

Б.І. Придальний, Л.М. Самчук, Н.М. Гулієва, В.А. Сичук

Луцький національний технічний університет

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ДІАГНОСТИКИ ВІДМОВ, ПРОГНОСТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ПОТОЧНОГО МОНІТОРИНГУ

У статті узагальнено сучасні підходи до забезпечення надійності роботизованих і автоматизованих виробничих систем. Розглянуто методи діагностики відмов, прогностичного технічного обслуговування, моніторингу на основі промислового інтернету речей та роль автоматизованої підтримувальної інфраструктури. Запропоновано узагальнену структуру системи забезпечення надійності роботизованого комплексу й подано практичні рекомендації щодо її поетапного впровадження на підприємстві.

Ключові слова: технічний сервіс; роботизовані виробничі системи; системи керування; аналітичне моделювання; мехатронні системи приводів; автоматичне обробне обладнання, проектування елементів обладнання, моніторинг теплофізичних процесів.

B.I. Prydalnyi, L.M. Samchuk, N.M. Hulieva, V.A. Sychuk

IMPROVING THE RELIABILITY OF ROBOTIC MANUFACTURING SYSTEMS BASED ON FAULT DIAGNOSIS, PREDICTIVE MAINTENANCE, AND REAL-TIME MONITORING

The paper considers current approaches to improving the reliability of robotic and automated manufacturing systems based on fault diagnosis, predictive maintenance, real-time condition monitoring, and supporting automated infrastructure. The relevance of the study is determined by the increasing structural and functional complexity of robotic complexes, in which local defects of drives, reducers, bearings, sensors, or auxiliary subsystems may cause unplanned downtime and loss of process stability. The paper generalizes diagnostic, prognostic, and monitoring approaches and proposes a generalized structure of a reliability assurance system for a robotic complex that integrates physical subsystems, data acquisition, local diagnostic processing, IIoT-based data exchange, technical state analytics, and service decision support.

Keywords: technical service; robotic production systems; control systems; analytical modeling; mechatronic drive systems; automatic processing equipment, design of equipment elements, monitoring of thermophysical processes.

Постановка проблеми. Сучасні роботизовані виробничі системи є багатокомпонентними технічними комплексами, у яких взаємодіють механічні, електричні, інформаційні та керувальні підсистеми. За таких умов навіть локальні відхилення технічного стану приводів, редукторів, підшипникових вузлів, сенсорних каналів або допоміжних механізмів можуть спричинити втрату точності, зниження продуктивності та незаплановані простої.

Традиційне реактивне технічне обслуговування вже не забезпечує потрібного рівня надійності роботизованих комплексів. У зв'язку з цим у сучасному виробництві зростає роль підходів, заснованих на безперервному контролі технічного стану, діагностиці відмов і прогнозуванні деградації вузлів. Найбільш перспективним напрямом є прогностичне технічне обслуговування, за якого рішення щодо сервісного втручання приймаються на основі поточних експлуатаційних даних.

Технічною основою такого підходу є поєднання засобів діагностики відмов, поточного моніторингу параметрів роботи та цифрового передавання даних у межах архітектури промислового інтернету речей. Для роботизованих систем найбільш інформативними є сигнали, пов'язані зі станом приводів, механічних передач, підшипників, систем змащування, а також часові ряди навантаження, швидкості та положення осей. Їх використання дає змогу перейти від фіксації факту несправності до раннього виявлення ознак деградації.

Водночас надійність роботизованого комплексу визначається не лише станом основного виконавчого обладнання, а й роботою допоміжної автоматизованої інфраструктури, зокрема транспортно-накопичувальних і складських підсистем. Тому забезпечення надійності доцільно розглядати як інтегровану задачу, що охоплює діагностику відмов, прогностичне технічне обслуговування, поточний моніторинг та узгоджену роботу допоміжних підсистем.

Для узагальнення переваг і обмежень основних підходів до забезпечення надійності роботизованих систем доцільно використати порівняльну характеристику, наведену в табл. 1.

Такий стан в дослідженнях і застосуванні систем діагностики вказує на доцільність розвитку подальших досліджень.

Порівняльна характеристика підходів до забезпечення надійності роботизованих систем

| Група підходів | Основні дані | Переваги | Обмеження | Доцільність використання |
|---|--|--|--|--|
| Класичні діагностичні методи (порогові, rule-based, signal processing, model-based FDI) | струми, вібрації, температура, сигнали контролерів | простота реалізації, інтерпретованість, придатність для локального рівня | обмежена гнучкість, чутливість до шумів, складність виявлення ранньої деградації | базовий рівень діагностики та поточного контролю |
| Data-driven методи (ML, DL, CNN, RNN, LSTM, autoencoder) | часові ряди, багатосенсорні дані, історія відмов | виявлення складних нелінійних залежностей, прогнозування відмов | потреба у великих вибірках, обчислювальна складність, нижча пояснюваність | прогнозування деградації та аномалій |
| ІоТ-моніторинг та цифрові архітектури | сигнали сенсорів, PLC/CNC, мережеві дані | безперервний збір, накопичення історії, інтеграція рівнів керування | вимоги до якості даних, синхронізації, кібербезпеки | технічна основа цифрового супроводу |
| Підтримувальна автоматизована інфраструктура (AS/RS та ін.) | параметри транспортно-накопичувальних і складських підсистем | стабілізація матеріального потоку, зменшення непродуктивних простоїв | непрямий вплив на діагностику основних вузлів | підвищення загальної стійкості комплексу |
| Інтегрований підхід | усі перелічені групи даних | найбільш повне забезпечення надійності, зв'язок діагностики і сервісних рішень | вища складність впровадження | найбільш доцільний для сучасного підприємства |

У працях [1–3] розглянуто сучасні підходи до діагностики відмов, прогностичного технічного обслуговування та ІоТ-реалізації для промислових роботів, однак основний акцент зроблено або на оглядовому узагальненні методів, або на окремих технічних реалізаціях. У джерелах [5–10] висвітлено загальні засади predictive maintenance, оцінювання технічного стану та залишкового ресурсу, проте без достатньої спеціалізації на роботизованих виробничих системах. Роботи [11–17] присвячені архітектурі збору даних, окремим прогностичним моделям та діагностиці окремих вузлів, але вони переважно зосереджені на часткових аспектах проблеми.

Окрему групу становлять джерела [4, 18–21], у яких висвітлено роль автоматизованої підтримувальної інфраструктури, конструктивно-технологічні особливості оснащення, приводів і механізмів маніпулювання. Ці праці є корисними для обґрунтування системної та механіко-конструкторської природи роботизованого комплексу, але не охоплюють повною мірою сучасні засоби цифрової діагностики, ІоТ-моніторингу та прогностичного технічного супроводу.

Таким чином, наявні дослідження достатньо повно висвітлюють окремо методи діагностики, прогностичного обслуговування, архітектури збору даних і допоміжні підсистеми, однак недостатньо робіт, у яких ці складові були б поєднані в єдину систему забезпечення надійності роботизованого виробничого комплексу. Невирішеною залишається проблема формування узагальненої структури такої системи, яка б інтегрувала діагностику відмов, прогностичне технічне обслуговування, поточний моніторинг та підтримувальну автоматизовану інфраструктуру в межах єдиного технічного підходу.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є узагальнення сучасних підходів до забезпечення надійності роботизованих виробничих систем на основі діагностики відмов, прогностичного технічного обслуговування та поточного моніторингу, а також сформувати узагальнену структуру такої системи для практичного впровадження на підприємстві.

Викладення основного матеріалу. На основі аналізу сучасних підходів до діагностики відмов, прогностичного технічного обслуговування, поточного моніторингу та підтримувальної автоматизованої інфраструктури роботизований комплекс доцільно розглядати як багаторівневу

© Б.І. Придальний, Л.М. Самчук, Н.М. Гулієва, В.А. Сичук

систему забезпечення надійності. У такій системі надійність визначається не лише станом основного виконавчого обладнання, а й узгодженою взаємодією сенсорного середовища, локальних засобів керування, цифрових каналів передавання даних, аналітичних модулів оцінювання технічного стану та допоміжних автоматизованих підсистем.

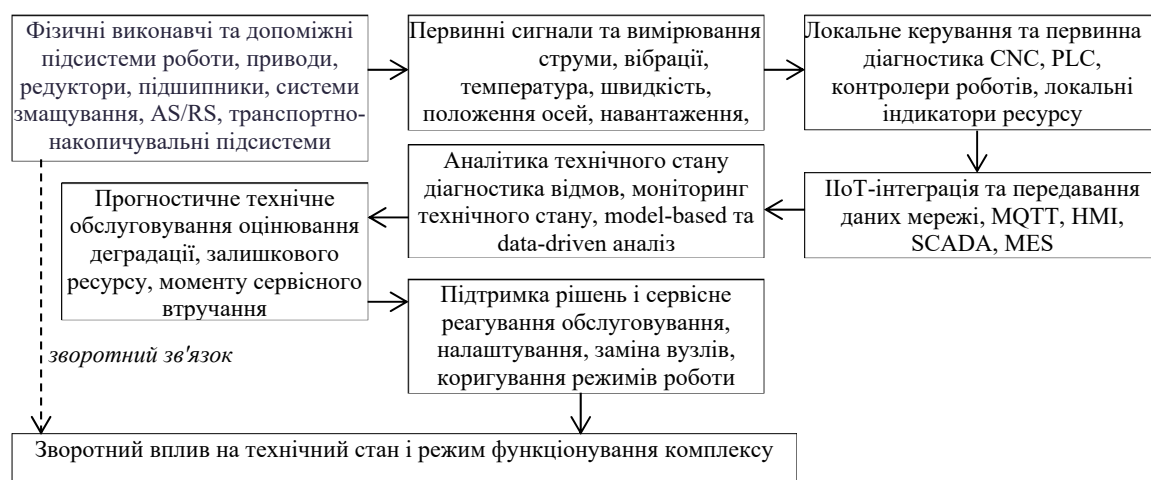


Рис. 1. Узагальнена структура системи забезпечення надійності роботизованого комплексу

Перший рівень структури утворюють фізичні виконавчі та допоміжні підсистеми. До них належать промислові роботи, багатоосьові машини, приводи, редуктори, підшипникові вузли, системи змащування, а також транспортно-накопичувальні й складські підсистеми. Саме на цьому рівні виникають процеси зношування, розрегулювання, перевантаження та інші причини поступової деградації технічного стану. Допоміжна інфраструктура при цьому розглядається як складова загальної надійності комплексу, оскільки порушення матеріального потоку також можуть спричинити непродуктивні простой.

Другий рівень становлять первинні сигнали та вимірювання, які формують інформаційну базу для оцінювання технічного стану. До найбільш інформативних параметрів належать моторні струми, вібрації, температура, швидкість, положення осей, навантаження та тривалість роботи окремих вузлів. Саме ці сигнали дозволяють виявляти ранні ознаки деградації й формувати діагностичні ознаки для подальшого аналізу.

Третій рівень охоплює локальне керування та первинну діагностичну обробку. На цьому рівні функціонують CNC, PLC, контролери роботів та інші засоби автоматизації, які не лише забезпечують технологічне керування, а й можуть виконувати розрахунок локальних індикаторів технічного стану. Доцільність такого підходу полягає у переході від передавання сирих сигналів до формування структурованої діагностичної інформації, придатної для подальшого використання в системі технічного супроводу.

Четвертий рівень становить IoT-інтеграція та передавання даних. На цьому рівні локально сформовані параметри надходять до вищих інформаційних рівнів через промислові мережі та мережеві сервіси обміну, зокрема MQTT. Це забезпечує накопичення історичних даних, віддалений доступ до діагностичної інформації, інтеграцію з HMI, SCADA, MES та формування єдиного цифрового середовища супроводу роботизованого комплексу.

П'ятий рівень утворює аналітика технічного стану, у межах якої реалізуються *fault detection and diagnosis, condition monitoring, model-based* та *data-driven* методи. На цьому рівні відбуваються виявлення аномалій, інтерпретація відхилень, оцінювання деградації та визначення ознак, які є підставою для прогнозування технічного стану. Фактично саме тут експлуатаційні дані перетворюються на інженерну інформацію про працездатність вузлів і підсистем.

Шостий рівень становить прогностичне технічне обслуговування та підтримка рішень. Його функція полягає у визначенні моменту доцільного сервісного втручання, оцінюванні залишкового ресурсу, формуванні попереджувальних станів і виробленні рекомендацій щодо налаштування, обслуговування або заміни вузлів. Завершальним елементом системи є сервісне реагування, результатом якого стає коригування технічного стану та режимів роботи комплексу.

Таким чином, узагальнена структура системи забезпечення надійності роботизованого комплексу являє собою замкнений контур, у якому фізичний стан обладнання, поточні сигнали,

локальна діагностика, цифрове передавання даних, аналітика та сервісні рішення функціонують як взаємопов'язані елементи. За такого підходу *fault diagnosis*, прогностичне технічне обслуговування, ПоТ-моніторинг і підтримувальна автоматизована інфраструктура розглядаються не ізольовано, а як складові єдиної архітектури цифрового технічного супроводу.

Для узагальненого порівняння підходів до забезпечення надійності роботизованих виробничих систем доцільно формалізувати їх за сукупністю критеріїв, які мають безпосереднє практичне значення для промислового впровадження.

З урахуванням аналізу літератури такими критеріями прийнято:

- K1* – діагностична інформативність;
- K2* – придатність до раннього виявлення деградації;
- K3* – інтерпретованість результатів;
- K4* – складність впровадження;
- K5* – вимоги до обсягу і якості даних;
- K6* – придатність до роботи в реальному часі;
- K7* – сумісність з архітектурою ПоТ.

Для інтегрального оцінювання підходів введемо узагальнений показник ефективності:

$$Q_j = \sum_{i=1}^7 w_i k_{ij} \quad (1)$$

де Q_j – інтегральна оцінка j -го підходу;

k_{ij} – бальна оцінка j -го підходу за i -м критерієм за шкалою від 1 до 5;

w_i – ваговий коефіцієнт критерію, причому

$$\sum_{i=1}^7 w_i = 1.$$

Для задач забезпечення надійності роботизованих комплексів доцільно надати підвищену вагу критеріям діагностичної інформативності, раннього виявлення деградації та придатності до роботи в реальному часі. У межах даної статті прийнято такі вагові коефіцієнти: $w_1=0,20$, $w_2=0,20$, $w_3=0,10$, $w_4=0,10$, $w_5=0,10$, $w_6=0,15$, $w_7=0,15$.

На основі прийнятої системи критеріїв виконано узагальнене порівняння основних груп підходів, результати якого наведено в табл. 2.

Табл. 2

Порівняльна оцінка підходів до забезпечення надійності роботизованих систем

| Підхід | (K1) | (K2) | (K3) | (K4) | (K5) | (K6) | (K7) | (Qj) |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Класичні діагностичні методи | 3 | 2 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3,70 |
| Data-driven методи | 5 | 5 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 3,70 |
| ПоТ-моніторинг | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3,95 |
| Підтримувальна автоматизована інфраструктура | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3,20 |
| Інтегрований підхід | 5 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 5 | 4,35 |

Наведені результати мають узагальнений експертно-аналітичний характер і відображають не точні виміряні значення, а відносну придатність підходів до використання в роботизованих виробничих системах. Із табл. 1 видно, що класичні діагностичні методи зберігають високу цінність завдяки простоті впровадження, високій інтерпретованості та придатності до роботи в реальному часі, однак поступаються за можливістю раннього виявлення слабковираженої деградації. *Data-driven* методи, навпаки, забезпечують найвищу інформативність і прогностичну здатність, проте мають вищі вимоги до даних, складніші в реалізації та менш прозорі з погляду технічного тлумачення результатів.

Окремо слід відзначити ПоТ-моніторинг, який сам по собі не є повноцінним методом діагностики, але формує інформаційну основу для безперервного спостереження за станом комплексу, накопичення історичних рядів і подальшого використання як класичних, так і *data-driven* алгоритмів. Підтримувальна автоматизована інфраструктура, зокрема AS/RS, має нижчу пряму діагностичну інформативність, однак істотно впливає на загальну стійкість функціонування комплексу через забезпечення безперервності матеріального потоку.

Найвищу інтегральну оцінку має інтегрований підхід, який поєднує локальну діагностику, ПоТ-моніторинг, аналітичні модулі оцінювання технічного стану та підтримку сервісних рішень.

Його перевага полягає в тому, що він дозволяє компенсувати слабкі сторони окремих підходів: зберегти інтерпретованість класичних методів, використати прогностичний потенціал *data-driven* моделей та забезпечити цифрову зв'язність усіх рівнів системи через IoT-архітектуру.

Таким чином, формалізоване порівняння показує, що для роботизованих виробничих систем найбільш доцільним є не ізольоване застосування окремого підходу, а побудова інтегрованої системи, у якій класичні діагностичні методи, прогностичні моделі, IoT-моніторинг та допоміжна автоматизована інфраструктура працюють як взаємопов'язані елементи єдиного контуру забезпечення надійності.

Практичне впровадження системи забезпечення надійності роботизованого комплексу доцільно здійснювати поетапно, переходячи від локального контролю окремих параметрів до інтегрованої системи діагностики, прогнозування та підтримки сервісних рішень.

Оцінювання пріоритету моніторингу вузлів. Для практичного впровадження системи забезпечення надійності доцільно формалізувати вибір вузлів, які потребують першочергового моніторингу. З цією метою введемо інтегральний показник пріоритету моніторингу:

$$P_i = w_1 C_i + w_2 D_i + w_3 O_i + w_4 S_i, \quad (2)$$

де P_i – пріоритет моніторингу i -го вузла;

C_i – критичність вузла для працездатності комплексу;

D_i – імовірність або інтенсивність деградації;

O_i – інформативність і доступність параметрів для контролю;

S_i – сервісна значущість наслідків відмови;

w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти критеріїв, причому $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$.

У межах даної статті для узагальненого оцінювання доцільно прийняти такі значення вагових коефіцієнтів: $w_1=0,35, w_2=0,3, w_3=0,2, w_4=0,15$.

Прийнята система ваг відображає пріоритет критичності вузла та інтенсивності його деградації порівняно з іншими критеріями. Кожний показник C_i, D_i, O_i, S_i доцільно оцінювати за п'ятибальною шкалою від 1 до 5, де 1 відповідає мінімальному рівню ознаки, а 5 - максимальному.

За отриманим значенням P_i вузли можна поділити на три групи. При $P_i \geq 4,0$ вузол належить до групи високого пріоритету безперервного моніторингу. При $3,0 \leq P_i < 4,0$ доцільним є періодичний моніторинг із підвищеною увагою до динаміки параметрів. При $P_i < 3,0$ достатнім є звичайний рівень контролю в межах загальної системи технічного супроводу. Запропонований показник дозволяє ранжувати вузли роботизованого комплексу за пріоритетом моніторингу та обґрунтовано формувати перелік параметрів, які доцільно включати до системи поточного контролю технічного стану.

На першому етапі слід визначити найбільш критичні вузли комплексу, відмова яких безпосередньо впливає на точність, продуктивність або безперервність роботи. До них, як правило, належать приводи, редуктори, підшипникові вузли, системи змащування, механічні передачі, а також транспортно-накопичувальні й допоміжні підсистеми.

На другому етапі доцільно обмежити перелік контрольованих параметрів найбільш інформативними сигналами. Для роботизованих систем такими параметрами є моторні струми, вібрації, температура, швидкість, положення осей, навантаження, тривалість роботи сервоприводів і показники споживання ресурсу окремих вузлів. Саме ці дані є найбільш придатними для раннього виявлення деградації.

На третьому етапі рекомендовано починати з простих і технічно інтерпретованих методів діагностики. На практиці це означає використання порогового контролю, аналізу трендів, сигналів струму, часових інтервалів роботи, а також локальних індикаторів зносу чи ресурсу, які можуть бути реалізовані на рівні PLC або CNC. Такий підхід спрощує початкове впровадження і дає результати, зрозумілі для сервісного персоналу.

На четвертому етапі слід забезпечити належну якість даних. Для цього необхідно передбачити перевірку достовірності сигналів, узгодження одиниць вимірювання, синхронізацію часових рядів, фільтрацію шумів і контроль пропущених значень. Без цього навіть правильно обрана архітектура моніторингу не забезпечить надійної діагностики та прогнозування.

На п'ятому етапі доцільно поєднати локальну діагностику з IoT-обміном даними. Локально обчислені індикатори технічного стану повинні передаватися на вищий рівень для накопичення історії, виявлення трендів, порівняння режимів експлуатації та підтримки сервісних рішень. Це є необхідною умовою переходу від поточного контролю до прогностичного технічного обслуговування.

На шостому етапі, після накопичення достатнього масиву якісних даних, доцільно розширювати систему за рахунок *data-driven* підходів. Їх слід застосовувати не замість класичних методів, а разом із ними, оскільки поєднання інтерпретованих діагностичних ознак і прогнозних моделей є найбільш придатним для реального виробництва.

Окрему увагу слід приділяти допоміжній автоматизованій інфраструктурі. Під час оцінювання надійності роботизованого комплексу необхідно враховувати стан і режим роботи транспортно-накопичувальних та складських підсистем, оскільки порушення їх функціонування може спричинити простої навіть за технічно справного основного обладнання.

Отже, практично доцільною є така послідовність впровадження: визначення критичних вузлів, вибір інформативних параметрів, використання простих локальних індикаторів, забезпечення якості даних, інтеграція з IoT-архітектурою, подальше підключення прогнозних моделей та врахування допоміжної інфраструктури як складової загальної системи забезпечення надійності.

Висновки

У статті узагальнено сучасні підходи до забезпечення надійності роботизованих виробничих систем і показано, що для таких комплексів ключовою умовою підвищення надійності є перехід від реактивного технічного обслуговування до безперервної діагностики відмов, поточного моніторингу технічного стану та прогностичного технічного обслуговування.

Встановлено, що ізольоване застосування окремих підходів має обмежену ефективність: класичні діагностичні методи забезпечують інтерпретованість і простоту впровадження, *data-driven* моделі підвищують здатність до раннього виявлення деградації, а IoT-моніторинг створює інформаційну основу для накопичення та передавання даних, однак лише їх інтегроване поєднання дозволяє сформувати повноцінну систему забезпечення надійності роботизованого комплексу.

Формалізоване порівняння підходів за критеріями діагностичної інформативності, здатності до раннього виявлення деградації, інтерпретованості, складності впровадження, вимог до даних, придатності до роботи в реальному часі та сумісності з IoT-архітектурою показало, що найбільш доцільним для роботизованих виробничих систем є інтегрований підхід, у межах якого локальна діагностика, прогностичні моделі, цифровий моніторинг і підтримувальна автоматизована інфраструктура функціонують як взаємопов'язані елементи єдиного контуру технічного супроводу.

Запропоновано узагальнену структуру системи забезпечення надійності роботизованого комплексу, що охоплює фізичні виконавчі та допоміжні підсистеми, рівень первинного збору сигналів, локальне керування і первинну діагностичну обробку, IoT-інтеграцію, аналітику технічного стану, прогностичне технічне обслуговування та рівень підтримки сервісних рішень. Така структура дозволяє розглядати надійність комплексу як результат узгодженої взаємодії всіх рівнів системи, а не лише як властивість окремих вузлів.

Обґрунтовано, що підтримувальна автоматизована інфраструктура, зокрема транспортно-накопичувальні підсистеми та AS/RS, повинна розглядатися як складова загальної системи забезпечення надійності, оскільки її функціональний стан прямо впливає на безперервність матеріального потоку, ритмічність роботи та стійкість функціонування роботизованого виробничого осередку.

Для практичного впровадження системи забезпечення надійності запропоновано поетапний підхід, який передбачає: виділення критичних вузлів, вибір найбільш інформативних параметрів контролю, використання локальних інтерпретованих індикаторів, забезпечення якості даних, інтеграцію локальної діагностики з IoT-обміном та подальше розширення системи за рахунок прогнозних моделей. Запропонований інтегральний показник пріоритету моніторингу дає змогу ранжувати вузли за доцільністю контролю і формувати технічно обґрунтований склад системи моніторингу.

Отже, підвищення надійності роботизованих виробничих систем доцільно розглядати як комплексну інженерну задачу, що охоплює діагностику відмов, поточний моніторинг, прогностичне технічне обслуговування, цифрову інфраструктуру збору даних і узгоджену роботу допоміжних автоматизованих підсистем, а її розв'язання повинно базуватися на інтегрованому технічному підході.

Список використаних джерел

1. Sabry A.H., Ungku Amirulddin U.A.B. A review on fault detection and diagnosis of industrial robots and multi-axis machines. *Results in Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102397>

2. Achouch M., Dimitrova M., Ziane K., Sattarpanah Karganroudi S., Dhoub R., Ibrahim H., Adda M. On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 8081. <https://doi.org/10.3390/app12168081>
3. Wojtulewicz A., Chaber P. Industrial Robot Control System with a Predictive Maintenance Module Using IIoT Technology. *Sensors*. 2025. Vol. 25. P. 1154. <https://doi.org/10.3390/s25041154>.
4. Edouard A., Sallez Y., Fortineau V., Lamouri S., Berger A. Automated Storage and Retrieval Systems: An Attractive Solution for an Urban Warehouse's Sustainable Development. *Sustainability*. 2022, Vol. 14. P. 9518. <https://doi.org/10.3390/su14159518>.
5. Kaczmarek M.J., Gola A. Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing – An Overview. *IFAC-Papers OnLine*. 2019. Vol. 52, 91–96.
6. Tidden, W., Braaksma J., Tinga T. Exploring predictive maintenance applications in industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 68–85.
7. Li Z., Wang Y., Wang K.-S. Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario. *Advanced Manufacturing*. 2017. Vol. 5. P. 377–387.
8. Vogl G.W., Weiss B.A., Helu M. A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2019. Vol. 30. P. 79–95.
9. Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data-driven approaches. *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 213. P. 1–14.
10. Huliieva N., Lishchyna N., Pasternak V., Huliieva Z. Development of a system for predicting failures of bagging machines. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15(4). P. 10–13. <https://doi.org/10.35784/iapgos.8054>
11. Izagirre U., Andonegui I., Landa-Torres I., Zurutuza U. A practical and synchronized data acquisition network architecture for industrial robot predictive maintenance in manufacturing assembly lines. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 74. P. 102287.
12. Doyel J., Gallege T., Ebru T.B., Dudas C., Skoogh A. A Predictive Maintenance Application for A Robot Cell using LSTM Model. *IFAC-Papers OnLine*. 2022. Vol. 55. P. 115–120.
13. Huliieva N.M., Somov D.O., Pasternak V.V., Samchuk L.M., Chetverzhuk T.I. The selection of boron nitride circles for grinding saponite – titanium composites using non-parametric method. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2020. Vol. 57(6). P. 36-47. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0033>
14. Mourtzis D., Tsubou S., Angelopoulos J. Robotic Cell Reliability Optimization Based on Digital Twin and Predictive Maintenance. *Electronics*. 2023. Vol. 12. P. 1999.
15. Bonci A., Longhi S., Nabissi G., Verdini F. Predictive Maintenance System using motor current signal analysis for Industrial Robot. In: *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2019.
16. Azamfar M., Singh J., Bravo-Imaz I., Lee J. Multisensor data fusion for gearbox fault diagnosis using 2-D convolutional neural network and motor current signature analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106861>.
17. Choudhary A., Goyal D., Shimi S.L., Akula A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9286-z>.
18. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І., Гао Сінмін. Технологічне оснащення фрезерних верстатів: проектування, теорія, практика: монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2023. 292 с.
19. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості: підручник. Луцьк: Вежа-Друк, 2023. 284 с.
20. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2016. 352 с.
21. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Проектування цільових механізмів маніпулювання верстатів нового покоління: навчальний посібник. 2-ге вид. Луцьк: Вежа-Друк, 2014. 428 с.