

## АНОТАЦІЯ

**Шевченко Д. О. Інформаційна технологія технічного діагностування елементів динамічних систем на основі даних моніторингу.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки (Галузь знань 12 Інформаційні технології). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробці багаторівневої інформаційної технології технічного діагностування динамічних систем та їх елементів на основі даних моніторингу. Актуальність дослідження обумовлена тим, що непередбачувані відмови динамічних технічних систем призводять до значних економічних втрат та безпекових ризиків, а існуючі методи діагностування характеризуються фрагментарністю, гомогенністю ансамблевих підходів, відсутністю уніфікованих методів формування часових представлень для різнорідних компонентів та недостатньою спеціалізацією компонентів багаторівневих технологій. Метою роботи є підвищення якості та забезпечення стійкості технічного діагностування елементів динамічних систем в умовах складності операційних режимів шляхом розробки багаторівневої інформаційної технології за рахунок інтеграції комплементарних підходів машинного навчання з ансамблюванням діагностичних рішень.

**Зміст дисертації.** У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, розкрито наукову новизну та практичну цінність роботи.

У розділі 1 проведено аналіз існуючих математичних моделей, методів та технологій технічного діагностування динамічних систем на основі даних моніторингу. Дослідження охопило методи попередньої обробки даних, визначення стану технічних систем (класифікація, виявлення аномалій, кластеризація), зменшення розмірності, прогнозування залишкового ресурсу та багаторівневі інтегровані технології з ансамблевими методами. Виявлені

невирішені проблеми мають системний характер та взаємно підсилюють одна одну, що обґрунтувало задачі дослідження та необхідність розробки нової багаторівневої інформаційної технології.

У **розділі 2** на основі визначених фундаментальних принципів – комплементарності діагностичних підходів, багаторівневої організації, модульності, ансамблювання, поєднання прогнозування та класифікації, використання часових представлень – розроблено інформаційну технологію та побудовано модель її функціонування, що структурує процес діагностування у три рівні. На рівні попередньої обробки та підготовки даних розроблено метод комплексної обробки даних моніторингу та формування диференційованих часових представлень для різнорідних компонентів технології. На рівні діагностування стану об'єкта розроблено п'ять методів, організованих у дві паралельні гілки: метод класифікації стану на основі ансамблювання контрольованих та неконтрольованих методів класичного машинного навчання; метод виявлення аномалій та зменшення розмірності на основі автокодувальників з диференційованим навчанням; метод нечіткої кластеризації стану на основі агентно-орієнтованого підходу з підтримкою декількох режимів функціонування; метод прогнозування залишкового ресурсу на основі рекурентної нейронної мережі; метод класифікації стану на основі гібридної нейронної мережі. На рівні прийняття інтегрованого рішення розроблено метод ансамблювання діагностичних рішень з підтримкою трьох стратегій голосування та автоматизованим систематичним підбором конфігурації. Двоетапний процес налаштування технології забезпечує адаптацію до специфіки конкретного об'єкта діагностування.

У **розділі 3** виконано математичну формалізацію інформаційної технології та всіх її компонентів. Для методу попередньої обробки специфіковано послідовність операцій та два методи формування часових представлень: метод ковзного вікна і метод часових вікон з агрегацією статистик. Для п'яти методів рівня діагностування визначено механізми формування діагностичних рішень та обчислення їх достовірності. Специфіковано метод ансамблювання з трьома стратегіями голосування: бінарне, зважене за достовірністю та гібридне.

Формалізовано інтегроване функціонування технології та двоетапний процес її налаштування з автоматизованим підбором конфігурації ансамблювання.

У **розділі 4** виконано експериментальну перевірку розробленої інформаційної технології на даних моделювання деградації турбовентиляторних двигунів набору C-MAPSS NASA. Використано підмножини FD001 з одним операційним режимом та FD004 з шістьма операційними режимами і двома механізмами деградації. Систематичне дослідження п'яти методів рівня діагностування виявило залежність якості неконтрольованих компонент від складності операційних сценаріїв та високу стійкість методів на основі нейронних мереж. Дослідження методу ансамблювання встановило залежність оптимальної конфігурації від складності даних та підтвердило зростання цінності ансамблювання зі складністю. Технологія діагностування досягла F1-міри 94.12% на FD001 та 92.31% на FD004 зі зниженням лише 1.81%, що підтверджує стійкість до множинних операційних режимів. Порівняльний аналіз з 15 підходами до бінарної класифікації стану підтвердив найвищу F1-міру на складних багаторежимних даних та найменше зниження якості при ускладненні операційних умов. Оцінка обчислювальних ресурсів підтвердила придатність технології для практичного застосування з піковим споживанням пам'яті до 1,4 ГБ та часом опрацювання одного зразка до 41 мс. Порівняння з 27 підходами до прогнозування залишкового ресурсу підтвердило найвищу стійкість із різницею RMSE між підмножинами 1.59 циклів, що у 4.1 рази менше за найближчий конкурент, при конкурентній якості на FD004.

У **висновках** підведено підсумки проведених досліджень. Розроблена багаторівнева інформаційна технологія з інтеграцією комплементарних підходів машинного навчання та ансамблюванням забезпечує високу точність діагностування критичних станів із найвищою стійкістю до множинних операційних режимів та конкурентоспроможну точність прогнозування залишкового ресурсу. Практична значущість результатів полягає у можливості їх використання при створенні систем прогностичного обслуговування турбовентиляторних двигунів, промислових турбін, підшипників, редукторів та

іншого критичного обладнання в авіаційній, енергетичній та обробній промисловості.

**Ключові слова:** технічне діагностування, багаторівнева інформаційна технологія, машинне навчання, глибоке навчання, штучний інтелект, ансамблювання діагностичних рішень, прогнозування залишкового ресурсу, класифікація стану, виявлення аномалій, алгоритм нечіткої кластеризації, автокодувальники, рекурентні нейронні мережі, LSTM, гібридна нейронна мережа, оптимізація моделі.

## ABSTRACT

**Shevchenko D. O. Information technology for technical diagnosis of dynamic system elements based on monitoring data.** – Qualification scholarly paper: a manuscript.

The dissertation submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Information Technology: Speciality 122 Computer science. V. N Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of a multilevel information technology for technical diagnosis of dynamic systems and their elements based on monitoring data. The relevance of the study is determined by the fact that unpredictable failures of dynamic technical systems lead to significant economic losses and safety risks, while existing diagnostic methods are characterized by fragmentation, homogeneity of ensemble approaches, the lack of unified methods for constructing temporal representations for heterogeneous components, and insufficient specialization of components within multilevel technologies. The objective of this work is to enhance the accuracy and ensure the robustness of technical diagnosis of dynamic system elements under complex operational regimes by developing a multilevel information technology through the integration of complementary machine learning approaches with ensemble-based aggregation of diagnostic decisions.

**Content of the dissertation.** The **introduction** substantiates the relevance of the topic, formulates the aim and objectives of the study, defines the object and subject of the research, and elucidates the scientific novelty and practical value of the work.

**Chapter 1** presents an analysis of existing mathematical models, methods, and technologies for technical diagnosis of dynamic systems based on monitoring data. The study encompassed methods of data preprocessing, technical system state determination (classification, anomaly detection, clustering), dimensionality reduction, remaining useful life prediction, and multilevel integrated technologies with ensemble methods. The identified unresolved problems are of a systemic nature and mutually reinforce one another, which substantiated the research objectives and the necessity of developing a novel multilevel information technology.

**Chapter 2** describes the information technology developed on the basis of defined fundamental principles – complementarity of diagnostic approaches, multi-level organization, modularity, ensemble, combination of forecasting and classification, use of time representations, together with a model of its functioning that structures the diagnostic process into three levels. At the data preprocessing and preparation level, a method of comprehensive monitoring data processing and formation of differentiated temporal representations for heterogeneous technology components has been developed. At the object state diagnosis level, five methods have been developed and organized into two parallel branches: a state classification method based on the ensemble of supervised and unsupervised classical machine learning methods; an anomaly detection and dimensionality reduction method based on autoencoders with differentiated training; a fuzzy state clustering method based on an agent-oriented approach supporting multiple operating modes; a remaining useful life prediction method based on a recurrent neural network; and a state classification method based on a hybrid neural network. At the integrated decision-making level, a method of diagnostic decision ensembling has been developed, supporting three voting strategies with automated systematic configuration selection. A two-stage technology tuning process ensures adaptation to the specifics of a particular diagnostic object.

**Chapter 3** presents the mathematical formalization of the information technology and all its components. For the preprocessing method, the sequence of operations and two methods of temporal representation construction have been specified: the sliding window method and the time window method with statistical aggregation. For the five methods at the diagnosis level, the mechanisms for generating diagnostic decisions and computing their confidence have been defined. The ensembling method with three voting strategies has been specified: binary, confidence-weighted, and hybrid. The integrated functioning of the technology and the two-stage tuning process with automated ensemble configuration selection have been formalized.

**Chapter 4** presents the experimental verification of the developed information technology using degradation simulation data of turbofan engines from the NASA C-MAPSS dataset. The FD001 subset with a single operational regime and the FD004 subset with six operational regimes and two degradation mechanisms were utilized. A

systematic investigation of the five diagnosis-level methods revealed a dependence of unsupervised component quality on the complexity of operational scenarios and high robustness of neural network-based methods. The investigation of the ensembling method established a dependence of the optimal configuration on data complexity and confirmed the increasing value of ensembling with growing complexity. The diagnostic technology achieved an F1-score of 94.12% on FD001 and 92.31% on FD004, with a decrease of only 1.81%, confirming robustness to multiple operational regimes. A comparative analysis with 15 approaches to binary state classification confirmed the highest F1-score on complex multi-regime data and the smallest quality decrease under increasingly complex operational conditions. Computational resource evaluation confirmed the technology's suitability for practical deployment, with peak memory consumption not exceeding 1.4 GB and per-sample processing time not exceeding 41 ms. A comparison with 27 approaches to remaining useful life prediction confirmed the highest robustness, with an RMSE difference between subsets of 1.59 cycles, which is 4.1 times less than the nearest competitor, while maintaining competitive performance on FD004.

The **conclusions** summarize the findings of the conducted research. The developed multilevel information technology, integrating complementary machine learning approaches with ensemble-based aggregation, ensures high accuracy in diagnosing critical states with the highest robustness to multiple operational regimes and competitive accuracy in remaining useful life prediction. The practical significance of the results lies in their applicability to the development of predictive maintenance systems for turbofan engines, industrial turbines, bearings, gearboxes, and other critical equipment in the aviation, energy, and manufacturing industries.

**Keywords:** technical diagnosis, multilevel information technology, machine learning, deep learning, artificial intelligence, diagnostic decision ensembling, remaining useful life prediction, state classification, anomaly detection, fuzzy clustering algorithm, autoencoders, recurrent neural networks, LSTM, hybrid neural network, model optimization.