

Марченко Н.Б.<https://orcid.org/0000-0001-5008-4116>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Кашкевич С.О.<https://orcid.org/0009-0007-2406-8535>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

АДАПТИВНА ОБРОБКА ДАНИХ У СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ І ДІАГНОСТИКИ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглядається проблема прогнозування інтенсивності вхідного навантаження в системах багаторівневого моніторингу та діагностики, а також задача оцінювання залишкового ресурсу складних технічних об'єктів, що перебувають у нерегламентованих режимах роботи. Розвиток кожного з таких станів описується окремою математичною моделлю, сформованою на основі результатів контрольних вимірювань і статистичних даних експлуатації. Обґрунтовано доцільність застосування полігармонічного підходу, який дає змогу враховувати циклічні, сезонні та випадкові складові змін вхідних інформаційних потоків, характерних для складних технічних і техногенних систем.

Для підвищення точності прогнозування запропоновано поєднання гармонічного аналізу з авторегресійним моделюванням випадкової компоненти, що дозволяє адекватно описувати як детерміновані, так і стохастичні фактори впливу на функціонування системи. Задачу вибору стратегії обслуговування формалізовано в межах теорії ігор із використанням апарату платіжних матриць, що забезпечує можливість порівняльної оцінки альтернативних стратегій з урахуванням витрат, ризиків та очікуваного ефекту від їх реалізації.

Запропоновано структурований підхід до побудови математичного забезпечення системи багаторівневого моніторингу та діагностики, який охоплює підсистеми прогнозування вхідного навантаження, оцінки залишкового ресурсу та вибору оптимальної стратегії реагування. Представлений підхід дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень у процесі діагностування технічного стану об'єктів, а також сприяє зменшенню витрат, пов'язаних із затримками обслуговування. Отримані результати можуть бути використані при створенні диспетчерських і аналітичних алгоритмів реального часу для транспортних, енергетичних і промислових інфраструктур з урахуванням динамічної змінності умов експлуатації. Запропонований підхід має високий потенціал для інтеграції у цифрові платформи технічного обслуговування, особливо в умовах промислових середовищ, орієнтованих на діагностику в реальному часі.

Ключові слова: адаптивні багаторівневі систем моніторингу та діагностики, автоматизовані системи управління, оцінки ефективності, метод найменших квадратів, підсистеми контролю, діагностування, прогнозування і прийняття рішень.

Постановка проблеми. У сфері дослідження систем багаторівневого моніторингу та діагностики (СБМД) складних технічних об'єктів, зокрема для систем масового обслуговування (СМО), останніми роками спостерігається активний розвиток як прикладних, так і теоретичних підходів. СМО із багаторівневою структурою моніторингу та діагностування складних технічних об'єктів відіграють ключову роль у забезпе-

ченні надійності й неперервності функціонування об'єктів критичної інфраструктури [1, 2].

Існуючі підходи до моніторингу й діагностики здебільшого орієнтовані на локальний або короткостроковий аналіз параметрів і не завжди враховують циклічні, сезонні та стохастичні складові вхідних потоків інформації. Крім того, недостатньо формалізованим залишається процес вибору стратегій обслуговування в умовах неви-



значеності та обмежених ресурсів. Це зумовлює необхідність розроблення та вдосконалення математично обґрунтованих методів аналізу режимів функціонування складних технічних об'єктів, які поєднують прогнозування навантаження, оцінку залишкового ресурсу та раціональний вибір стратегій управління у межах систем багаторівневого моніторингу та діагностики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] розглянуто застосування багаторівневих систем для вирішення задач моніторингу та діагностики електрообладнання. Автори аналізують ефективність побудови багаторівневої архітектури на прикладі об'єктів енергетики. Перевагою цієї роботи є практична спрямованість, проте відсутня деталізація щодо алгоритмів прийняття рішень.

У роботі [4] розроблено метод виявлення відмов у реальному часі на основі багатоканального злиття сенсорних даних. Підхід дозволяє досягти високої точності, але орієнтований лише на короткотерміновий контроль, без прогнозування залишкового ресурсу.

Стаття [5] присвячена застосуванню IoT-архітектури для дистанційного моніторингу обладнання. Запропоновано масштабовану систему з хмарною обробкою. Основною перевагою є гнучкість і інтеграція з інтернетом речей, однак дослідження не охоплює промислові об'єкти з високою складністю.

У публікації [6] розглянуто виявлення аномалій у багаторівневих моніторингових системах у мультимарних середовищах із застосуванням великих мовних моделей. Стаття охоплює теоретичні й прикладні аспекти об'єднання даних із багатьох джерел (multi-sensor, multi-modal, multi-level fusion). Розглядаються класичні (Bayesian, Kalman), а також новітні (deep learning, graph fusion) підходи. Такий підхід демонструє високу адаптивність, універсальність і масштабованість для різних СММД, також є акцент на майбутні напрямки досліджень. Але метод потребує великих обчислювальних ресурсів, не адаптований до фізичних технічних об'єктів, є висока складність реалізації у реальному часі. Також робота має стратегічний, оглядовий характер – без практичних кейсів.

Робота [7] пропонує аналітичну платформу для багатопотокового моніторингу у виробничих системах. Автори використовують методи головних компонент та контрольних карт. Перевагою роботи є обробка великих масивів даних, а недоліком є обмежена реалізація адаптивних елементів.

Таким чином, проаналізовані джерела свідчать про актуальність і багатогранність проблематики побудови СБМД. Аналіз показує, що СБМД все частіше розглядаються як життєздатне рішення для відстеження параметрів і оцінки технічного стану в складних та високонавантажених технічних середовищах. Значна частина останніх досліджень акцентує увагу на багаторівневому моніторингу даних, аналізі в режимі реального часу та інтелектуальному прийнятті рішень.

Аналіз сучасних джерел свідчить про високий рівень зацікавлення наукової спільноти в розвитку багаторівневих систем моніторингу та діагностики у складних технічних умовах.

Провідні напрями включають:

- розвиток методів прогнозування надійності;
- впровадження інтелектуальних систем виявлення відмов;

- використання високочутливих сенсорів;
- ф'южн-аналіз даних з декількох джерел;
- побудову цифрових адаптивних платформ.

Однак, залишається ряд недоліків:

- обмежена увага до адаптивної поведінки в динамічних сервісних середовищах;
- недостатня масштабна промислова валідація;
- обчислювальна складність деяких запропонованих рішень.

Майбутні дослідження повинні пріоритетувати гібридні архітектури, які підтримують прогнозу оцінку ресурсів та демонструють адаптивність в сервісно-орієнтованих інфраструктурах, таких як транспортні та виробничі системи, а також для класу складних промислових об'єктів (ГЕС, ТЕС, АЕС) [1,8].

Постановка завдання. Метою роботи є представлення теоретико-ігрового підходу до аналізу функціонування підсистеми діагностування, яка діє за циклічним принципом моніторингу та обслуговування. Такий підхід дозволяє дослідити ймовірнісну структуру маршрутів переміщення обслуговуючого пристрою в системі, враховуючи затримки на моніторинг, діагностику та передачу даних та забезпечує вибір оптимальної стратегії управління на основі полігармонічного аналізу та теоретико-ігрового підходу до оцінки ефективності.

Особливу увагу слід приділити оцінці втрат, пов'язаних із несвоєчасним обслуговуванням об'єктів, що критично важливо для побудови адаптивних алгоритмів диспетчеризації у реальному часі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

– провести аналіз моделей прогнозування розвитку нерегламентованих станів та оцінки залишкового ресурсу складних технічних систем;

– обґрунтувати актуальність застосування полігармонічної моделі для прогнозування інтенсивності вхідного потоку заявок в СБМД з урахуванням циклічності, сезонності та стохастичної природи процесів;

– формалізувати задачу вибору стратегії функціонування СБМД за допомогою методу платіжної матриці, що враховує ймовірні сценарії станів об'єктів;

– реалізувати підхід до вибору оптимальної стратегії з використанням методів теорії ігор та цільових функцій оптимізації (максимізація ефекту або мінімізація витрат).

Виклад основного матеріалу. Актуальність завдання прогнозу в СБМД визначається необхідністю прогнозування навантаження на вході системи за даними від усіх об'єктів техногенних систем, а також оцінки залишкового ресурсу конкретного складного технічного об'єкта, що знаходиться в нерегламентованому стані.

З огляду на циклічність технологічних операцій, сезонність явищ, зумовлених змінами природних циклів, температурних режимів і погодних умов, найбільш адекватною для прогнозування інтенсивності вхідного потоку заявок на вході СБМД є модель, що описується полігармонічним поліномом, представленим у виразі [2]:

$$P_i(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n \left(a_i \cos\left(2\pi K_i \frac{t}{N}\right) + b_i \sin\left(2\pi K_i \frac{t}{N}\right) \right) + d_0 + d_1 t \quad (1)$$

де n – число гармонік на періоді навчання моделі N ; K_i – коефіцієнт, що визначає номер гармоніки ($i = 1, \dots, n; n = N / 2$); t – номер часового інтервалу, $t = 1, 2, 3, \dots$. Коефіцієнти моделі a_0, a_i, b_i є середньостатистичними оцінками коефіцієнтів Фур'є [9] для часових рядів параметрів, отриманих експериментально, а коефіцієнти d_0, d_1 – середньостатистичні характеристики тренду.

Всі коефіцієнти моделі визначаються за допомогою методу найменших квадратів [10]. Згідно значенням вектора Y – вектор вихідних значень, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_N\}$, кожного вкладеного автомату в підсистемі імітації здійснюється вибір і налаштування відповідної моделі часового ряду $P_i(t)$ параметру складного технічного об'єкту у вигляді полігармонічного поліному (1).

Вихідний сигнал моделі, що відповідає узагальненому параметру P^* для моменту t , визначаються як суперпозиція імітаційних сигналів $P_i(t) (i = 1, \dots, m)$:

$$P^*(t) = \sum_{i=1}^m P_i(t). \quad (2)$$

Для уточнення прогнозу модель (1) доповнюється прогнозом випадкової компоненти, що виробляється на основі рівняння авторегресії. Для автоматизації синтезу адекватної моделі можна розробити ітераційну процедуру та алгоритм, що дозволяють на основі послідовного ускладнення моделі за рахунок доповнення її послідовним рядом гармонік синтезувати модель оптимальної складності відповідно до наступних критеріїв: критерієм стохастичності коливань рівнів залишкової послідовності, критерієм нормального розподілу випадкової послідовності залишкової компоненти, критерієм рівності математичного сподівання випадкової послідовності нулю і критерієм незалежності значень випадкової послідовності (критерій Дарбіна-Уотсона) [11, 12].

Аналіз моделей для прогнозування процесу розвитку нерегламентованих станів та оцінки залишкового ресурсу показав, що ці моделі можуть мати вигляд поліномів першого, другого та третього ступеня. При цьому динаміка кожного нерегламентованого стану описується, як правило, новою моделлю, вигляд якої визначається в процесі контролю нерегламентованого стану. Робота присвячена задачі прогнозування навантаження на вхід СБМД у складних техногенних середовищах. У ній описується полігармонічна модель, що враховує періодичність, тренд і стохастичні коливання у вхідних даних. Прогнозування уточнюється за рахунок моделювання випадкової компоненти на основі авторегресії та застосування критеріїв адекватності.

Формалізація завдання вибору стратегії СБМД дозволила звести його до завдання з теорії ігор, в якій стратегія випадковим чином задає характеристики нерегламентованого стану, а підсистема прийняття рішень вибирає відповідну власну оптимальну стратегію відновлення стану об'єктів.

Модель вибору стратегії представлена з використанням методу платіжної матриці S розміром n^*m [12]. Рядки матриці відповідають стратегіям СБМД, а стовпці – прогнозованим інтенсивностям не регламентованих станів на перспективу ΔT .

Кожен елемент матриці містить оцінку ефекту, що відповідає економічному (або іншому) ефекту ef_{mn} , для конкретної стратегії, представленому у вигляді дробу e_{ij} / z_{ij} , чисельник якого характеризує очікуваний вигравш (наприклад, зекономлений ресурс або зниження ризику), а знаменник i -ої

витрати від застосування стратегії при ліквідації j -го нерегламентованого стану ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$). Тобто:

$$C = [ef_{ij}]_{m \times n}, \quad ef_{ij} = \frac{e_{ij}}{z_{ij}}, \quad (3)$$

де C – платіжна матриця розміром $m \times n$, ef_{ij} – ефект (виграш) від застосування i -ї стратегії при прогнозованому j -му стані; e_{ij} – очікувана якість (виграш); z_{ij} – витрати на застосування i -ї стратегії до j -го стану (прогнозованим інтенсивностям або сценаріям розвитку відмов на інтервалі ΔT), $i = \overline{1, n}$ – індекс стратегії СБМД (рядки матриці); $j = \overline{1, m}$ – індекс прогнозованої інтенсивності нерегламентованого стану (стовпці матриці).

Критерій вибору оптимальної стратегії: вибір стратегії $s \in S$ проводиться з урахуванням умови кожної задачі, наприклад, за максимумом ефективності або мінімумом витрат з урахуванням наступних виразів:

$$s = \arg \max_{s_i \in S} \sum_{j=1}^m ef_{ij} \quad \text{або} \quad s = \arg \min_{s_i \in S} \sum_{j=1}^m z_{ij}.$$

Подібні підходи до моделювання стратегічного вибору в умовах невизначеності активно досліджуються в сучасних роботах з аналізу надійності, прогнозування технічного ресурсу та ігрових моделей прийняття рішень [6, 7]. Даний розділ логічно продовжує аналіз задач прогнозування у контексті оцінки залишкового ресурсу технічних об'єктів у нерегламентованому стані.

Висновки. У результаті проведеного дослідження підтверджено актуальність застосування багаторівневих систем моніторингу та діагностики для аналізу функціонування складних технічних об'єктів у складі систем масового обслуговування. Показано, що зростання складності об'єктів і високі вимоги до надійності їх роботи зумовлюють необхідність використання формалізованих математичних моделей, здатних адекватно описувати динаміку нерегламентованих

станів та процеси їх розвитку у часі.

Встановлено, що динаміка розвитку нерегламентованих станів може бути ефективно апроксимована поліноміальними моделями першого, другого та третього ступеня, вибір яких визначається характером деградаційних процесів і результатами контрольних вимірювань. Такий підхід забезпечує гнучкість моделювання та дозволяє адаптувати модель до конкретного технічного об'єкта або режиму його функціонування. Обґрунтовано доцільність використання полігармонічних моделей для прогнозування інтенсивності вхідного потоку заявок у СБМД з урахуванням циклічності, сезонності та стохастичної природи процесів.

Формалізація задачі вибору стратегії функціонування СБМД у межах теорії ігор дала змогу представити процес прийняття рішень у вигляді платіжної матриці, що відображає співвідношення між очікуваним ефектом і витратами для різних стратегій обслуговування. Такий підхід дозволяє структуровано аналізувати альтернативні сценарії розвитку технічного стану об'єктів та обґрунтовано здійснювати вибір оптимальної стратегії за критеріями максимізації ефективності або мінімізації витрат.

Показано, що використання елементів теорії ігор створює передумови для реалізації адаптивного управління в системах багаторівневого моніторингу та діагностики, особливо в умовах невизначеності та мінливості зовнішніх і внутрішніх факторів. Запропонований підхід може бути інтегрований у цифрові платформи технічного обслуговування та диспетчеризації, орієнтовані на роботу в режимі реального часу. Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості їх застосування в транспортних, енергетичних та промислових інфраструктурах для зменшення втрат, пов'язаних із несвоєчасним обслуговуванням, та підвищення загальної ефективності функціонування складних технічних систем.

Список літератури:

1. Martyniuk H., et al. Information software of multi-level systems of monitoring and diagnostics of complex technical objects. *Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP-2022)*. Ternopil, 22-24 November, 2022. P. 381–386. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3628/short22.pdf>
2. Marchenko N., et al. Principles of construction of an adaptive multilevel system of monitoring and diagnostics of complex technical objects. *Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP-2024)*. Ternopil, 23-25 October, 2024. P. 610–616. URL: <https://repository.mu.edu.ua/jspui/handle/123456789/9298>
3. Гуторова М.С. та ін. Застосування багаторівневих систем для розв'язку задач моніторингу і діагностики вузлів електротехнічного обладнання. *Вимірювання та діагностика в електроенергетиці*. 2023. № 66. с. 150–165. <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.150>
4. Ye F., Xia Z., Dai M., Zhang Z. Real-time fault detection and process control based on multi-channel sensor data fusion. *arXiv preprint arXiv:2005.12585*. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.12585>.

5. Dong B., et al. Remote monitoring and diagnosis for building maintenance units using IoT architecture. *Applied Sciences*. 2025. № 15(9). P. 48-49. <https://doi.org/10.3390/app15094829>.
6. Jin Y., Yang Z., Liu J., Xu X., Anomaly detection and early warning mechanism for intelligent monitoring systems in multi-cloud environments based on LLM. arXiv preprint arXiv:2506.07407. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.07407>.
7. Ebrahimi S., Ranjan C., Paynabar K. Large multistream data analytics for monitoring and diagnostics in manufacturing systems. arXiv preprint arXiv:1812.10430. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.10430>.
8. Самков О.В., Коваль В.В., Лисенко В.П., Чопик В.В., Осінський О.Л., Самков Б.О. Розроблення цифрових засобів багатоканального моніторингу пристроїв синхронізації часу електроенергетичних SMART GRID систем. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2023. № 65. С. 28–32. <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.028>
9. Авдєєва Т.В., Качаєнко О.Б. Ряди Фур'є. Практикум. К.: НТУУ «КПІ». 2016. 88 с.
10. Пістунов І.М. Чисельні методи: Навчальний посібник. [Електронне видання] Національний гірничий університет. Д.: НГУ. 2014. 215 с
11. Гижко Ю.І., Гуророва М.С., Зварич В.М., Кузік Г.А., Мислович М.В., Остапчук Л.Б. Особливості побудови інформаційних каналів багаторівневих інформаційно-вимірювальних систем діагностування вузлів електротехнічного обладнання з урахуванням вимог концепції SMART GRID. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2022. № 62. С. 48–58. <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.048>
12. Malyaret L. M., Lebedeva I. L., Norik L. O. Operations research and optimization methods. Practical guide: in 2 parts. Part 2. Kharkiv: Kharkiv National University of Economics. 2019. 161 p. ISBN 978-966-676-755-7

Marchenko N.B., Kashkevich S.O. ADAPTIVE DATA PROCESSING IN MONITORING AND DIAGNOSTICS SYSTEMS OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

The paper addresses the problem of forecasting the intensity of incoming load in multilevel monitoring and diagnostics systems, as well as the task of assessing the remaining useful life of complex technical objects operating in unregulated modes. The evolution of each such state is described by a separate mathematical model constructed on the basis of control measurements and statistical operational data. The feasibility of applying a polyharmonic approach is substantiated, as it allows cyclic, seasonal, and random components of variations in incoming information flows characteristic of complex technical and technogenic systems to be taken into account.

To improve forecasting accuracy, a combination of harmonic analysis with autoregressive modeling of the stochastic component is proposed, enabling an adequate representation of both deterministic and random factors influencing system operation. The problem of selecting a maintenance strategy is formalized within the framework of game theory using the payoff matrix method, which provides a comparative evaluation of alternative strategies while accounting for costs, risks, and the expected effects of their implementation.

A structured approach to the development of mathematical support for a multilevel monitoring and diagnostics system is proposed, encompassing subsystems for incoming load forecasting, remaining useful life assessment, and optimal response strategy selection. The presented approach enhances the justification of managerial decision-making in the process of technical condition diagnostics and contributes to reducing losses associated with delayed maintenance actions. The obtained results can be applied in the development of real-time dispatching and analytical algorithms for transportation, energy, and industrial infrastructures, taking into account the dynamic variability of operating conditions.

The proposed approach demonstrates high potential for integration into digital maintenance platforms, particularly in industrial environments focused on real-time diagnostics.

Keywords: *automated control systems, adaptive multi-level monitoring and diagnostic systems, performance evaluation, least squares method, control, diagnostic, forecasting and decision-making subsystems.*

Дата першого надходження статті до видання: 17.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026