

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**КРАСІЙ ДАНИЛО МАКСИМОВИЧ**

УДК 519.873:004.8:616.13.002.2-004.6

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ  
КОНСТРУКЦІЇ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ**

Спеціальність 113 – Прикладна математика

Галузь знань 11 – Математика та статистика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

  
Красій Д.М.

Науковий керівник:  
Ларін Олексій Олександрович,  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Красій Д. М.* Прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкції методами машинного навчання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 113 – Прикладна математика. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Україна, Харків, 2026.

*Об'єкт дослідження* – процес деградації та прогнозування залишкової надійності механічних (підшипники кочення, несучі конструкції вітрових енергетичних установок, лопатки газових турбін) і біомеханічних (артеріальна стінка з атеросклеротичними бляшками) систем в умовах стохастичного навантаження.

*Предмет дослідження* – методи, моделі та алгоритми діагностики технічного стану за вимірювальними даними і ймовірнісного прогнозування залишкового ресурсу з урахуванням фізичних обмежень.

У дисертаційній роботі розроблено єдину методологічну основу ймовірнісного прогнозування залишкової надійності, яка поєднує методи машинного навчання для діагностики поточного стану за вимірювальними даними з фізично узгодженим моделюванням деградації за стохастичних навантажень у межах парадигми фізично-інформованого машинного навчання. За допомогою розроблених моделей та обробки експериментальних даних досліджено вплив фізичних обмежень на точність прогнозування ресурсу для механічних та біомеханічних систем.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження. Зазначено використані методи, мету і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження. Подано загальну інформацію щодо наукової новизни

отриманих результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача та про апробацію матеріалів дисертації.

У першому розділі надано огляд класичних і сучасних методів оцінки надійності, діагностики технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу складних систем за стохастичного навантаження. Завдяки проведеному аналізу обґрунтовано доцільність об'єднання діагностики та ймовірнісного прогнозування в єдину обчислювальну схему.

У другому розділі сформульовано математичну постановку задачі ймовірнісного прогнозування залишкової надійності та запропоновано загальну схему об'єднання діагностики поточного стану з прогнозуванням еволюції пошкоджень. Запропонована постановка є інваріантною щодо фізичної природи об'єкта.

У третьому розділі викладено підходи до діагностики поточного стану. Розроблено методику експериментального вимірювання вібраційних сигналів підшипників кочення та архітектуру згорткової нейронної мережі зі змінними за глибиною коефіцієнтами дилатації для класифікації технічного стану. Запропоновано алгоритми сегментації сканів оптично-когерентної томографії внутрішньосудинного русла для морфометричного аналізу атеросклеротичних бляшок.

У четвертому розділі викладено результати прогнозування ресурсу механічних систем. Розрахунок напружено-деформованого стану виконано методом скінченних елементів, оцінювання втомної міцності та довговічності здійснено на основі кривих втоми Велера. Виконано прогнозування ресурсу несучої конструкції вертикального вітрового енергетичного агрегату з побудовою стохастичної моделі аеродинамічних навантажень та лопатки газової турбіни на основі теорії марківських процесів. Удосконалено метод регресії гаусівських процесів на основі ланцюгової побудови через введення фізичних

обмежень у структуру ймовірнісної моделі з обґрунтованим вибором ядрових методів для опису коваріаційної структури (метод PG-CGPR).

У п'ятому розділі подано результати застосування розроблених моделей до прогнозування прогресії атеросклеротичних бляшок за даними оптично-когерентної томографії. Виконано порівняльний аналіз точності класичної та удосконаленої регресії гаусівських процесів, який підтвердив істотне зниження похибки екстраполяції та коректну поведінку моделі PG-CGPR за межами діапазону навчальних даних.

*За результатами дослідження отримано такі наукові результати:*

- *Вперше* розроблено єдину методологічну основу ймовірнісного прогнозування залишкової надійності для механічних і біомеханічних систем, що формалізує перехід від результатів діагностики поточного стану до розподілу залишкового ресурсу через інтегральне співвідношення. Останнє поєднує невизначеність оцінки поточного пошкодження та умовний розподіл ресурсу, отриманий розв'язанням рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова.
- *Удосконалено* метод розпізнавання технічного стану підшипників кочення за необробленими вібраційними сигналами шляхом розроблення архітектури згорткової нейронної мережі зі змінними за глибиною коефіцієнтами дилатації. На відміну від відомих архітектур з фіксованою дилатацією, запропонована архітектура узгоджує розмір рецептивного поля кожного шару з характерними часовими масштабами періодичних дефектів підшипників і забезпечує розпізнавання стану без збільшення кількості параметрів мережі та обчислювальної складності.
- *Удосконалено* метод ймовірнісного прогнозування деградації шляхом уведення фізичних обмежень (монотонності накопичення пошкоджуваності, граничної умови нульового пошкодження, обмеженості параметра стану та зростання невизначеності) у структуру ланцюгових

гаусівських процесів. Це забезпечує фізично коректне прогнозування за межами діапазону навчальних даних та адаптивну зміну ширини довірчого інтервалу залежно від поточного рівня пошкодження.

*Практичне значення отриманих результатів* полягає у створенні алгоритмів та програмних засобів діагностики і прогнозування залишкової надійності для систем підтримки прийняття рішень з предиктивного технічного обслуговування механічних систем та клінічного спостереження. Сформований експериментальний набір даних вібраційних сигналів підшипників кочення опубліковано у відкритому доступі.

**Ключові слова:** *залишкова надійність, машинне навчання, фізично-інформоване машинне навчання, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, втомна міцність, довговічність, пошкоджуваність, лопатка газової турбіни, атеросклеротичні бляшки, залишковий ресурс, предиктивне технічне обслуговування, набір даних, регресія гаусівських процесів, ядрові методи.*

## ABSTRACT

*Krasii D. M.* Residual Life Prediction of Structural Elements Using Machine Learning Methods. – Qualifying scientific work on the right of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 113 – Applied Mathematics. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – Ukraine, Kharkiv, 2026.

*The object of research* is the process of degradation and the prediction of residual reliability of mechanical (rolling bearings, load-bearing structures of wind turbines, gas turbine blades) and biomechanical (arterial wall with atherosclerotic plaques) systems under stochastic loading.

*The subject of research* comprises methods, models, and algorithms for technical condition diagnostics from measurement data and probabilistic prediction of residual life subject to physical constraints.

The dissertation develops a unified methodological framework for probabilistic prediction of residual reliability that integrates machine learning methods for current-state diagnostics from measurement data with physically consistent degradation modelling under stochastic loads within the paradigm of physics-informed machine learning. Using the developed models and the processing of experimental data, the influence of physical constraints on the accuracy of residual life prediction is investigated for both mechanical and biomechanical systems.

The introduction substantiates the relevance of the research topic. The methods, the aim, and the objectives of the research are stated in accordance with the subject and object of the study. General information on the scientific novelty of the obtained results is provided. Data on the personal contribution of the author and on the approbation of the dissertation materials are given.

The first chapter provides an overview of classical and contemporary methods for reliability assessment, technical-condition diagnostics, and residual-life prediction

of complex systems under stochastic loading. The conducted analysis substantiates the expediency of integrating diagnostics and probabilistic prediction into a single computational scheme.

The second chapter formulates the mathematical statement of the problem of probabilistic residual-reliability prediction and proposes a general scheme that combines current-state diagnostics with the prediction of damage evolution. The proposed formulation is invariant with respect to the physical nature of the object.

The third chapter presents approaches to current-state diagnostics. A methodology for experimental measurement of vibration signals from rolling bearings and an architecture of a convolutional neural network with depth-varying dilation coefficients are developed for technical-state classification. Algorithms are proposed for the segmentation of intravascular optical coherence tomography scans for the morphometric analysis of atherosclerotic plaques (plaque burden estimation).

The fourth chapter presents the results of the remaining useful life prediction for mechanical systems. The stress-strain state is computed by the finite element method, with subsequent estimation of fatigue strength and durability based on S-N curves. Residual-life prediction is performed for the load-bearing structure of a vertical-axis wind turbine, with the construction of a stochastic model of aerodynamic loads, and for a gas turbine blade based on the theory of Markov processes. The chained Gaussian process regression method is improved through the integration of physical constraints into the structure of the probabilistic model, with a justified choice of kernel methods for the covariance structure (PG-CGPR).

The fifth chapter presents the results of applying the developed models to the prediction of atherosclerotic plaque progression from optical coherence tomography data. A comparative analysis of the accuracy of the classical and the improved Gaussian process regression is performed; it confirms a substantial reduction of the extrapolation error and the physically correct behaviour of the PG-CGPR model beyond the range of the training data.

*The research has yielded the following scientific results:*

1. For the first time, a unified methodological framework has been developed for probabilistic prediction of residual reliability of mechanical and biomechanical systems. The framework formalises the transition from the results of current-state diagnostics to the distribution of residual life through an integral relation that combines the uncertainty of the current-damage estimate with the conditional life distribution obtained by solving the Fokker-Planck-Kolmogorov equation.
2. The method of recognising the technical condition of rolling bearings from raw vibration signals has been improved through the development of a convolutional neural network architecture with depth-varying dilation coefficients. In contrast to known architectures with fixed dilation, the proposed architecture matches the receptive-field size of each layer with the characteristic time scales of periodic bearing defects and ensures state recognition without increasing the number of network parameters or the computational complexity.
3. The method of probabilistic degradation prediction has been improved through the introduction of physical constraints (monotonicity of damageability accumulation, the boundary condition of zero initial damage, boundedness of the state parameter, and growth of uncertainty) into the structure of chained Gaussian processes. This ensures physically correct prediction beyond the range of the training data and an adaptive variation of the confidence interval width depending on the current damage level.

The practical significance of the obtained results consists in the creation of algorithms and software tools for diagnostics and prediction of residual reliability that are suitable for decision-support systems in predictive maintenance of mechanical systems and in clinical monitoring. The compiled experimental dataset of rolling-bearing vibration signals has been published in open access.

**Keywords:** *residual reliability, machine learning, physics-informed machine learning, finite element method, stress-strain state, fatigue strength, durability, damageability, gas turbine blade, atherosclerotic plaques, remaining useful life, predictive maintenance, dataset, Gaussian process regression, kernel methods.*

*Список публікацій здобувача*

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:*

1. Бабуджан Р., Ісаєнков К., Красій Д., Водка О., Задорожний І., Ющук М. Використання методів машинного навчання для бінарної класифікації робочого стану підшипників за сигналами їх віброприскорення. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2021. № 2 (6). С. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2021.02.03>. (Б).
2. Бабуджан Р. А., Ісаєнков К. О., Водка О. О., Красій Д. М., Задорожний І., Ющук М. Класифікація робочого стану підшипників кочення за допомогою згорткової нейронної мережі зі змінними факторами дилатації. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. 2021. № 2. С. 104–109. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2021.2.249274>. (Б).
3. Красій Д. М., Ларін О. О. Фізично-керована регресія на основі гаусівських процесів для моделювання накопичення втомного пошкодження. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. 2025. № 2. С. 64–72. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2025.2.345722>. (Б).
4. Krasii D. M., Larin O. O. Physics-guided chained Gaussian process regression for atherosclerotic plaque progression prediction. Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series of Mathematics and Informatics. 2026. Vol 48, № 1. P. 153–161. DOI: [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2026.48\(1\).153-161](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2026.48(1).153-161). (Б).

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

5. Krasii D., Larin O. Computational modelling of wind turbine lifetime. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv, 13–17 September 2021. IEEE, 2021. P. 374–379. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570028>. (Scopus, Q4).

6. Krasii D., Larin O. Application of Markov Processes Theory for Computational Prediction of Turbine Blade Reliability. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering — 2022*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. P. 335–345. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9_29). (Scopus, Q4).

7. Krasii D., Larin O. ML-surrogate modeling for the estimation of random system performance parameter progress by the Chained Gaussian Process Regression method. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, 2–6 October 2023. IEEE, 2023. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312806>. (Scopus, Q4).

8. Krasii D., Larin O., Gorovyi I. Analysis of Optical Coherence Tomography Images of Human Arteriosclerotic Vessels Using Computer Vision and Deep Learning Algorithms. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering — 2024 / O. Lytvynov, V. Pavlikov, D. Krytskyi (eds.)*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2025. P. 107–117. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-94845-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-94845-9_9). (Scopus, Q4).

9. Babudzhan R., Isaienkov K., Krasii D., Vodka O., Zadorozhny I., Yushchuk M. Collection and processing of bearing vibration data for their technical condition classification by machine learning methods. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Modeling, Control and Information Technologies*. 2021. No. 5. P. 10–15. DOI: <https://doi.org/10.31713/MCIT.2021.02>.