо щоб працював хоча б один елемент. Значення параметрів МРП представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Значення параметрів МРП**

| Компонент | Тип розподілу | Параметри |
|---|---|---|
| Шасі | Weibull | $k = 1.5$, $\lambda = 150\,000$ |
| Контролер | Weibull | $k = 1.3$, $\lambda = 120\,000$ |
| Мотор | Експоненційний | $\lambda = 1/110\,000$ |
| Камера | Експоненційний | $\lambda = 1/120\,000$ |
| Лідар | Експоненційний | $\lambda = 1/100\,000$ |
| WiFi / BLE | Експоненційний | $\lambda = 1/80\,000/1/70\,000$ |
| Комунікація | Резервування | $\lambda = 1/(1/\lambda_WiFi + 1/\lambda_BLE)$ |

Основними метриками є

- MTTF (Mean Time To Failure), тобто середній час до відмови;
- інтенсивність відмов $\lambda(t)$;
- функція напрацювання на відмову $a(t)$;
- готовність системи (Availability);
- часова інтенсивність відмов $\lambda(t)$, hazard-функція $a(t)$ та умовний час до відмови $T(t)$.

Зокрема для закону Вейбулла $MTTF = \lambda \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$.

У таблиці 3 представлено розрахунок MTTF для всіх елементів МРП.

Таблиця 3

**Розрахунок MTTF для всіх елементів МРП**

| Елемент | MTTF (год) |
|---|---|
| Шасі(Weibull) | 135 411.79 |
| Контролер (Weibull) | 110 829.21 |
| Мотор (Exp) | 110 000.00 |
| Камера (Exp) | 120 000.00 |
| Лідар (Exp) | 100 000.00 |
| Комунікація (WiFi або BLE резервування) | 150 000.00 |

Всі отримані значення MTTF є в допустимих межах. В таблиці 4 для порівняння з отриманими результатами представлені допустимі межі для МРП середнього розміру вагою від 500 до 1000 кг.

Таблиця 4

**Допустимі межі MTTF для МРП середнього розміру**

| Елемент | MTTF (год) | Типові межі MTTF для МРП (500–1000 кг) | Коментар |
|---|---|---|---|
| Шасі(Weibull) | 135,412 | 100,000–200,000 | Високий ресурс сталевих шасі |
| Контролер (Weibull) | 110,829 | 80,000–150,000 | Залежить від типу CPU та плати |
| Мотор (Exp) | 110,000 | 100,000–200,000 | Типово для brushless DC motors |
| Камера (Exp) | 120,000 | 60,000–150,000 | Особливо у промислових умовах |
| Лідар (Exp) | 100,000 | 60,000–120,000 | Часто слабша ланка, ніж камера |
| Комунікація (WiFi або BLE) | 150,000 | 80,000–160,000 (з резервуванням) | Резервування WiFi/BLE значно підвищує надійність |

MTBF цілої системи МРП складає 19 802.50 год при готовності системи $A \approx 0.998991$

На рис. 2 представлені λ(t) інтенсивність відмови кожного елемента системи МРП.

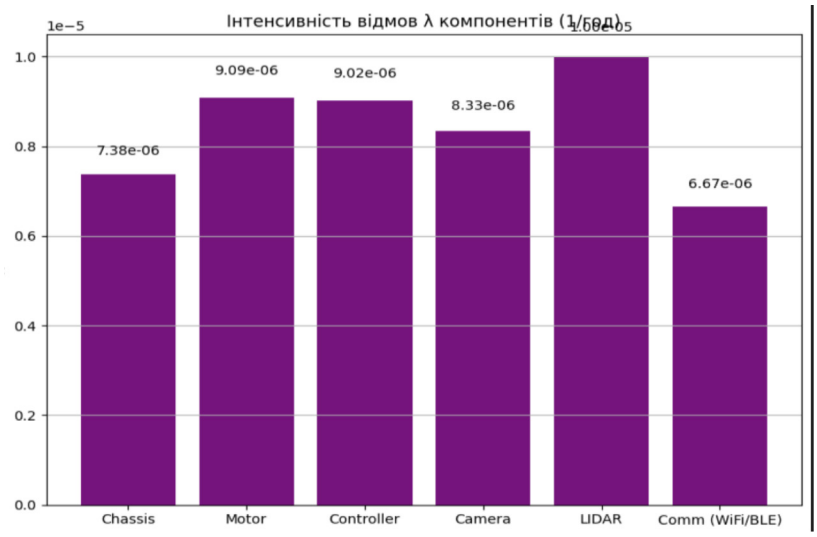


**Рис. 2. λ(*t*) інтенсивність відмови кожного елемента системи МРП**

З рисунка 2 видно що найменшу інтенсивність відмов має кумунікаційна система, а найбільшу – лідар. На рис. 3 представлена λ(t) інтенсивність відмови системи МРП.

Ця функція відображає ймовірність відмови в наступний момент часу за умови, що система працювала до часу t. На початковому етапі (t ≈ 0) λ(t) є відносно низькою, що характерно для стадії «дитячих хвороб». У середині експлуатації – λ(t) стабілізується на постійному рівні, особливо для компонентів з експоненціальним законом (мотор, камера, лідар). На пізній стадії експлуатації при великих значеннях t, λ(t) починає зростати, через старіння елементів, таких як шасі та контролер які підпорядковуються розподілу моделі Вейбулла.

На рис. 4 зображена функція напрацювання на відмову $a(t)$

Функція $a(t)$ – густина ймовірності відмови в момент часу $t$ описує частоту виникнення відмов у системі на кожній ділянці часу. Форма графіка $a(t)$ залежить від поєднання компонентів з експоненційним і розподілами Вейбулла. Функція $a(t)$ має один максимум, який вказує на найбільш ймовірний час відмови. Ця функція допомагає прогнозувати «гарячу зону» відмов для логістичного планування.

**Рис. 3. λ(*t*) інтенсивність відмови системи МРП**

**Рис. 4. Функція напрацювання на відмову *a*(*t*)**

На рис. 5 зображена функція очікуваного часу до відмови на момент часу t.

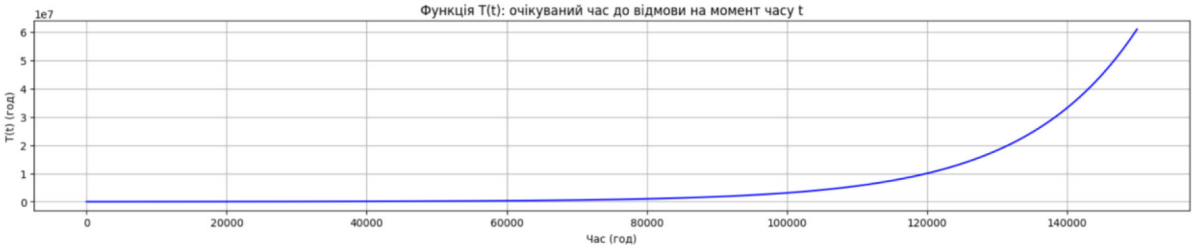


**Рис. 5. функція очікуваного часу до відмови на момент часу *t***

Очікуваний час до відмови показує скільки ще зможе пропрацювати система, якщо вона вже пропрацювала до моменту t. Спочатку функція має високе значення, бо ймовірність ранньої відмови низька. Ця функція є корисною для адаптивного планування обслуговування, коли рішення приймаються в реальному часі. Разом ці графіки утворюють повну картину надійності системи МРП, дозволяючи оцінювати: потенційно небезпечні інтервали експлуатації; найоптимальніші моменти для обслуговування; загальну стійкість системи до відмов.

На рис. 6 зображені ймовірності роботи та відмови цілої системи МРП.

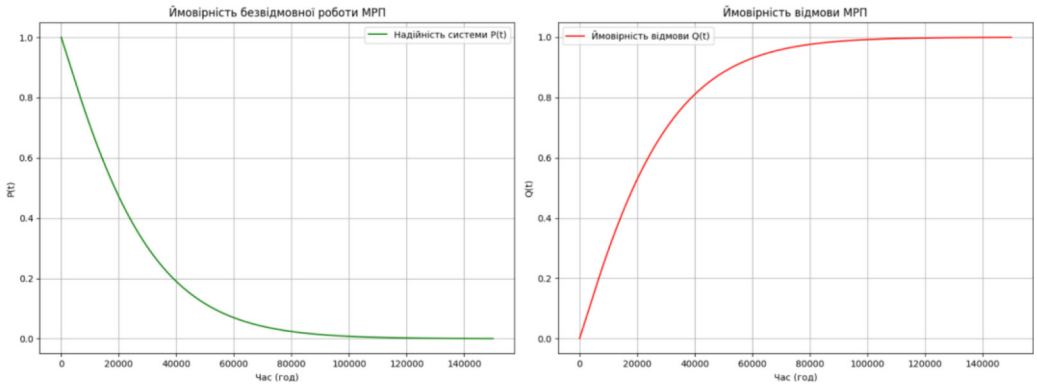


**Рис. 6. Ймовірності роботи та відмови цілої системи МРП**

MTTR тобто середній час, необхідний для виявлення, діагностики та усунення відмови системи, включно з очікуванням на запасні частини, доступністю сервісного персоналу тощо. MTTR системи = 20.00 год є типовим для складної МРП промислового класу. Він включає: виявлення несправності; діагностику з використанням

журналів або телеметрії; заміну або ремонт вийшовшого з ладу компонента (наприклад, лідару або контролера); тестування після ремонту.

**Висновки**

Загальний рівень надійності оцінюємо за допомогою MTBF, який дорівнює 19 802 год, або близько 2.26 років безперервної роботи (24/7). Це досить високий показник для МРП середнього класу (500–1000 кг), які зазвичай мають MTBF у межах 10 000–20 000 год. Інтенсивність відмов $\lambda_{total} = 5.0499 \cdot 10^{-5}$ 1/год – також підтверджує середню частоту відмов приблизно 1 раз на 19 800 год.

Відмова окремих компонентів представлена в таблиці 1 вказують на то, що найменш надійним компонентом є лідар із найвищою інтенсивністю відмов. Найнадійніший компонент це комунікація з резервуванням (BLE або WiFi) із найнижим λ. Шасі та камера мають високу надійність, що важливо для довготривалого використання.

Технічна готовність вказує, що *MTTR* = 20 год (середній час на ремонт) є адекватним показником для МРП промислового класу. Коефіцієнт готовності $A \approx 0.998991$ – це означає, що система буде готова до роботи 99.9 % часу, тобто простої будуть дуже рідкісними. Це відповідає вимогам індустрій до МРП, що працюють на виробничих лініях.

Загалом, МРП має високу надійність, що забезпечується:

- використанням надійних основних компонентів (мотор, камера, контролер);
- застосуванням резервування в критичному модулі комунікації;
- прийнятним часом ремонту.

Потенційним вузьким місцем є лідар, який має найменший MTTF. Для зменшення ризиків можна:

- застосовувати резервний сенсор або періодичну профілактику;
- використовувати інтелектуальну діагностику, щоб вчасно виявляти деградацію.

**Список використаної літератури**

1. Formal Specification and Verification of Autonomous Robotic Systems [Electronic resource] / Matt Luckcuck [et al.] // ACM Computing Surveys. 2019. Vol. 52, no. 5. P. 1–41. Mode of access: https://doi.org/10.1145/3342355

2. Systematic literature review of applications and usage potentials for the combination of unmanned aerial vehicles and mobile robot manipulators in production systems [Electronic resource] / Jannis Sinnemann [et al.] // Production Engineering. 2022. Mode of access: https://doi.org/10.1007/s11740-022-01109-y

3. Lee I. Service Robots: A Systematic Literature Review [Electronic resource] / In Lee // Electronics. 2021. Vol. 10, no. 21. P. 2658. Mode of access: https://doi.org/10.3390/electronics10212658

4. Milecki A. Review of Fault-Tolerant Control Systems Used in Robotic Manipulators [Electronic resource] / Andrzej Milecki, Patryk Nowak // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 2675. Mode of access: https://doi.org/10.3390/app13042675

5. Pierpaoli P. Fault Tolerant Control for Networked Mobile Robots [Electronic resource] / Pietro Pierpaoli, Dominique Sauter, Magnus Egerstedt // 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen, 21–24 August 2018. [S. l.], 2018. Mode of access: https://doi.org/10.1109/ccta.2018.8511420

6. Khalastchi E. Fault Detection and Diagnosis in Multi-Robot Systems: A Survey [Electronic resource] / Eliahu Khalastchi, Meir Kalech // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 18. P. 4019. Mode of access: https://doi.org/10.3390/s19184019

7. Leite A. A Safety Monitoring Model for a Faulty Mobile Robot [Electronic resource] / André Leite, Andry Pinto, Aníbal Matos // Robotics. 2018. Vol. 7, no. 3. P. 32. Mode of access: https://doi.org/10.3390/robotics7030032

8. Ventura J. A. Optimal location of dwell points in a single loop AGV system with time restrictions on vehicle availability [Electronic resource] / José A. Ventura, Brian Q. Rieksts // European Journal of Operational Research. 2009. Vol. 192, no. 1. P. 93–104. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.014

9. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda [Electronic resource] / Giuseppe Fragapane [et al.] // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294, no. 2. P. 405–426. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019

10. Hierarchical Traffic Management of Multi-AGV Systems With Deadlock Prevention Applied to Industrial Environments [Electronic resource] / Federico Pratissoli [et al.] // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2023. P. 1–15. Mode of access: https://doi.org/10.1109/tase.2023.3276233

11. Cooperative cloud robotics architecture for the coordination of multi-AGV systems in industrial warehouses [Electronic resource] / Elena Cardarelli [et al.] // Mechatronics. 2017. Vol. 45. P. 1–13. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.04.005

12. A Comprehensive Framework for the Design of Modular Robotic Mobile Fulfillment Systems [Electronic resource] / Wei Wang [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 13259–13269. Mode of access: https://doi.org/10.1109/access.2020.2966403

13. Review of autonomous mobile robots in intralogistics: state-of-the-art, limitations and research gaps [Electronic resource] / Thorge Lackner [et al.] // Procedia CIRP. 2024. Vol. 130. P. 930–935. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.187

14. Fault Tolerant Control Architecture Design for Mobile Manipulation in Scientific Facilities [Electronic resource] / Mohammad M. Aref [et al.] // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2015. Vol. 12, no. 1. P. 4. Mode of access: https://doi.org/10.5772/60038

15. Yan R. Novel methodology for optimising the design, operation and maintenance of a multi-AGV system [Electronic resource] / Rundong Yan, S. J. Dunnett, L. M. Jackson // Reliability Engineering & System Safety. 2018. Vol. 178. P. 130–139. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.06.003

**References**

1. Formal Specification and Verification of Autonomous Robotic Systems [Electronic resource] / Matt Luckcuck [et al.] // ACM Computing Surveys. 2019. Vol. 52, no. 5. P. 1–41. Mode of access: https://doi.org/10.1145/3342355

2. Systematic literature review of applications and usage potentials for the combination of unmanned aerial vehicles and mobile robot manipulators in production systems [Electronic resource] / Jannis Sinnemann [et al.] // Production Engineering. 2022. Mode of access: https://doi.org/10.1007/s11740-022-01109-y

3. Lee I. Service Robots: A Systematic Literature Review [Electronic resource] / In Lee // Electronics. 2021. Vol. 10, no. 21. P. 2658. Mode of access: https://doi.org/10.3390/electronics10212658

4. Milecki A. Review of Fault-Tolerant Control Systems Used in Robotic Manipulators [Electronic resource] / Andrzej Milecki, Patryk Nowak // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 2675. Mode of access: https://doi.org/10.3390/app13042675

5. Pierpaoli P. Fault Tolerant Control for Networked Mobile Robots [Electronic resource] / Pietro Pierpaoli, Dominique Sauter, Magnus Egerstedt // 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen, 21–24 August 2018. [S. l.], 2018. Mode of access: https://doi.org/10.1109/ccta.2018.8511420

6. Khalastchi E. Fault Detection and Diagnosis in Multi-Robot Systems: A Survey [Electronic resource] / Eliahu Khalastchi, Meir Kalech // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 18. P. 4019. Mode of access: https://doi.org/10.3390/s19184019

7. Leite A. A Safety Monitoring Model for a Faulty Mobile Robot [Electronic resource] / André Leite, Andry Pinto, Aníbal Matos // Robotics. 2018. Vol. 7, no. 3. P. 32. Mode of access: https://doi.org/10.3390/robotics7030032

8. Ventura J. A. Optimal location of dwell points in a single loop AGV system with time restrictions on vehicle availability [Electronic resource] / José A. Ventura, Brian Q. Rieksts // European Journal of Operational Research. 2009. Vol. 192, no. 1. P. 93–104. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.014

9. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda [Electronic resource] / Giuseppe Fragapane [et al.] // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294, no. 2. P. 405–426. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019

10. Hierarchical Traffic Management of Multi-AGV Systems With Deadlock Prevention Applied to Industrial Environments [Electronic resource] / Federico Pratissoli [et al.] // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2023. P. 1–15. Mode of access: https://doi.org/10.1109/tase.2023.3276233

11. Cooperative cloud robotics architecture for the coordination of multi-AGV systems in industrial warehouses [Electronic resource] / Elena Cardarelli [et al.] // Mechatronics. 2017. Vol. 45. P. 1–13. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.04.005

12. A Comprehensive Framework for the Design of Modular Robotic Mobile Fulfillment Systems [Electronic resource] / Wei Wang [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 13259–13269. Mode of access: https://doi.org/10.1109/access.2020.2966403

13. Review of autonomous mobile robots in intralogistics: state-of-the-art, limitations and research gaps [Electronic resource] / Thorge Lackner [et al.] // Procedia CIRP. 2024. Vol. 130. P. 930–935. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.187

14. Fault Tolerant Control Architecture Design for Mobile Manipulation in Scientific Facilities [Electronic resource] / Mohammad M. Aref [et al.] // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2015. Vol. 12, no. 1. P. 4. Mode of access: https://doi.org/10.5772/60038

15. Yan R. Novel methodology for optimising the design, operation and maintenance of a multi-AGV system [Electronic resource] / Rundong Yan, S. J. Dunnett, L. M. Jackson // Reliability Engineering & System Safety. 2018. Vol. 178. P. 130–139. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.06.003