

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-5>
УДК 681.518.5

ПРИДАЛЬНИЙ БОРИС

Луцький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-8565-5986>
e-mail: b.prydalnyi@lutsk-ntu.com.ua

САМЧУК ЛЮДМИЛА

Луцький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0003-2516-045X>
e-mail: Samchuk204@gmail.com

ГУЛІЄВА НАТАЛІЯ

Луцький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-9282-4880>
e-mail: n.huliieva@lntu.edu.ua

СИЧУК ВІКТОР

Луцький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-8267-0846>
e-mail: v.sychuk@lntu.edu.ua

ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ РОБОТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті розглянуто проблему обґрунтування структури підсистеми моніторингу та діагностики роботизованих виробничих комплексів в умовах зростання вимог до точності, надійності, швидкодії та цифрової інтеграції сучасного автоматизованого виробництва. Показано, що наявні підходи переважно зосереджені на засобах відстеження процесу, на діагностиці технічного стану, або на прогностичному обслуговуванні та передаванні даних. Систематизовано типові засоби реалізації цих функцій і сформовано систему критеріїв їх оцінювання, що охоплює точність, швидкість, діагностичне покриття, інтегрованість, обчислювальну складність та експлуатаційну цінність. Запропоновано три альтернативні структури підсистеми та виконано їх порівняння за інтегральним критерієм. Встановлено, що комбінована модульна структура, яка поєднує моніторинг процесу, діагностику технічного стану, прогнозування та цифрову інтеграцію, має найвищу інтегральну оцінку 4,47 порівняно з альтернативами 3,76 і 3,50.

Ключові слова: мехатронні системи моніторингу, проектування підсистем виробничого обладнання, автоматичне керування, аналітичне моделювання характеристик, вплив теплофізичних ефектів, підтримка експлуатаційних характеристик.

PRYDALNYI BORYS, SAMCHUK LIUDMYLA, HULIEVA NATALIIA, SYCHUK VIKTOR

Luts'k National Technical University, Luts'k, Ukraine

SUBSTANTIATION OF MONITORING AND DIAGNOSTICS SYSTEMS OF ROBOTIC PRODUCTION COMPLEXES

The article considers the problem of substantiating the structure of the monitoring and diagnostics subsystem of robotic production complexes in the conditions of increasing requirements for accuracy, reliability, speed and digital integration of modern automated production. It is shown that the existing approaches are mainly focused either on means of process tracking, or on diagnostics of the technical condition, or on predictive maintenance and data transmission, while the task of forming an integral structure of the subsystem in which these functions were coordinated with each other remains insufficiently worked out. The research method is to substantiate the structure of the monitoring and diagnostics subsystem of the robotic complex based on the generalization of modern approaches to process tracking, technical condition assessment, failure prediction and digital data integration. The work uses a functional-structural approach, analysis and generalization of scientific sources, classification of technical solutions, functional decomposition, comparative analysis, structural synthesis and multi-criteria evaluation of alternative structures. As a result, the functional composition of the subsystem was determined, which includes data collection and pre-processing modules, the tracking process, failure detection, technical condition assessment, forecasting and decision support with integration into the production digital environment. The types of means of implementing these functions were systematized and a system of criteria for their evaluation was formed, which increases accuracy, speed, diagnostic coverage, integrity, computational complexity and operational value. Three alternative subsystem structures were proposed and their comparison was performed using the integral criterion. It was established that the combined modular structure, which supports the monitoring process, technical condition diagnostics, forecasting and digital integration, has the highest integral score of 4.47 compared to the alternatives of 3.76 and 3.50.

Keywords: mechatronic monitoring systems, design of production equipment subsystems, automatic control, analytical modeling of characteristics, influence of thermophysical effects, maintenance of operational characteristics.

Стаття надійшла до редакції / Received 23.04.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Придальний Борис, Самчук Людмила, Гулієва Наталія, Синчук Віктор

Постановка проблеми

Сучасне виробництво характеризується зростанням рівня автоматизації, ускладненням технологічних операцій і підвищенням вимог до точності, продуктивності та гнучкості обладнання. Разом із тим ефективність роботизованого комплексу визначається не лише кінематичними та силовими параметрами виконавчих механізмів, а й здатністю системи своєчасно фіксувати стан технологічного процесу, контролювати поведінку робочих органів, виявляти відхилення та формувати інформаційну основу для прийняття інженерних рішень.

Отже, задача обґрунтування структури підсистеми моніторингу та діагностики роботизованого обладнання та виробничих систем є актуальною як з наукового, так і з прикладного погляду, оскільки безпосередньо пов'язана з підвищенням ефективності, надійності та керованості сучасних роботизованих технологічних систем.

У працях [1]–[6] основну увагу зосереджено на засобах відстеження й аналізу процесів у роботизованих системах. Показано, що машинний зір, оцінювання положення камери, компенсація похибок траєкторії, візуальний сервопривід і спеціалізовані рішення для зварювання та роботизованої обробки істотно розширюють функціональні можливості промислових роботів. Разом із тим більшість цих робіт орієнтована на підвищення точності виконання окремої операції, тоді як питання узгодження засобів відстеження з підсистемами технічної діагностики та експлуатаційного супроводу опрацьоване обмежено. Крім того, огляд Makulavičius et al. [1] прямо вказує на проблеми сумісності machine vision із конкретними роботизованими установками і має потребу в додаткових алгоритмах або обладнанні для підвищення точності, а також залежність результату від якості навчальних даних.

У джерелах [7]–[10] представлено інший блок досліджень – fault detection and diagnosis, predictive maintenance, цифрові двійники та надійність роботизованих комірків. Їх сильним боком є перехід від реактивного обслуговування до прогностичного, що дає змогу виявляти відхилення на ранніх стадіях, зменшувати простой та підвищувати готовність обладнання. Зокрема, у [9] реалізовано практичну систему, де дані від робота, керованого через CNC, обробляються в PLC, візуалізуються в HMI та передаються через MQTT для IoT-рішень. Водночас навіть у цих параметрах робіт переважає орієнтація або на окремі алгоритми прогнозування, або на іншу архітектуру збору даних. Узагальнене структурне обґрунтування підсистеми, яка б поєднувала моніторинг процесу, діагностику стану, прогнозування і підтримку рішень для роботизованого комплексу як цілісної технічної системи, фактично відсутнє.

Окрему групу становлять праці [8]–[9], присвячені архітектурам збору й передавання даних, прогнозуванню на основі нейронних мереж, цифровим двійникам і промисловим протоколам обміну. Вони стосуються інфраструктури збору й передавання даних. Проте ці дослідження переважно розглядають рівень комунікації, або рівень аналітики, не забезпечуючи достатньо чіткого зв'язку між функціональним складом підсистеми та вимогами конкретного роботизованого технологічного комплексу. У результаті залишається невизначеним, які саме модулі є обов'язковими, якими критеріями слід керуватися при їх виборі та як поєднати засоби відстеження, діагностики й прогнозування в єдиній структурі. У працях [10]–[12] роботизовані та мехатронні засоби розглядаються в ширшому функціонально-структурному й конструктивному аспектах. Вони підтверджують доцільність розгляду підсистеми моніторингу й діагностики як невід'ємної складової його цілісної технічної структури.

Мета і задачі дослідження

Об'єкт дослідження: роботизований технологічний комплекс у виробничому середовищі.

Предмет дослідження: методи і засоби моніторингу, відстеження технологічного процесу та діагностики технічного стану роботизованого комплексу.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні структури підсистеми моніторингу та діагностики роботизованого комплексу на основі узагальнення сучасних підходів до відстеження процесів, оцінювання технічного стану, прогнозування відмов і цифрової інтеграції даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання дослідження:

Проаналізувати сучасні технічні й алгоритмічні рішення, що застосовуються для моніторингу, відстеження та діагностики в роботизованих комплексах.

Систематизувати засоби реалізації основних функцій підсистеми, зокрема збору даних, відстеження процесу, виявлення відхилень, оцінювання технічного стану та прогнозування відмов.

Розробити узагальнену структурну схему підсистеми моніторингу і діагностики роботизованого комплексу та обґрунтувати доцільність її застосування.

Матеріал і результати дослідження

Для порівняння структур підсистеми здійснюємо експертно-аналітичне оцінювання трьох альтернатив за шістьма критеріями. Оцінки виставляються за 5-бальною шкалою. Підсумкове значення формується як середнє значення за результатами експертного опитування (табл. 1). Розглянемо три альтернативних структури: A₁ – структура без модуля прогнозування; A₂ – структура без vision-based відстеження; A₃ – запропонована, комбінована структура.

Таблиця 1

Альтернативні структури підсистеми моніторингу та діагностики

Альтернатива	Склад модулів	Характеристика
A ₁	Збір даних + виявлення відхилень + оцінювання стану + інтеграція	Спрощена діагностична структура
A ₂	Збір даних + відстеження + виявлення відхилень + інтеграція	Структура з акцентом на процес
A ₃	Збір даних + відстеження + виявлення відхилень + оцінювання стану + прогнозування + інтеграція	Комбінована структура

Структура А₁ є найпростішою з погляду реалізації, проте не забезпечує прогнозування і внаслідок цього зберігає реактивний характер технічного супроводу. Структура А₂ краще пристосована до контролю перебігу технологічної операції, але не охоплює повною мірою задачі оцінювання технічного стану функціональних вузлів. Структура А₃ є найбільш функціонально повною, але потребує додаткового обґрунтування з погляду інтеграції та доцільності.

У таблиці 2 найбільше значення надано критеріям точності, діагностичного покриття і швидкодії, оскільки саме вони визначають придатність підсистеми до ефективного функціонування в умовах виробничого середовища. Критерій обчислювальної складності враховано з меншим значенням, оскільки для промислової системи другорядним є не мінімум обчислень як такий, а досягнення прийнятного співвідношення між ресурсомісткістю і функціональною повнотою.

Таблиця 2

Критерії оцінювання альтернативних структур			
Критерій	Позначення	Зміст критерію	Вага
Точність	K ₁	Здатність підсистеми коректно відображати стан процесу або обладнання	0,22
Швидкодія	K ₂	Придатність до роботи в реальному або близькому до реального часі	0,18
Діагностичне покриття	K ₃	Повнота охоплення відхилень, несправностей та симптомів деградації	0,20
Інтегровність	K ₄	Легкість включення до наявної архітектури роботизованого комплексу	0,15
Обчислювальна складність	K ₅	Прийнятність вимог до обчислювальних ресурсів і налаштування	0,10
Експлуатаційна цінність	K ₆	Очікуваний внесок у надійність, зниження простоїв і технічний супровід	0,15

Матрицю оцінювання альтернативних структур наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Матриця оцінювання альтернативних структур						
Альтернатива	K1	K2	K3	K4	K5	K6
A1	3	5	3	5	4	3
A2	4	4	2	4	3	4
A3	5	4	5	4	3	5

На підставі даних табл. 3 та формули (1) одержано інтегральні оцінки альтернативних структур (табл 4). Інтегральну оцінку кожної альтернативи визначали за формулою зваженої суми:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n w_i q_{ij}, \quad (1)$$

де Q_j – інтегральна оцінка j -ї альтернативи; w_i – вага i -го критерію; q_{ij} – оцінка j -ї альтернативи за i -м критерієм, n – кількість критеріїв.

Для альтернативи А₁: $Q_1=0,22 \cdot 3+0,18 \cdot 5+0,20 \cdot 3+0,15 \cdot 5+0,10 \cdot 4+0,15 \cdot 3=3,76$.

Для альтернативи А₂: $Q_2=0,22 \cdot 4+0,18 \cdot 4+0,20 \cdot 2+0,15 \cdot 4+0,10 \cdot 3+0,15 \cdot 4=3,50$.

Для альтернативи А₃: $Q_3=0,22 \cdot 5+0,18 \cdot 4+0,20 \cdot 5+0,15 \cdot 4+0,10 \cdot 3+0,15 \cdot 5=4,47$.

Таблиця 4

Інтегральні оцінки альтернативних структур	
Альтернатива	Інтегральна оцінка Q_j
A1	3,76
A2	3,50
A3	4,47

Отримані результати показують, що найвищу інтегральну оцінку має альтернатива А₃, тобто комбінована структура, яка поєднує модулі збору даних, відстеження процесу, виявлення відхилень, оцінювання технічного стану, прогнозування й інтеграції. Її перевага зумовлена насамперед вищим діагностичним покриттям, більшою точністю та найбільшою експлуатаційною цінністю. Альтернатива А₁ виявилася дещо слабшою через відсутність прогнозного компонента, тоді як альтернатива А₂ має найнижчу оцінку через недостатнє охоплення задач оцінювання технічного стану. Таким чином, використання багатокритеріальної процедури підтверджує доцільність вибору комбінованої структури як рекомендованого варіанта побудови підсистеми моніторингу та діагностики роботизованого комплексу.

Висновки

У результаті аналізу сучасних технічних і алгоритмічних рішень, що застосовуються в роботизованих комплексах, встановлено, що засоби machine vision, відстеження процесу, fault detection and diagnosis, predictive maintenance та IoT-інтеграції формують основні напрями побудови підсистем моніторингу та діагностики, однак у наявних дослідженнях переважає їх розгляд як окремих локальних рішень без достатнього структурного узгодження між собою.

Систематизовано засоби реалізації основних функцій підсистеми. Показано, що засоби машинного зору і відстеження є найбільш придатними для контролю просторової поведінки об'єктів і перебігу технологічної операції, FDI-підходи – для оперативного виявлення відхилень й оцінювання технічного стану, predictive maintenance – для прогнозування деградації та планування обслуговування, а IoT-засоби – для інтеграції підсистеми у виробниче цифрове середовище.

Розроблено узагальнену структурну схему підсистеми моніторингу й діагностики роботизованого комплексу та обґрунтовано доцільність її побудови як комбінованої модульної структури, що поєднує засоби спостереження за процесом, виявлення відхилень, оцінювання технічного стану, прогнозування відмов і цифрової інтеграції. Такий підхід забезпечує одночасно контроль перебігу операції, технічного стану та підтримку сервісних рішень.

Література

1. Makulavičius M., Petronienė J.J., Šutinys, E., Bučinskas, V., Dziedzickis A. Industrial Robotic Setups: Tools and Technologies for Tracking and Analysis in Industrial Processes // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, № 18. – P. 10249. DOI: 10.3390/app151810249
2. Roveda L., Maroni M., Mazzuchelli L., Praolini L., Shahid A.A., Bucca G., Piga, D. Robot End-Effector Mounted Camera Pose Optimization in Object Detection-Based Tasks // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2022. – Vol. 104. – P. 16. DOI: 10.1007/s10846-021-01558-0
3. Bilal D.K., Unel M., Tunc L.T., Gonul B. Development of a vision based pose estimation system for robotic machining and improving its accuracy using LSTM neural networks and sparse regression // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2022. – Vol. 74. P. 102262. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102262
4. Tan S., Yang J., Ding H. A prediction and compensation method of robot tracking error considering pose-dependent load decomposition // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2023. – Vol. 80. – P. 102476. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102476
5. D'Avella S., Avizzano C.A., Tripicchio P. ROS-Industrial based robotic cell for Industry 4.0: Eye-in-hand stereo camera and visual servoing for flexible, fast, and accurate picking and hooking in the production line // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2023. – Vol. 80. – P. 102453. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102453
6. Eren B., Demir M.H., Mistikoglu S. Recent developments in computer vision and artificial intelligence aided intelligent robotic welding applications // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 126. P. 4763–4809. DOI: 10.1007/s00170-023-11456-4
7. 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. – Vol. 23. P. 102397. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102397
8. Huliieva N., Lishchyna N., Pasternak V., Huliieva Z. (2025). 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>
9. Doyel J., Gallege T., Turanoglu Bekar E., Dudas C., Skoogh A. A Predictive Maintenance Application for A Robot Cell using LSTM Model // *IFAC-PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55, № 19. P. 115–120. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.193
10. Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І. Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості: підручник. Луцьк: Вежа-Друк. – 2023. – 284 с.
11. Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія. Луцьк: Вежа-Друк. – 2016. – 352 с.
12. Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І. Проектування цільових механізмів маніпулювання верстатів нового покоління: навчальний посібник. 2-ге вид. Луцьк: Вежа-Друк. – 2014. – 428 с.

References

1. Makulavičius M., Petronienė J.J., Šutinys, E., Bučinskas, V., Dziedzickis A. Industrial Robotic Setups: Tools and Technologies for Tracking and Analysis in Industrial Processes // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, № 18. – P. 10249. DOI: 10.3390/app151810249
2. Roveda L., Maroni M., Mazzuchelli L., Praolini L., Shahid A.A., Bucca G., Piga, D. Robot End-Effector Mounted Camera Pose Optimization in Object Detection-Based Tasks // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2022. – Vol. 104. – P. 16. DOI: 10.1007/s10846-021-01558-0
3. Bilal D.K., Unel M., Tunc L.T., Gonul B. Development of a vision based pose estimation system for robotic machining and improving its accuracy using LSTM neural networks and sparse regression // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2022. – Vol. 74. P. 102262. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102262
4. Tan S., Yang J., Ding H. A prediction and compensation method of robot tracking error considering pose-dependent load decomposition // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2023. – Vol. 80. – P. 102476. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102476

5. D'Avella S., Avizzano C.A., Tripicchio P. ROS-Industrial based robotic cell for Industry 4.0: Eye-in-hand stereo camera and visual servoing for flexible, fast, and accurate picking and hooking in the production line // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2023. – Vol. 80. – P. 102453. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102453
6. Eren B., Demir M.H., Mistikoglu S. Recent developments in computer vision and artificial intelligence aided intelligent robotic welding applications // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 126. P. 4763–4809. DOI: 10.1007/s00170-023-11456-4
7. 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. – Vol. 23. P. 102397. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102397
8. Huliieva N., Lishchyna N., Pasternak V., Huliieva Z. (2025). Development of a system for predicting failures of bagging machines. *Information Technology, Automation, Measurements in Economy and Environmental Protection*. – 2025. – Vol. 15(4). – P. 10–13. <https://doi.org/10.35784/iapgos.8054>
9. Doyel J., Gallege T., Turanoglu Bekar E., Dudas C., Skoogh A. A Predictive Maintenance Application for A Robot Cell using LSTM Model // *IFAC-PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55, № 19. P. 115–120. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.193
10. Kuznetsov Yu.M., Prydalnyi B.I. Theory of technical systems in aspects of research and technical creativity: textbook. Lutsk: Vezha-Druk. – 2023. – 284 p.
11. Kuznetsov Yu.M., Prydalnyi B.I. Drives of clamping mechanisms of metalworking machines: monograph. Lutsk: Vezha-Druk. – 2016. – 352 p.
12. Kuznetsov Yu.M., Prydalnyi B.I. Design of target manipulation mechanisms of new generation machine tools: textbook. 2nd ed. Lutsk: Vezha-Druk. – 2014. – 428 p.