

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

ЯНЕНКО АРТЕМ ВАЛЕРІЙОВИЧ


УДК 629.1

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ
ДІАГНОСТИКИ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ДЕТАЛЕЙ

Спеціальність 275 «Транспортні технології (за видами)»
Галузь знань Технічні науки (27- транспорт)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



А.В. Яненко

Науковий керівник: Шарко Олександр Володимирович, д.т.н., професор

Херсон – 2025

АНОТАЦІЯ

Яненко А.В. Підвищення ефективності експлуатації суднових транспортних засобів з використанням методу діагностики і прогнозування стану деталей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 - транспортні технології. Дисертацію виконано у Херсонській державній морській академії, Херсон. Подано на захист у Херсонську державну морську академію, Херсон, 2025

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі, яка полягає у підвищенні ефективності експлуатації судових транспортних засобів шляхом впровадження методу діагностики і прогнозування стану деталей, який дозволяє збільшити обсяг діагностичної інформації без додаткового втручання в їх конструкцію. Створені нові методи діагностування технічного стану та моніторингу суднових транспортних засобів без додаткового втручання в їх конструкцію дозволили збільшити обсяг діагностичної інформації та підвищити ефективність експлуатації обладнання.

Актуальність дослідження обумовлена тим, що інтенсивність використання обладнання транспортних засобів, порушення правил експлуатації, циклічні знакозмінні навантаження призводять до невизначеності характеру навантажень. Виходячи з цього, важливим питанням експлуатації та обслуговування транспортних засобів є створення моделей, методів та засобів діагностики на основі нових інформаційних параметрів, ідентифікації та прогнозування стану об'єктів діагностування.

Своєчасне виявлення несправностей дозволяє коригувати програми технічного обслуговування та ремонту.

Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації суднових транспортних засобів шляхом впровадження методу діагностики і

прогнозування стану деталей, який дозволяє збільшити обсяг діагностичної інформації без додаткового втручання в їх конструкцію.

Завдання, які заплановано вирішити для досягнення мети роботи:

1. Визначити на теоретично-практичному рівні нові параметри діагностики, які необхідно врахувати для підвищення якості оцінки та прогнозування стану технічного обладнання у реальному масштабі часу.

2. Розробити модель ймовірнісної динаміки процесів діагностики відмов елементів суднових транспортних засобів при їх експлуатації.

3. Створити систему інтелектуального забезпечення діагностики технічної експлуатації та обслуговування транспортних засобів.

4. Розробити метод багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик прогнозування деталей СЕУ при їх експлуатації.

5. Розробити експоненціальну модель та технологію прогнозування залишкового ресурсу деталей СЕУ в умовах складного навантаження в реальному часі.

Об'єкт дослідження: процеси технічної діагностики елементів пристроїв суднових транспортних засобів. *Предмет дослідження:* підвищення ефективності експлуатації судових транспортних засобів шляхом впровадження діагностики і прогнозування стану деталей.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше запропоновано нові діагностичні параметри стану суднових підшипників кочення, які містять першу головну компоненту характеристик вібраційного сигналу в часовій області та спектральний ексцес в частотній області, та для суднових підшипників ковзання, який враховує пік-фактор, що дозволяє підвищити якість прогнозування залишкового ресурсу устаткування.

2. Розроблено модель ймовірнісної динаміки процесів діагностики відмов елементів суднових транспортних засобів при їх експлуатації на основі ланцюгів Маркова, яка включає формування апіорної інформації про експериментальні впливи зовнішнього середовища, встановлення простору

станів, вивчення причин і ймовірностей відмов, що відрізняється від існуючих заміною дискретних часових інтервалів процесу діагностування послідовністю станів технічних об'єктів і дозволяє досліджувати динаміку накопичення пошкоджень у часі.

3. Створено систему інтелектуального забезпечення діагностики технічної експлуатації та обслуговування транспортних засобів, яка ґрунтується на комплексному використанні експериментальної і статистичної складових інтервалів діагностики, причин відмов, ключових особливостей об'єктів діагностування та наявністю інтелектуальної складової з визначеними алгоритмами й програмними продуктами, що відрізняється від існуючих мінімізацією суб'єктивізму прийняття рішень.

4. Розроблено метод багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик прогнозування деталей СЕУ при їх експлуатації, який відрізняється від існуючих наявністю обчислювального алгоритму визначення характеристик вібраційних сигналів з урахуванням їх структури і різноманіття частотних характеристик й забезпечує аналіз збігів значень статистичних критеріїв експериментальної інформації та їх згорток, що дозволяє підвищити точність прогнозування залишкового ресурсу деталей.

5. Запропоновано експоненціальну модель деградації для прогнозування стану судових підшипників ковзання, яка відрізняється від існуючих математичною обробкою характеристик вібраційних сигналів, де вхідну інформацію використовують для навчання моделі, об'єднання статистичних ознак і подальших аналізів, а процес моделювання деградації та прогнозування терміну роботи ґрунтується на аналізі порігового рівня відстежуваного сигналу.

У вступі описано основну проблему діагностики стосовно невизначеності її фіксації і тривалості екстремальних навантажень та виключення залежності результатів діагностики від людського фактору внаслідок заміни операцій збору та обробки інформації про стан вузлів й механізмів операціями штучного інтелекту.

Розділ I. Наведено характеристики інформаційних матеріалів з технічної діагностики транспортного обладнання. Наведено структурування отримання діагностичної інформації, пов'язану зі способами визначення та прогнозування залишкового ресурсу, виділено сутність, методологію, переваги та недоліки. Визначені основні напрямки удосконалення діагностики технічного стану суднового устаткування.

Розділ II. Наведено теоретичні основи та обґрунтовано необхідність інформаційної підтримки моніторингу в умовах невизначеності характеру навантажень. Наведені методики імітаційного моделювання, за якими проводили дослідження з позицій динаміки часового ряду, галузі знань, способів реалізації та раціонального застосування для транспортного моніторингу. Здійснено синтез математичних моделей безперервних процесів і виконано їх класифікацію для конкретних видів ТД, що дозволяє встановлювати межі застосування статистичних, динамічних, детермінованих та стохастичних моделей з дискретним та безперервним часом.

Обґрунтовано, що відмінною особливістю заходів щодо підвищення ефективності діагностики елементів СЕУ у процесі експлуатації є взаємозв'язок інформаційних та комунікаційних компонент з використанням цифрових трендів діагностичних параметрів та складання цифрових даних. Показано, що використання цифрових трендів є основою запобіжних заходів. Різноманітність та різні розмірності діагностичних сигналів призводять до необхідності злиття їх характеристик у єдиний узагальнюючий показник без втрати вхідної інформації, що у роботі досягнуто за допомогою використання методу головних компонент. Розвинена методологія управління діагностичною інформацією.

Запропонована та обґрунтована модель ймовірнісної динаміки процесу діагностики відмов суднових транспортних засобів на основі ланцюгів Маркова. Відмінністю моделі є заміна дискретних часових інтервалів процесу діагностування послідовністю станів технічних об'єктів. Наведено експериментальні дослідження щодо використання ймовірнісних і

статистичних характеристик вібраційних сигналів при діагностиці та прогнозуванні стану суднових підшипників кочення. Наведено результати обчислень і оцифровування експериментальних даних, розрахунки перехідних матриць та побудови орґрафа, що дозволяє дослідити кінетику ймовірнісної динаміки в реальному часі. Виконано оцінку ефективності діагностики в термінах умовних ймовірностей.

Розділ III. Наведено результати експериментальних досліджень ймовірнісних та статистичних відмов деталей суднових транспортних засобів. Розкрито причини відмов елементів СЕУ внаслідок деградації параметрів і характеристик матеріалів, яка спричинена порушенням процесів експлуатації та прихованими дефектами матеріалу. Наведено результати технічної діагностики та статистичного розподілу відмов підсистем двигунів внутрішнього згорання та турбонагнітачів.

На основі генезису ушкоджень визначені причини відмов підшипників кочення, розглянуто та класифіковано види пошкоджень, їх прояву та методи виявлення. Зроблено висновок, що за характером пошкоджень можна визначити причину їх появи. З позицій діагностики підшипників кочення розвинуті основні положення теорії вібродіагностики: енергетичні спектри, рівняння суцільного середовища, зв'язки між трансляційними та ротаційними властивостями з осциляторними характеристиками вібраційних сигналів. Виділено окремо молекулярні взаємодії та кінематичні застосування до моніторингу підшипників кочення. Визначено діагностичні параметри спектральної вібродіагностики. Показано, що моделювання діагностики технічної експлуатації та обслуговування суднових транспортних засобів має виконуватися шляхом створення інтерактивних моделей, які передбачають діалог із користувачем.

Наведено результати статистичної обробки оцифровування спектру вібраційних сигналів, що отримані при експлуатації підшипників кочення. Запропоновано новий діагностичний параметр, заснований на аналізі змін першої головної компоненти вібраційного сигналу та спектрального ексцесу

вібросигналу. Обґрунтовано використання нових діагностичних параметрів для прогнозування залишкового ресурсу підшипників кочення транспортних засобів. Виконана їх практична реалізація.

Розділ IV. Наведено результати практичного використання результатів досліджень. Розроблено метод багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик суднового обладнання. В якості параметрів оптимізації використано особливості траєкторії діагностичних сигналів: монотонність, швидкість змін, чутливість до визначення залишкового ресурсу, відхилення від адитивності, енергія, що витрачається на розвиток дефекту. Складена матриця ефективності діагностики.

Розроблено модель прогнозування зміни технічного стану та залишкового ресурсу за параметрами генерованої вібрації на основі апріорної інформації про умови експлуатації та динаміки зміни характеристик вібросигналів за допомогою математичної обробки параметрів вібраційних сигналів. Показано, що підвищення ефективності вібромоніторингу полягає у можливості інтеграції технологій штучного інтелекту з операціями машинного навчання. Навчання проводять за допомогою набору даних експериментальної вибірки. Підкреслено, що впровадження експоненціальної моделі прогнозування деградації матеріалу деталей СЕУ у процесі їх експлуатації надає можливість не тільки визначити початкову стадію зміни структури матеріалу, а також додатково проаналізувати ступінь працездатності матеріалів та залишкового ресурсу.

Ключові слова: ефективність, транспорт, транспортні засоби, експлуатація, діагностика, прогнозування, невизначеність, суднової головної двигун, турбонагнітач, моделювання, залишковий ресурс, надійність роботи.

ABSTRACT

Yanenko A.V. – Increasing the efficiency of the operation of court vehicles using the method of diagnostics and forecasting the condition of parts. – Qualifying scientific work on manuscript rights

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 275 – transport technologies. The dissertation was completed at the Kherson State Maritime Academy, Kherson. Submitted for defense at the Kherson State Maritime Academy, Kherson, 2025

The dissertation work is devoted to solving the scientific and technical problem, which consists in increasing the efficiency of the operation of ship vehicles using the method of diagnostics and forecasting the condition of parts. The solution of the scientific and technical problem consists in establishing the patterns of the relationship between the processes of degradation of the operational properties of ship vehicles with diagnostic parameters, which allows to increase the period of operation between overhauls and increase the reliability of the equipment.

The relevance of the study is due to the fact that the intensity of use of vehicle equipment, violation of operating rules, cyclic alternating loads lead to uncertainty in the nature of the loads. Based on this, an important issue of the operation and maintenance of vehicles is the creation of models, methods and diagnostic tools based on new information parameters, identification and forecasting of the volumes of diagnostics.

Earlier detection of malfunctions allows you to adjust maintenance and repair programs.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the operation of ship vehicles by implementing the method of diagnostics and forecasting the condition of parts, which allows to increase the volume of diagnostic information without additional intervention in their design.

The tasks planned to be solved to achieve the goal of the work:

1. To determine at the theoretical and practical level new diagnostic parameters that must be taken into account to improve the quality of assessment and forecasting of the condition of technical equipment in real time.

2. To develop a model of probabilistic dynamics of the processes of diagnosing failures of ship elements during their operation.

3. To create a system of intelligent support for diagnostics of technical operation and maintenance of vehicles.

4. To develop a method of multi-criteria optimization of diagnostic characteristics of forecasting SPP parts during their operation.

5. To develop an exponential model and technology for forecasting the residual resource of SPP parts under complex load conditions in real time.

The object of the study is the processes of improving operations, TD of ship elements. The subject of the study is diagnostics and forecasting the condition of parts during the operation of ship vehicles.

Scientific novelty of the obtained results

1. For the first time, new diagnostic parameters of the state of ship rolling bearings have been proposed, which contain the first principal component of the characteristics of the vibration signal in the time domain and the spectral excess in the frequency domain, and for ship sliding bearings, which takes into account the peak factor, which allows to improve the quality of forecasting the residual resource of the equipment.

2. A model of probabilistic dynamics of the processes of diagnosing failures of ship vehicle elements during their operation has been developed based on Markov chains, which includes the formation of a priori information about the experimental effects of the external environment, establishing the state space, studying the causes and probabilities of failures, which differs from the existing ones by replacing discrete time intervals of the diagnostic process with a sequence of states of technical objects and allows to study the dynamics of damage accumulation over time.

3. A system of intelligent support for diagnostics of technical operation and maintenance of vehicles has been created, which is based on the complex use of experimental and statistical components of diagnostic intervals, causes of failures, key features of diagnostic objects and the presence of an intellectual component with defined algorithms and software products, which differs from existing ones by minimizing the subjectivity of decision-making.

4. A method of multi-criteria optimization of diagnostic characteristics of forecasting of SPP parts during their operation has been developed, which differs from existing ones by the presence of a computational algorithm for determining the characteristics of vibration signals, taking into account their structure and variety of frequency characteristics, and provides analysis of coincidences of values of statistical criteria of experimental information and their convolutions, which allows to increase the accuracy of forecasting the residual resource of parts.

5. An exponential degradation model is proposed for predicting the condition of ship sliding bearings, which differs from existing ones by mathematical processing of vibration signal characteristics, where input information is used to train the model, combine statistical features and further analyzes, and the process of modeling degradation and predicting the service life is based on the analysis of the threshold level of the monitored signal.

The introduction presents the main problem of diagnostics, regarding the uncertainty in the fixation and duration of extreme loads and the exclusion of the dependence of diagnostic results on the human factor and with the replacement of operations for collecting and processing information about the condition of nodes and mechanisms with operations of artificial intelligence.

Section I. The characteristics of information materials on technical diagnostics of transport equipment are given. The structuring of diagnostic information acquisition is presented, related to the methods of determining and predicting the residual resource, the essence, methodology, advantages and disadvantages are highlighted. The main directions of improving the diagnostics of the technical condition of ship equipment are determined.

Section II. The theoretical basis is given and the need for information support for monitoring in conditions of uncertainty in the nature of loads is substantiated. Simulation modeling techniques are presented, according to which research was carried out from the standpoint of time series dynamics, field of knowledge, methods of implementation and rational application for transport monitoring. A synthesis of mathematical models of continuous processes is carried out and their classification is performed for specific types of TD, which allows setting the limits of application of statistical, dynamic, deterministic and stochastic models with discrete and continuous time.

It is substantiated that a distinctive feature of measures to improve the efficiency of diagnostics of SPP elements during operation is the interconnection of information and communication components using digital trends of diagnostic parameters and compilation of digital data. It is shown that the use of digital trends is the basis of preventive measures. The diversity and different dimensions of diagnostic signals lead to the need to merge their characteristics into a single generalizing indicator without loss of input information, which is achieved in the work using the principal components method. A methodology for managing diagnostic information has been developed.

A model of probabilistic dynamics of the process of diagnosing failures of ship vehicles based on Markov chains has been proposed and substantiated. The difference of the model is the replacement of discrete time intervals of the diagnostic process with a sequence of states of technical objects. Experimental studies on the use of probabilistic and statistical characteristics of vibration signals in diagnostics and condition prediction of ship rolling bearings are presented. The results of calculations of digitalization of experimental data, calculations of transition matrices and construction of a digraph are presented, which allows studying the kinetics of probabilistic dynamics in real time. The effectiveness of diagnostics in terms of conditional probabilities has been assessed.

Section III. The results of experimental studies of probabilistic and statistical failures of ship vehicles are presented. The causes of failures of SPP

elements are revealed, the main of which is the degradation of parameters and characteristics of materials, which is caused by violations of operation processes and hidden defects of the material. The results of technical diagnostics and statistical distribution of failures of subsystems of internal combustion engines and turbochargers are presented.

Based on the genesis of damage, the causes of failures of rolling bearings are determined, the types of damage of their manifestation and methods of detection are considered and classified. It is concluded that the cause of their appearance can be determined by the nature of the damage. From the standpoint of rolling bearing diagnostics, the main provisions of the theory of vibrodiagnostics are developed: energy spectra, equations of a continuous medium, connections between translational and rotational properties with oscillatory characteristics of vibration signals. Molecular interactions and kinematic applications to monitoring rolling bearings are highlighted separately. Diagnostic parameters of spectral vibrodiagnostics are determined. It is shown that the modeling of diagnostics of technical operation and maintenance of ship vehicles should be carried out by creating interactive models that provide for a dialogue with the user.

The results of statistical processing of the digitization of the spectrum of vibration signals obtained during the operation of rolling bearings are presented. A new diagnostic parameter is proposed, based on the analysis of changes in the first principal component of the vibration signal and the spectral excess of the vibration signal. The use of new diagnostic parameters for predicting the residual resource of rolling bearings of vehicles is justified. Their practical implementation is carried out.

Section IV. The results of the practical use of the research results are presented. A method for multi-criteria optimization of the diagnostic characteristics of ship equipment is developed. The features of the trajectory of diagnostic signals are used as optimization parameters: monotonicity, rate of change, sensitivity to determining the final resource, deviation from additivity, energy spent on defect development. A diagnostic efficiency matrix is compiled.

A predictive model of changes in the technical condition and prediction of the residual resource by the parameters of the generated vibration is developed based on a priori information about operating conditions and recent changes in the characteristics of vibration signals using mathematical processing of the characteristics of vibration signals. It is shown that increasing the efficiency of vibration monitoring lies in the possibility of integrating artificial intelligence technologies with machine learning operations. Training is carried out using a data set of the experimental sample. It is emphasized that the implementation of a predictive exponential model of material degradation of SPP parts during their operation makes it possible not only to determine the initial stage of material structure changes, but also to determine the degree of material performance and residual resource.

Keywords: efficiency, transport, vehicles, operation, diagnostics, forecasting, uncertainty, marine lead engine, turbocharger, modeling, remaining life, operational reliability.

ОПУБЛІКОВАНІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Публікації у фахових виданнях категорії «Б»:

1. Sharko, O., Yanenko, A.: Modeling intelligent software for the diagnostic and monitoring of ship power plant components using Markov chain. *Наукоємні технології*. 3(59), 251-261 (2023). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946> <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/SBT/issue/view/938> База даних – Google Scholar (Внесок автора: розроблено методичне забезпечення ланцюгів Маркова до діагностики зі заміною часових інтервалів послідовності станів системи).

2. Sharko O., Yanenko, A.: Synthesis of mathematical models for monitoring the technical condition of vehicles during their operation. *Наукоємні технології*. 1(61), 44-50 (2024). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.61.18514>, <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/18514> База даних – Google Scholar (Внесок автора: конкретизація математичних моделей інтелектуального забезпечення до різних видів моніторингу транспортних засобів).

3. Sharko, O., Yanenko, A.: Structuring the main directions of research to value the excess resource of transport structures and materials. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорту*. 1(22), 47-54 (2024). DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1344> <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1344> База даних – Google Scholar (Внесок автора: аналіз сучасного стану розробок щодо визначення залишкового ресурсу).

4. Yanenko, A.: Intelligent system for monitoring the operational properties of ship power equipment. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 48, 205-219 (2024). DOI: https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/310713/302141

5. Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A., Yanenko, A.: Computer diagnostics of the condition of ship rolling bearings during their operation

Наукоємні технології. 48, 409-418 (2024). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.18952> , <https://jrnlnau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/18952> (Внесок автора: статистична обробка результатів обчислення параметрів вібраційних сигналів підшипників кочення при їх експлуатації)

6. Шарко, О., Степанчиков, Д., Шарко, А., Яненко, А., Мовчан, П.: Застосування багатокритеріального аналізу при дослідженні термодинамічних процесів у судноремонті та транспортній інфраструктурі. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 1(28), 117-133 (2024). DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.117-132>, <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/issue/view/34> (Внесок автора: вибір та обґрунтування критеріїв оптимізації фізико-механічних властивостей матеріалів для ремонту та експлуатації транспортних споруд)

Публікації, що проіндексовані у базі даних SCOPUS:

1. Sharko, A., Sharko, O., Stepanchikov, D., Yanenko, A.: Monitoring State of Marine Plain Bearings Based on Exponential Degradation Model. Proceedings of the 8th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems. Volume I: Machine Learning Workshop, Lviv, Ukraine, April 12-13, 48-58 (2024). <https://ceur-ws.org/Vol-3664/paper5.pdf> Database - Scopus (Внесок автора: побудова моделі прогнозування залишкового ресурсу транспортних засобів у процесі їх експлуатації).

1. Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A., Yanenko, A.: Multicriteria Approach to the Selection of Optimal Diagnostic Characteristics of Ship Bearings Monitoring. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 219, 242–257 (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-70959-3_12 Database - Scopus (Внесок автора: виконання експериментальних робіт, обробка результатів).

Тези доповідей:

1. Шарко, О.В., Яненко, А. В.: Діагностика та вимірковальний контроль елементів суднового енергетичного обладнання в умовах невизначеності

характеру навантажень. Матеріали III Міжн. наук-практ. конф. «Дніпровські читання-2022». Київ: вид-во КІВТ ДУІТ, 8 грудня 2022 р., 129-130, https://files.duit.edu.ua/uploads/%D0%A1%D0%B0%D0%B9%D1%82/3_%D0%9D%D0%90%D0%A3%D0%9A%D0%90/conferences/international-scientific-and-practical-conferences/third-dnipro-reading-materials.pdf, (2022). (Внесок автора: опис проблеми діагностики елементів суднового енергетичного обладнання та напрямів її реалізації).

2. Шарко, О.В., Яненко, А.В.: Сучасні технології діагностування і визначення залишкового ресурсу елементів СЕУ в процесі експлуатації. Матеріали 14-й Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», м. Херсон, 2023 р., 75-77, <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2023.pdf>, (2023). (Внесок автора: аналіз сучасних технологій діагностики суднового обладнання)

3. Шарко, О.В., Клевцов, К.М., Степанчиков, Д.М., Яненко, А.В.: Організація моніторингу прогнозування технічного стану вузлів турбокомпресорів із використанням ланцюгів Маркова. Матеріали 14-й Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», м. Херсон, 2023 р., 148-150, <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2023.pdf>, (2023). (Внесок автора: побудова ймовірнісних моделей Марковських процесів).

4. Sharko, O.V., Yanenko, A.V.: Modeling of Intelligent Security Diagnostics and Monitoring of Elements in Ship Installations by Lantsyugiv

Markov. Materials of the XI international scientific-practical conference «Information Control Systems and Technologies» (ICST- ODESSA – 2023) 21th – 23th September 2023, Odessa, Ukraine, 216-220, <https://icst-conf.com/2023.pdf>, (2023). (Внесок автора: розробка інтелектуальних систем діагностики елементів суднових транспортних засобів).

5. Шарко, О.В., Яненко, А.В., Мовчан, П.В.: Система технічної діагностики визначення поточного стану транспортних пристроїв. Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (СЕУТТО-2024), 13-15 березня 2024 року, Херсон, Україна, 39-41 <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2024/03/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2024.pdf>, (2024). (Внесок автора: класифікація інструментальних методів та засобів спостереження за станом обладнання в процесі його експлуатації).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	28
1.1. Аналітичний огляд сучасних інформаційних матеріалів стану технічної діагностики експлуатації транспортних засобів.....	28
1.2. Структуризація основних напрямів досліджень щодо діагностики і визначення залишкового ресурсу транспортних конструкцій та споруд..	32
1.2.1. Діагностика залишкового ресурсу за результатами чисельних методів механіки руйнувань.....	34
1.2.2. Діагностика залишкового ресурсу за результатами неруйнівного контролю та дефектоскопії.....	37
1.2.3. Методи оцінки залишкового ресурсу, які використовують нормативні документи та стандарти.....	39
1.2.4. Діагностика та прогнозування залишкового ресурсу за результатами моделювання та інформаційного супроводу	41
1.3. Система технічної діагностики поточного стану транспортних пристроїв.....	44
Висновки до I розділу.....	48
РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	50
2.1. Синтез математичних моделей діагностики технічного стану транспортних засобів під час їх експлуатації.....	50
2.2. Цифровізація діагностики судових транспортних засобів.....	56
2.3. Методологія управління діагностичної інформацією.....	59
2.4. Модель ймовірнісної динаміки процесів діагностики елементів СЕУ на основі ланцюгів Маркова.....	62

Висновки до II розділу.....	75
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЙМОВІРНІСНИХ ТА СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІАГНОСТИКИ ВІДМОВ СУДНОВИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	77
3.1. Інтелектуальна система діагностики експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання... ..	77
3.2. Аналіз причинно-наслідкових зв'язків виникнення пошкоджень при експлуатації підшипників кочення.....	89
3.3. Нові інформаційно-діагностичні параметри вібродіагностики підшипників кочення.....	93
3.4. Експериментальне обладнання та технологія вібродіагностики суднових підшипників.....	98
3.5. Комп'ютерна діагностика стану суднових підшипників кочення при їх експлуатації.....	104
Висновки до III розділу.....	111
РОЗДІЛ 4. ДІАГНОСТИКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НАКОПИЧЕННІ ПОШКОДЖЕНЬ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВОГО ОБЛАДНАННЯ.....	114
4.1. Розробка інформаційно-діагностичних параметрів вібродіагностики підшипників ковзання	114
4.2. Метод багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик моніторингу суднових підшипників ковзання.....	120
4.3. Експоненційна модель прогнозу стану суднових підшипників ковзання.....	134
Висновки до IV розділу.....	151
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	157
ДОДАТКИ	174

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

СЕУ	суднові енергетичні установки
ТД	технічна діагностика
НК	неруйнівний контроль
ПЗР	прогнозування залишкового ресурсу
ІСД	інтелектуальна система діагностики
ЗР	залишковий ресурс
СТЗ	суднові транспортні засоби
ДВЗ	двигуни внутрішнього згорання

ВСТУП

Підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів пов'язане не лише з оцінкою якості транспортних перевезень, що полягає у своєчасності доставки вантажів, безперебійності та ритмічності процесів транспортування, але й з безпекою експлуатації транспортних засобів і безаварійності процесів експлуатації. Це забезпечується одночасним використанням організаційної управлінської складової ефективності та технічною підтримкою надійності й безвідмовності конструкцій, що експлуатуються.

Забезпечення підвищення ефективності транспортних перевезень з боку управлінської складової досягається шляхом удосконалення системи регулювання процесами своєчасності доставки та збереження вантажів з урахуванням специфічних умов перевезень. Забезпечення підвищення ефективності транспортних засобів за рахунок технологічної складової досягається шляхом розробки нових більш досконалих методів діагностики та прогнозування стану деталей у процесі експлуатації.

Актуальність роботи. Стратегія розвитку технічної діагностики вимагає виключення залежності людського фактору та суб'єктивного сприйняття дійсності шляхом їх заміни на операції інформаційних технологій та штучного інтелекту при накопиченні та обробці інформації про стан вузлів й механізмів. Виникає необхідність вдосконалення обладнання, оптимізації процесів та технологій, забезпечення своєчасності діагностики і достовірності прогнозування стану обладнання. Чим більша кількість технічних параметрів доступна для аналізу, тим більш висока точність діагностики та можливості моніторингу й прогнозування ЗР. В умовах роботи з величезними потоками даних дуже велика ймовірність помилок у комплексних висновках про результати діагностування. Тому поряд із статистичними методами обробки діагностичної інформації слід віддавати пріоритет і ймовірнісним методам, ланцюгам Маркова тощо.

Теоретичною базою для розвитку завдань технічної експлуатації та обслуговування транспортних засобів стали роботи вітчизняних і зарубіжних вчених О. Акімова, А. Букетова, А. Гнатова, Р. Варбанця, С. Зжанга, Ю. Лебеденка, З. Назарука, В. Передерія, О. Сапронова, О. Шарко, Д. Хуанга, Х. Янга. Проблеми моделювання управління процесами діагностики в умовах невизначеності і ризику відображені в роботах М. Желтова, А. Золотова, В. Литвиненка, А. Недосеки, Г. Рудакової В. Скальського, В. Шостака.

Зазначеними вище науковцями доведено, що вирішення питань діагностики та прогнозування експлуатаційних властивостей суднового обладнання набуває особливої актуальності через те, що стан флоту визначається фізичним та моральним зносом.

Вивчення динаміки морських транспортних перевезень у сучасних умовах прояву невизначеності впливу довкілля, апіорної та апостеріорної інформації виявляє різні темпи розвитку морського флоту. Розвиток транспортних процесів у світі відбувається нерівномірно та стрибкоподібно. За даними United Nation Organization Overview у 2021 році відзначалося деяке пожвавлення морських транспортних перевезень. Однак, у 2022 році умови перевезень ускладнилися у зв'язку із невизначеністю зовнішніх впливів. У зв'язку з цим спостерігається старіння морського флоту. Найбільш молодими є балкери із середнім віком 11,1 років, далі йдуть контейнеровози із середнім віком 13,1 років, потім – нафтові танкери із середнім віком 19,7 років. Пояснюється це тим, що досить важко визначити та спрогнозувати шляхи, якими може відбуватись технологічний розвиток, які види палива будуть найбільш ефективними, як зміняться нормативи на вуглецеві викиди. Тому спостерігається тенденція до експлуатації старих суден. Враховуючи це, діагностика технічного стану елементів суднового транспортного устаткування і визначення залишкового ресурсу є проблемою сучасного морського флоту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.
Основні наукові результати дисертаційного дослідження отримані в процесі

виконання держбюджетної науково-дослідної теми: «Розробка зносостійких модифікованих епоксипластів для ремонту і підвищення надійності морського транспорту та техніки військового призначення» (номер державної реєстрації 0123U102016, 2023-2025 рр.). Автор дисертації брав безпосередню участь у виконанні теми як виконавець.

Мета і завдання дослідження. *Мета роботи* – підвищити ефективність експлуатації суднових транспортних засобів шляхом впровадження методу діагностики і прогнозування стану деталей, який дозволяє збільшити обсяг діагностичної інформації без додаткового втручання в їх конструкцію.

Завдання, які заплановано вирішити для досягнення мети роботи:

1. Визначити на теоретично-практичному рівні нові параметри діагностики, які необхідно врахувати для підвищення якості оцінки та прогнозування стану технічного обладнання у реальному масштабі часу.

2. Розробити модель ймовірнісної динаміки процесів діагностики відмов елементів суднових транспортних засобів при їх експлуатації.

3. Створити систему інтелектуального забезпечення діагностики технічної експлуатації та обслуговування транспортних засобів.

4. Розробити метод багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик прогнозування деталей СЕУ при їх експлуатації.

5. Розробити експоненціальну модель та технологію прогнозування залишкового ресурсу деталей СЕУ в умовах складного навантаження в реальному часі.

Об'єкт дослідження: процеси технічної діагностики елементів пристроїв суднових транспортних засобів.

Предмет дослідження: підвищення ефективності експлуатації суднових транспортних засобів шляхом впровадження діагностики і прогнозування стану деталей.

Методи дослідження. Теоретичні і експериментальні дослідження ґрунтуються на процесах моніторингу і технічної діагностики транспортних

засобів в умовах їх експлуатації в умовах неруйнівного контролю. Дослідження, які пов'язані з вирішенням завдань ідентифікації ймовірнісних динамічних систем оцінки залишкового ресурсу у процесі експлуатації транспортних об'єктів, виконували з використанням математичного моделювання, структурного, математичного і тензорного аналізу. При вивченні взаємозв'язків навантажень і розповсюдженням коливань в деформованих середовищах використані методи теорії пружності і механіки руйнувань. Для вирішення задач моделювання процесів експлуатації устаткування в складних умовах впливу зовнішнього середовища, прогнозування і обробки наявної інформації використані спеціальні методи теорії штучного інтелекту, теорії ймовірностей, програмні пакети математичного і імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше запропоновано нові діагностичні параметри стану суднових підшипників кочення, які містять першу головну компоненту характеристик вібраційного сигналу в часовій області та спектральний експес в частотній області, та для суднових підшипників ковзання, який враховує пік-фактор, що дозволяє підвищити якість прогнозування залишкового ресурсу устаткування.

2. Розроблено модель ймовірнісної динаміки процесів діагностики відмов елементів суднових транспортних засобів при їх експлуатації на основі ланцюгів Маркова, яка включає формування апіорної інформації про експериментальні впливи зовнішнього середовища, встановлення простору станів, вивчення причин і ймовірностей відмов, що відрізняється від існуючих заміною дискретних часових інтервалів процесу діагностування послідовністю станів технічних об'єктів і дозволяє досліджувати динаміку накопичення пошкоджень у часі.

3. Створено систему інтелектуального забезпечення діагностики технічної експлуатації та обслуговування транспортних засобів, яка ґрунтується на комплексному використанні експериментальної і статистичної

складових інтервалів діагностики, причин відмов, ключових особливостей об'єктів діагностування та наявністю інтелектуальної складової з визначеними алгоритмами й програмними продуктами, що відрізняється від існуючих мінімізацією суб'єктивізму прийняття рішень.

4. Розроблено метод багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик прогнозування деталей СЕУ при їх експлуатації, який відрізняється від існуючих наявністю обчислювального алгоритму визначення характеристик вібраційних сигналів з урахуванням їх структури і різноманіття частотних характеристик й забезпечує аналіз збігів значень статистичних критеріїв експериментальної інформації та їх згорток, що дозволяє підвищити точність прогнозування залишкового ресурсу деталей.

5. Запропоновано експоненціальну модель деградації для прогнозування стану суднових підшипників ковзання, яка відрізняється від існуючих математичною обробкою характеристик вібраційних сигналів, де вхідну інформацію використовують для навчання моделі, об'єднання статистичних ознак і подальших аналізів, а процес моделювання деградації та прогнозування терміну роботи ґрунтується на аналізі порігового рівня відстежувального сигналу.

Практичне значення отриманих результатів. На основі проведених експериментальних досліджень розроблені нові діагностичні параметри технології діагностики та прогнозування експлуатаційних властивостей суднових підшипників кочення, компресорів, турбонагнітачів і підшипників ковзання турбін головного двигуна, що забезпечує підвищення ефективності експлуатації суднових транспортних засобів, надійність діагностичних робіт та збільшує терміни їх міжремонтної експлуатації в 1,5...2 рази.

Дослідно-промислову перевірку ІСД експлуатаційних властивостей судового енергетичного обладнання виконано на судні «UHL FRONTIER», що підтверджено актом впровадження (від 27.06.2024 р.). Впровадження нового методу діагностування суднових транспортних засобів під час їх експлуатації дозволяє: збільшити обсяг діагностичної інформації без

додаткового втручання в їх конструкції, підвищити надійність проведення діагностичних робіт у 1,3...1,5 разів. Додатково матеріали дисертації впроваджено в навчальному процесі Херсонської державної морської академії для аспірантів спеціальності 275 «Транспортні технології» при викладанні дисципліни «Методи діагностики, контролю надійності транспортних систем та засобів», що підтверджено актом впровадження (від 12.09.2024 р.). Методологію підвищення ефективності експлуатації СЕУ на підставі накопичення, зберігання та обробки великих обсягів діагностичної інформації, прогнозування розвитку дефектів досягнення граничного стану деталей у реальному часі використано при підготовці лекційного курсу дисципліни.

Особистий внесок здобувача. Здобувач самостійно виконував експериментальні дослідження, накопичення і аналіз апіорної вхідної інформації, виконав розрахунки статистичних діагностичних характеристик з урахуванням вимог до проведення експерименту. Особисто виконував обробку і узагальнення результатів експериментальних досліджень. Спільно із науковим керівником д.т.н., проф. Шарко О.В. розроблено алгоритми і технології моніторингу підшипників компресорів та турбін суднових двигунів, турбонагнітачів.

Апробація результатів дисертації. Обговорення результатів роботи здійснено на наступних наукових конференціях: III Міжн. наук-практ. конф. «Дніпровські читання-2022» (Київ, 2022 р.), 14-й Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (м. Херсон, 2023 р.), Proceedings of the 8th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (Lviv, 2024), XI International scientific-practical conference «Information Control Systems and Technologies» (Odessa, 2023 р.), XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (м. Херсон, 2024 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи висвітлені в 13 наукових працях: 2 праці, які входять до наукометричних баз даних «SCOPUS», 6 статей у фахових виданнях, 5 матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить: вступ, чотири розділи, основні висновки, використану літературу, додатки. Робота викладена на 136 сторінках машинописного тексту, містить 41 рисунок, 13 таблиць, 124 літературних джерел, 5 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 186 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

1.1. Аналітичний огляд сучасних інформаційних матеріалів стану технічної діагностики експлуатації транспортних засобів

Технічне діагностування (ТД) згідно з нормативними документами є визначенням технічного стану об'єкта. Це вищий рівень оцінки та прогнозування залишкового ресурсу (ПЗР) порівняно з методами неруйнівного контролю та дефектоскопією. Термін «ТД» означає область знань щодо встановлення технічного стану об'єкта. Вона реалізується методами неруйнівного контролю, аналізів, прогнозуванням та встановленням закономірностей змін експлуатаційних характеристик [1,2]. До її завдань входять пошук місць та причин несправностей та прогнозування поточного стану. Залишковий ресурс (ЗР) – це сумарне напрацювання об'єкта від контролю його технічного стану до граничного стану. У цьому під граничним станом прогнозування устаткування розуміють стан у якому подальша експлуатація устаткування недоцільна.

Якщо технічним регламентом не встановлені форми оцінки відповідності вимогам до пристрою, воно підлягає експертному оцінюванню при перевищенні кількості циклів навантаження. Проведення розрахунку ЗР обладнання входить до прогнозування та експертизи виробничої безпеки [3,4]. Якщо технічною документацією на обладнання встановлено нормативний термін безвідмовної експлуатації, його можна продовжити, провівши розрахунок залишкового ресурсу. ЗР встановлюється на підставі технічного діагностування, що включає обстеження технічного стану транспортних засобів, дослідження механічних властивостей, мікроструктури та хімічного складу, прогнозування та оцінку елементів конструкцій, аналіз результатів, видачу висновків.

Оцінки стану, прогнозування та визначення ЗР в умовах відсутності інформації про пікові та екстремальні навантаження на обладнання в період міжремонтних циклів у процесі експлуатації виробів відчують при своєму використанні ряд обмежень і неточностей оцінок, викликаних динамічними змінами довкілля та стохастичністю процесів, а саме, має місце ситуація ризику. Єдиного визначення понять ризик та невизначеність не існує. Є загальна термінологія, яка трактується залежно від конкретної ситуації на практиці. Слово ризик, згідно з термінологією, позначає таке тлумачення як «дія на удачу», «надія на щасливий випадок», «можлива небезпека», «непередбачуваність результатів». Що стосується транспортних технологій під ризиком розуміється ймовірність загрози втрати ресурсів, недоотримані доходів чи поява додаткових витрат.

З урахуванням розглянутих понять та визначень ризик можна трактувати як наявну невизначеність, яка може чинити як негативний, так і позитивний вплив. Будь-який ризик характеризується альтернативністю подій. Основна відмінність між ризиком та невизначеністю полягають в тому відомими кількісній ймовірності настання певних подій чи ні.

Таким чином, поняття ризик пов'язане з оцінкою ймовірності настання подій, а поняття невизначеність такої оцінки ймовірності не має. Існують відмінності у причинно-наслідкових відносинах обох понять. Невизначеність породжується неповнотою інформації, випадковістю прояву зовнішніх нестійких зв'язків, результатом перетину незалежних процесів та подій. Ризик безпосередньо пов'язаний із прийняттям рішень. Поняття невизначеності неоднозначне, тоді як ризик має кількісний вимір. При цьому слід спочатку виявити ризики, а потім вжити низку запобіжних заходів щодо їх зменшення або усунення.

З погляду теорії ймовірностей правильність вибору стратегій перевезень за умов невизначеності та ризику, виникнення непередбачених ситуацій і подій визначається такими параметрами як вибір стратегії реакції на можливі події, наслідки яких призводять до конкретних результатів, під

час стратегії, в якій результат реалізації подій, має певну ймовірність їх прояву, вибір стратегії, що мають безліч часткових результатів з невідомими ймовірностями.

Методи оцінки ризику та його ідентифікація пов'язані з ймовірністю небезпеки. З іншого боку, ризик це потенційна можливість отримання прибутковості. Ризики є необхідним атрибутом транспортних технологій. Складність у моделюванні ризикових ситуацій полягає у побудові моделей, адекватних реальній обстановці.

Вплив флуктуації довкілля на транспортні перевезення торговельного морського флоту простежується в оцінках, які відображені у статистичних збірках [5, 6]. Представлено оцінку стану транспортних морських перевезень у світі, діагностики та прогнозування до базових напрямів розвитку транспортної галузі. Стохастичні зміни довкілля ускладнюють будь-які екстраполяції та тренди, замінюючи їх поняттям про цільову функцію. Цільова функція транспортних перевезень може бути виражена через ймовірні уявлення динаміки функціонування транспортних потоків. Динаміка обсягів міжнародних морських перевезень представлена рис.1.1 [6].



Рис.1.1 – Динаміка обсягів міжнародних морських перевезень

Функціональний аналіз операційних витрат та процедур управління транспортними перевезеннями в умовах невизначеності дає змогу акцентувати увагу на основних проблемах галузі.

У 2020 році обсяги морських перевезень впали викликаючи трансформацію глобальних виробничих побутових відносин. У 2021 році обсяг морських перевезень збільшився на 3,2% тобто до 11 млрд т внаслідок зростання тоннажу на контейнерні перевезення. Зросли перевезення сухих масових вантажів, проте обсяг перевезень сирової нафти зменшився.

Розрахунки Секретаріату United Nations Conference on Trade and Development (ЮНКТАД) виконані на основі даних компанії Clarksons Research показали наступну динаміку зростання: в 2023 році в порівнянні з 2022 року нафтові танкери 2.96%, контейнеровози 2,48% судна постачання морських платформ 2,19%, танкери для хімічних продуктів [6]. Сталося падіння транспортних перевезень, що здійснюються поромами та пасажирськими суднами на 0,36%, судами для генеральних вантажів на 0,18%.

Найбільш проблемними відзначені порти Китаю внаслідок невизначеності макроекономічної кон'юнктури. Невизначеність покликана прискореною інфляцією та підвищенням вартості життя у країнах західної Європи.

З 2011 року спостерігається небезпечна тенденція старіння флоту. Середній вік суден у 2022 році становить 21,9 року. Сьогодні доволі важко визначити та прогнозувати шляхи, якими йде технічний розвиток і технічне діагностування експлуатації транспортних засобів. Тому спостерігається тенденція використання в умовах високих нинішніх тарифів та фрахтових сіток з креном на експлуатацію старих суден. Якщо нинішня ситуація в галузі міжнародних морських перевезень збережеться, то в 2025 році споживчі ціни можуть збільшитися на 15 %.

За наявності у реальної дійсності кількох станів зовнішнього середовища та специфічних внутрішніх умов транспортних перевезень їм відповідають різні цільові функції. Це в своє чергу зумовлює різні альтернативи управління. Якщо жодна з альтернатив не домінує з інших, виникає завдання багатокритеріальної оптимізації. Синтез ідей

багатокритеріальної оптимізації, має бути заснований на ймовірнісних оцінках результатів та пошуку рішень, за яких значення цільових функцій однаково прийнятні як для постачальників, так і для морських перевізників [7].

1.2. Структуризація основних напрямів досліджень щодо діагностики та визначення залишкового ресурсу транспортних конструкцій та споруд

Проблема забезпечення надійності СТЗ набуває особливої актуальності у зв'язку з його старінням, що значно перевищує темпи технічного переоснащення, розробку та впровадження нових сучасних технологій і конструкцій. Відсутність науково-обґрунтованої концепції технічної діагностики визначення ЗР обладнання потребує необхідності аналітичного огляду наявної інформації з урахуванням загальної тенденції та напрямків. Неослабний інтерес до проблеми діагностики та ПЗР обладнання виявляється у наявності публікації та оглядів з різної галузевої тематики [8-10]. Такі огляди в основному спрямовані на аналіз вітчизняного досвіду та описують подробиці їх використання в практиці прогнозування та контролю старіючого обладнання, терміни експлуатації якого або давно закінчилися або наближаються до критичних позначок. Наведений огляд спрямований на оцінку досягнень діагностики і ЗР обладнання у до критичному стані далекому до граничного охоплює результати і останні досягнення вітчизняного та зарубіжного досвіду у цьому напрямку.

Прогнозування надійності обладнання визначається шляхом вимірів через певні проміжки часу максимальних величин ушкоджень: зношування, корозії, деформації з подальшої екстраполяції залежностей до гранично допустимих величин ушкоджень [11, 12]. Такий спосіб дозволяє отримати досить точні значення показників надійності, якщо відомий вид залежностей ушкоджень від часу. Однак, незважаючи на те, що існує досить багато

залежностей для різних видів навантажень і матеріалів на практиці вплив екстремальних і пікових навантажень на діючому обладнанні в межах його експлуатації, врахувати які неможливо, стримують а іноді і виключають застосування цих методів прогнозування.

Залежно від необхідної достовірності прогнозів може бути використаний спрощений підхід, що ґрунтується на детерміністичних оцінках наявної інформації та більш складний – ймовірнісний, заснований на теорії відмов.

Інформаційними параметрами для ПЗР можуть бути також значні пошкодження, що проявляються у вигляді корозії, зносу, деформаційної повзучості, так і параметри супутніх процесів таких як рівні вібрації, величини витоків, температура вузлів тертя, витрата продуктів та їх зміщення щодо середніх значень [13-16].

Для більш наочного сприйняття наявної інформації, її сутностей та можливостей адаптації до оцінки залишкового ресурсу та прогнозування працездатного стану матеріалів виробу в умовах складних динамічних навантажень та невизначеності впливу довкілля наявну інформацію про проблему діагностики та прогнозування технічного стану обладнання транспортних конструкцій і споруд, можна умовно розділити на групи методик їх реалізацій:

- методики розрахунку, що ґрунтуються на чисельних методах механіки руйнувань;
- методики, засновані на результатах неруйнівного контролю та дефектоскопії;
- методики, що використовують нормативні документи та різні стандарти;
- методики, що базуються на моделюванні та інформаційній підтримці прийняття рішень.

Структуризація діагностичної інформації технічного стану обладнання представлено на рис. 1.2.



Рис. 1.2 – Структуризація діагностичної інформації технічного стану обладнання

Така структуризація наявної апріорної вхідної інформації, яка виконана на основі зазначених класифікаційних ознак, дозволить більш чітко виділити властиві розглянутим методам, моделям та алгоритмам їх реалізації, галузі раціонального використання, недоліки та перспективи використання. Ця інформація є особливо корисною при вирішенні завдань діагностики та прогнозування стану елементів енергетичного обладнання, що працює у складних умовах експлуатації [17].

1.2.1. Діагностика залишкового ресурсу за результатами чисельних методів механіки руйнувань. У [10] наведено результати діагностики ЗР та його визначення для насосних агрегатів. Використані тривимірне моделювання та метод кінцевих елементів. Побудовано геометричну модель експлуатації, що дозволяє оцінити міцність корпусу насоса та основних болтових з'єднань. Зроблено висновки про ПЗР на 15 років.

У [18] запропоновано метод діагностики та ПЗР підшипників механізмів, що обертаються. Використовується метод шумопридушення вейвлет-пакетів та об'єднання інформації у вигляді комплексних характеристик терміну служби підшипників. У [19] вдало використані статистичні методи діагностики та ПЗР на основі глибокого навчання та статистичної інформації. Встановлено, що ПЗР не дає конкретної інформації

щодо зниження продуктивності обладнання. Для цього пропонується байєсовська технологія інтегрування інформації про зниження продуктивності обладнання з дискретними випадковими пошкодженнями в багатовимірних сигналах часового ряду.

На підставі спектрів навантажень та кінцево-елементного аналізу осьового валу колісного навантажувача в роботі [20] складено перелік умов експлуатації та прогнозування його втомної довговічності з використанням критерію Майнера. З урахуванням впливу невизначеності на втомну довговічність проведено аналіз чутливості оцінок втомної довговічності. Встановлено, що втомна довговічність збільшується в 3,7 разів, коли поверхнева залишкова стискаюча напружка досягає 100 МПа і зменшуються на 80% при збільшенні амплітуди навантаження на 10%. Поданий підхід є орієнтиром для прогнозування втомної довговічності та вдосконалення його конструктивного виконання.

Подальший розвиток методу діагностики та ПЗР за результатами чисельних методів механіки руйнувань покладено в роботі [21], де розглянуто завдання втомного руйнування деталей гідравлічної турбіни після тривалого терміну служби. Наведено аналіз стану елементів основних установок лезо механізму обертання лопатки турбомашин та діагностики ЗР деталей при розтріскуванні. Обговорюється проблема оцінки надійності та продовження терміну служби обладнання. В [22] досліджено виникнення відмов за час життєвого циклу обладнання та моделювання їх частоти. Аналізується форма кривої інтенсивності відмов від ймовірнісної властивості взаємодії навантаження та міцності. На основі напружено-міцнісної взаємодії розроблено модель інтенсивності відмов від стохастичних навантажень протягом усього терміну служби. З точки зору невизначеності навантаження та невизначеності міцності запропоновано механізм виділення статистичного ризику навантаження та деградації міцності на частоту відмов.

У [23] показано, що відмови машин та обладнання викликані в основному перетином критичних станів, які визначені граничними

значеннями напружень та деформацій у місцях критичного навантаження. Наведено результати розробки методів оцінки полів деформації, напружень та ЗР з використанням експериментальних та чисельних методів механіки руйнувань. Численні методи механіки руйнувань деталей та вузлів транспортних технологій використані при оцінці технічного стану теплотехнічних установок у режимі реального часу з урахуванням експлуатаційних факторів [24]. Визначено величину ЗР футерування сталерозливного ковша після 30 плавов. Зіставлення розрахункових результатів із їх практичним використанням дозволяє адаптувати оцінки ЗР на сталерозливний ківш широкого класу високотемпературних агрегатів.

Досвід використання чисельних методів механіки руйнування при діагностиці ЗР обладнання, що тривало працює, описаний при плануванні мікромереж з урахуванням невизначеності у [25]. Планування мікромереж, що інтегрують відновлювані джерела енергії, представлено структурою змішаного цілісного програмування. Цільовою функцією є мінімізація вартості життєвого циклу наприкінці планового періоду. Враховується невизначеність навантаження, ціни на електроенергію, швидкість вітру та сонячного виміру. Для їх інтеграції використовується комбінована модель з технікою кластеризації. Чисельне моделювання для тестових мікромереж показало ефективність запропонованої моделі.

До заходів, щодо зниження ризиків при діагностиці визначення ЗР, слід зарахувати результати роботи [26]. Зазначаються причини невизначеності, які пов'язані із засобами контролю та якості вихідної інформації. На прикладі аналізу коерцитивної сили ушкодження внутрішньої поверхні трубопроводів показано необґрунтоване збільшення розрахункового залишкового терміну служби та необхідні коригування.

Метод оцінки ЗР кабелю при термічному старінні описаний в [27]. В основі методу лежить кінетична модель другого порядку та вдосконалене рівняння термічного старіння Арреніуса. Модель використовується як

теоретична підтримка своєчасного виявлення ризиків під час прогнозування термінів служби та ЗР для усунення потенційних аварій.

Для оцінки та ПЗР за результатами чисельних методів механіки руйнувань необхідно:

- діагностувати експлуатаційний стан об'єкта на поточний момент;
- визначити навантаження та наслідки впливу навколишнього середовища на обладнання;
- одержати дані про елементи обладнання за результатами лабораторних випробувань зразків;
- провести розрахунки та прогнози залишкового ресурсу.

1.2.2. Діагностика залишкового ресурсу за результатами неруйнівного контролю та дефектоскопії. Розвиток методів неруйнівного контролю та технічної діагностики стану обладнання, що працює під тиском, описано в [28]. Встановлено кореляцію між безпекою обладнання та його ЗР, визначеним за результатами радіаційних, ультразвукових, електромагнітних та рентгенівських методів. Окреслено основні результати досліджень у цьому напрямку та ключові завдання безпеки експлуатації обладнання.

У [29] запропоновано акустико-емісійний метод діагностування та прогнозування оцінки ступеня деградації механічних властивостей металоконструкції при складних деформаційних напругах. Показано, що зміна умов експлуатації, пікові навантаження, термічні зміни призводять до незворотних структурних змін у матеріалі. Пропонується спосіб визначення ЗР, заснований на поліномній апроксимації результатів акустичних вимірювань та побудові граничних кривих, відділяючих область працездатності від області руйнування. Привабливість використання запропонованого методу полягає у виключенні необхідності зупинки устаткування для виконання вимірювань.

Досвід використання НК з метою оцінки ЗР транспортного нафтохімічного устаткування викладено в [30]. Ймовірність відмови

елементів устаткування оцінюється з урахуванням наявних статистичних даних, які зареєстровані у галузі. Показано, що ймовірність виходу з ладу конкретної установки, що експлуатується протягом тривалого часу, може істотно змінюватись через різноманітність вихідних властивостей матеріалів, відмінності в технологічних режимах і процедурах обслуговування.

Економічним засобом зниження невизначеності, пов'язаної з ймовірністю, є систематичний моніторинг мікроструктури. Серед методів неруйнівного контролю ЗР та його практичних застосувань цікавить опис роботи [31], у якій сформульовано підхід до визначення кінетики зростання тріщин у маневровому режимі роботи устаткування. Оцінено вплив агресивних гідруючих середовищ на залишковий термін служби елементів конструкцій. Запропоновано розрахункові моделі до критичного зростання повзучих тріщин.

Аналогічна робота, що підкреслює правильність обраного напрямку, описано у [32]. Робота присвячена оцінці ЗР диска ротора парової турбіни з урахуванням кількості пусків та зупинок обладнання. Представлено методику обчислення малоциклової втоми та реєстрації режиму експлуатації повзучих тріщин. Отримана інформація може бути засобом діагностування стану елементів обладнання відповідального призначення.

У [33] показано, що на основі періодичного технічного обслуговування, підвищення надійності визначення ЗР обладнання досягається за рахунок динамічного регулювання часового інтервалу між процесами діагностування. Розрахунок середнього ЗР здійснюється шляхом підтримки модуляції в ланцюзі залізничної колії. У [34] представлена нова технологія оцінки технічного стану електрообладнання, яка заснована на реєстрації електромагнітного випромінювання, що супроводжує роботу високовольтного обладнання. При цьому ЗР та технічний стан електроенергетичної системи визначається шляхом аналізу електромагнітного поля.

НК поточного стану та ЗР металоконструкції на основі результатів

вимірювань коерцитивної сили наведено в [35]. Коерцитивна сила визнана однією з структурно-чутливих характеристик магнітної дефектоскопії. Контролюються механічні властивості та динаміка їх змін у процесі експлуатації. Встановлено, що коерцитивна сила безпосередньо пов'язана з діючими експлуатаційними напруженнями та накопиченням пошкоджень у металі, які визначить ЗР конструкції.

Важливим супутнім завданням щодо чинників, які впливають оцінку та ПЗР є виділення конкретних сигналів, що вказують на локалізацію проблеми, що призводять до зносу устаткування.

1.2.3. Методи оцінки залишкового ресурсу, які використовують нормативні документи та стандарти. При визначенні ЗР устаткування немаловажну роль грає оцінка наявної інформації. У [36] наведено досвід використання інформації про терміни служби для поліпшення послуг. Показано, що технічне обслуговування є ключовою галуззю вдосконалення та сертифікації процесів діагностики та визначення ЗР промислового сервісу.

У [37] наведено аналіз даних з експлуатації тепломеханічного обладнання реакторної установки та її відповідності з існуючими стандартами та нормативною базою. Встановлено необхідність розробки єдиних правил відбору фізичних параметрів, що характеризують стан обладнання з урахуванням його деградації. Структурне формулювання класифікаційних критеріїв нормативно-правового забезпечення дозволяє удосконалити оцінку залишкового ресурсу.

Системне вивчення причин, умов та механізмів корозійних та механічних пошкоджень трубних виробів тривалої експлуатації викладено у [38]. Вказано протиріччя та невизначеності в нормативно-технічній документації служб нагляду за станом трубопроводів, що працюють в агресивних середовищах та необхідність створення бази для порівняльного аналізу параметрів тріщиностійкості.

Управління життєвим циклом устаткування з прикладу

електромережних коливань викладено в [39]. Відзначається, що витрати на ремонт обладнання у майбутньому перевищать повну заміну на нове обладнання з аналогічними параметрами. Розроблено програмний продукт для керування життєвим циклом електромережевого обладнання. Отримано оціночні функції з урахуванням коефіцієнтів дисконтування та залишкової балансової вартості.

Розвиток напрямку аналізу втомної довговічності наведено в [40] для високотемпературного реактора в нормальних умовах експлуатації з обчисленням порогових значень та допусків. У [41] наведено результати роботи з оптимального розміщення та визначення розмірів відновлюваних джерел енергії на основі вартості їх життєвого циклу з урахуванням невизначеності. Запропоновано багатосценарну модель оптимізації інвестицій, яка спрямована на облік щільності ймовірностей станів за допомогою тестової системи.

У [42] виконано оцінку життєвого циклу геотермальної електростанції в Ісландії. Геотермальні електростанції країни забезпечують близько 25% електроенергії та майже все теплопостачання. Було проведено оцінку життєвого циклу відповідно до міжнародних стандартів. Вуглецевий шар був використаний як індикатор стану матеріалу для продовження терміну служби електростанції.

У [43] наведено результати вирішення проблеми діагностики призначення ресурсу на безпечну експлуатацію ємнісних пристроїв після проведення технічного діагностування за допустимими технічними параметрами нафтопереробного виробництва. Запропоновано математичну модель та алгоритм оцінки залишкового ресурсу, розраховані діагностичні коефіцієнти, визначені заходи інформативності.

1.2.4. Діагностика та прогнозування залишкового ресурсу за результатами моделювання та інформаційного супроводу. Сучасні інформаційні технології діагностики та ПЗР ґрунтуються на використанні телекомунікаційних засобів, можливостей сучасних смартфонів та планшетів із доступом у мережі Інтернет.

Подальший розвиток діагностики, прогнозування та визначення ЗР отримано за допомогою інформаційно-аналітичних методів. У роботі [44] розглянуто потенціал використання математичного підходу з метою оцінки рівнів забруднення твердими частинками мастила. Відзначаються невизначеності та труднощі у прогнозуванні відмов на основі попередніх збоїв системи деградації компонент та швидкості деформації. Наведено методику виділення діагностичних сигналів та їх обробку за допомогою системи нечіткого виведення та нейронних мереж. Як найбільш значущі модельні уявлення обрані концентрація частинок заліза і сажі у відпрацьованому маслі. Отримано інформацію про стан як мастильних матеріалів, так і механічних систем із висновком про деградацію механічного обладнання та оцінку його залишкового терміну служби.

Визначення діагностики ЗР устаткування та його прогнозування з урахуванням інформаційних ресурсів описано у [45]. Методом цифрових двійників виробляється інтеграція різних чинників формування стандартів технічного обслуговування. За рахунок цього збільшується обсяг діагностичної інформації без додаткового вторгнення у конструкцію двигуна, що знаходиться у складі енергетичної установки. Виконаний імітаційний експеримент та моделювання технологій цифрового двійника дозволили визначити низку заходів щодо планово-попереджувальних робіт та оцінки ресурсу обладнання.

У [46] для розв'язання задачі моделювання технічного обслуговування складного електромеханічного обладнання запропоновано модель ПЗР в удосконаленому Вінеровському процесі з випадковими коефіцієнтами на основі даних апостеріорного розподілу процесів деградації. Модель, що

реалізується з використанням теореми Байєса і цільових показників надійності, дозволяє виконати оцінку ЗР обладнання, що знаходиться в експлуатації з більш високою точністю збіжності алгоритму рішення.

Облік невизначеності при діагностиці тривалого працюючого устаткування описаний в [47]. Розглянутий стійкий до відмови режим ковзання системи автоматичного кермового управління в області інтелектуальної техніки з безпілотним керуванням. Описано заходи щодо компенсації невизначеності для посилення ефекту керування кутом ковзання. Запропонований адаптивний метод керуванням режимом ковзання та визначення кута нахилу передніх коліс з використанням фільтра Калмана та інтерференції невизначеності.

В [48] наведені розробки програмного забезпечення для управління працездатністю мережевих інформаційних систем на основі бойової готовності на рівні інформаційних ресурсів. Запропоновано заходи інтелектуальної динаміки несправностей, ЗР та засобів підтримки прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Метод визначення розташування та розмірів для активних розподільчих мереж, заснований на стохастичному програмуванні, представлений у [49]. Запропоновано модель програмування з обмеженнями за стохастичному параметру, що враховує системну невизначеність, та необхідні обмеження щодо потужності, конфігурації та надійності працюючого обладнання. У [50] наведено результати математичного моделювання ЗР агрегатів електростанцій на основі методів кінцевих елементів та тривимірного моделювання. Враховуються розміри обладнання та умови експлуатації. У [51] описана методика визначення ЗР високотемпературних агрегатів працюючого обладнання з використанням імітаційного моделювання. У [52] дається аналіз надійності та ЗР судин під тиском, що містять тріщини. Показано, що невизначеність експлуатаційних навантажень призводить до зародження тріщин. Описано методологію завчасного інформування про ймовірності відмов.

Виявлення та діагностика несправностей у внутрішніх навігаційних мережах, призначених для транспортних перевезень, методами комп'ютерної діагностики представлено в [53]. Внутрішні навігаційні мережі використовуються для перевезень з економічною та екологічною вигодою. В умовах зміни клімату та техногенними втручаннями, пов'язаними з військовими діями та екстремальним виснаженням водних ресурсів вирішального значення набуває контроль рівня судноплавства та нагляд за ним. Запропоновано метод моделювання та динамічної класифікації несправностей судноплавних каналів.

Підбиваючи підсумки виконаного огляду сучасного стану методів діагностики та прогнозування визначення ЗР, можна констатувати що чисельні методи механіки руйнувань стримуються низькою ефективністю та низькою достовірністю засобів контролю напружено-деформованого стану особливо в галузі пластичної деформації. Іншими їх недоліками є локальність контролю, невизначеність впливу структурних неоднорідностей, аналіз інформації лише про поверхневі шари матеріалу, складність проведення розрахунків.

Аналіз використання методів діагностики за результатами НК та дефектоскопії показав обмеженість цих методів визначення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку, коли на рівні структури відбулися незворотні зміни, що викликають попереддефектний стан через втому. Рівень чутливості цих методів не дозволяє виявляти ці стани та ідентифікувати зони майбутніх руйнувань. Спільне використання методів НК та випробувань твердості переносними приладами дозволяє підвищити надійність оцінок діагностики та ПЗР.

Існуючі нормативні документи та стандарти визначення залишкового ресурсу, як показала практика їхнього використання, мають обмежене застосування для устаткування, що знаходиться в експлуатації. Причинами обмежень є окалина, корозія зовнішнього шару металу, необхідність урахування специфіки контролю та форм виробів, що зумовлюють

невизначеність та ризик у прийнятті остаточних висновків.

Найбільша кількість аналізованих робіт з діагностики та ПЗР транспортних конструкцій і споруд, як показав досвід напрямів їх розвитку, належить математичному моделюванню та ймовірнісним методам, а також інформаційній підтримці висновків про продовження, прогнозування та оцінку ЗР обладнання в процесі експлуатації. Над розвитком цього напрямку нині працюють усі діагностичні центри світу. В основі цієї групи методів оцінки ЗР лежить гіпотеза про динамічне співвідношення енергії взаємодіючих полів та фізичних ефектів, що супроводжують механізми руйнувань матеріалу. Поєднуючи суб'єктивні експертні та об'єктивні елементи технічного діагностування експлуатаційних параметрів зі способами обробки наявної інформації методами математичного моделювання та ймовірнісної динаміки можна отримати надійний спосіб моніторингу обладнання, що тривало працює в процесі його експлуатації.

1.3. Система технічної діагностики поточного стану транспортних пристроїв

Технічне діагностування охоплює область знань, що включають теорію, методи та засоби ідентифікації стану об'єктів. Технічне діагностування проводиться під час планових зупинок технічних пристроїв суднового обладнання. Вона включає наступні операції:

- вивчення технічної документації, умов експлуатації, виконаних ремонтів, виявлених відмов і їх причин;
- зовнішній огляд;
- виміри твердості металу та вибірково зварних швів;
- товщинометрію;
- дефектоскопію;
- гідравлічні випробування на міцність;

– вимірювання герметичності сальникових ущільнювачів, ресиверів та ін. за допомогою течешукачів.

Методи діагностування та прогнозування дозволяють виявляти поступові відмови технологічного обладнання з використанням неруйнівних випробувань: капілярними, магнітопорошковими, вихрострумовими, ультразвуковими методами, виявляти дефекти типу несплошностей матеріалів, тріщин, волосин, раковин, непроварів, визначають знос і залишковий ресурс, дозволяють проводити моніторинг змін властивостей. У той самий час системи діагностування дозволяють визначати лише інформацію, яка знімається з датчиків, виконавчих пристроїв, контролерів. Побудова систем діагностики, що дозволяють здійснювати комплексну ідентифікацію стану під час технічної експлуатації та обслуговування суднових транспортних засобів, дають змогу отримати оперативну, максимально об'єктивну інформацію про об'єкт діагностування та прогнозування. Це є важливим науково-технічним завданням дисертаційного дослідження.

У процесі діагностування можна виділити такі етапи:

- виявлення аномалій та несправностей в експлуатації;
- локалізація несправностей;
- діагноз виявлення причин несправностей;
- прогнозування розвитку несправностей;
- оцінка ЗР устаткування.

Сучасні системи технічної діагностики відносяться до складних об'єктів, що володіють при їх використанні високими показниками ризику та невизначеності, внаслідок сильного впливу навколишнього середовища, тому для підвищення надійності і достовірності висновків діагностування та прогнозів використовують цілий комплекс вимірів (рис. 1.3).

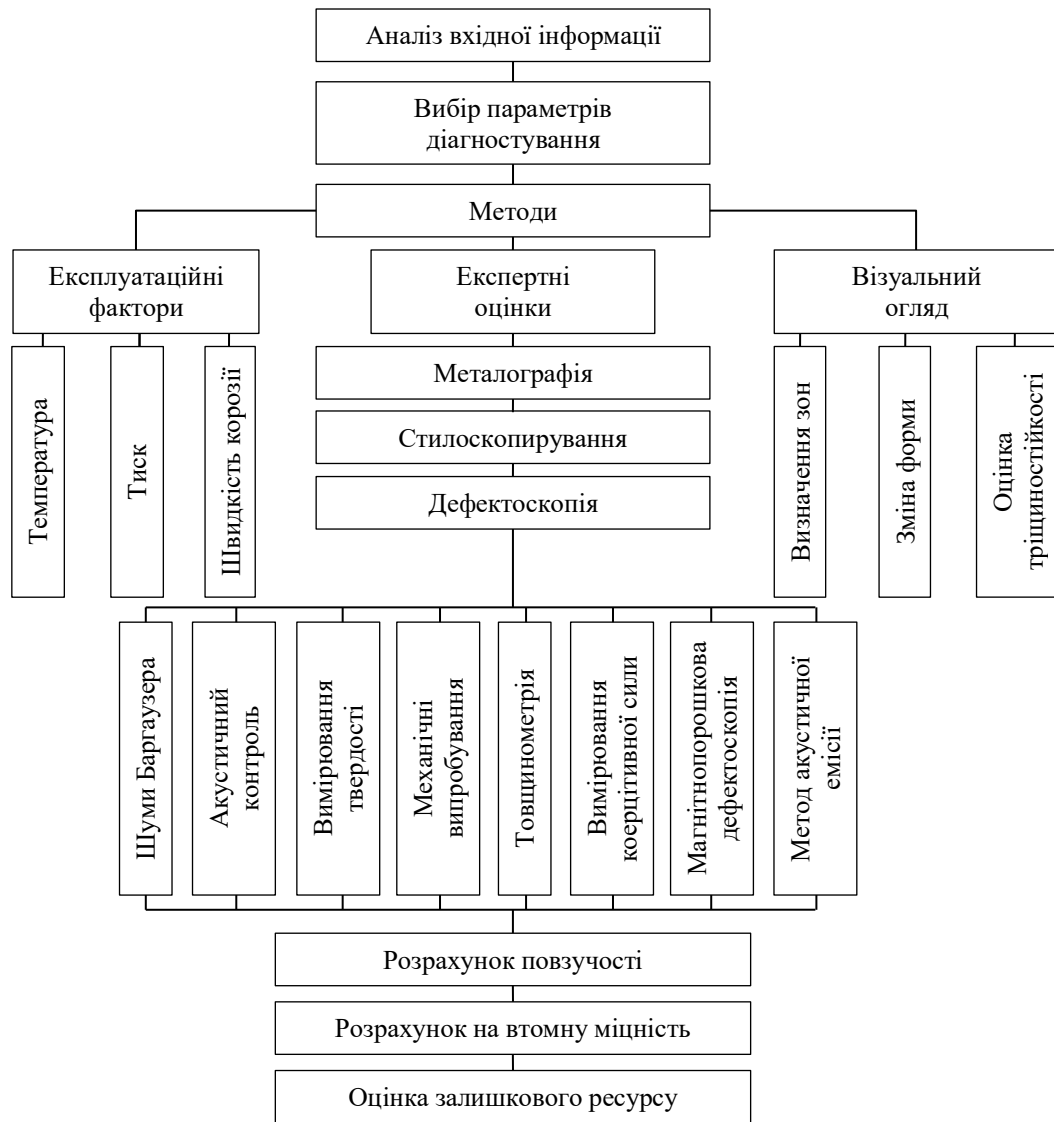


Рис. 1.3 – Система технічної діагностики поточного стану транспортних пристроїв

Загальна система комплексного контролю при технічному діагностуванні складається з традиційних методів дефектоскопії, неруйнівного контролю та методів інструментального контролю [54].

Основою для оцінки стану обладнання та ПЗР є така інформація:

- інформація про діагностику вихідного стану об'єкта;
- інформація про діагностику поточного стану об'єкта;
- дані про навантаження та умови впливу навколишнього середовища на експлуатаційні параметри об'єкта;
- експериментальні відомості про елементи конструкцій, що

визначають ресурс виробу загалом;

- виявлення зон руйнування;
- оцінка ресурсу до досягнення граничних станів.

Незважаючи на різноманіття наявних засобів ідентифікації технічного стану елементів транспортних засобів, які є як на борту судна, так і в стаціонарних лабораторних умовах у період міжремонтних циклів комплекси мають ряд істотних недоліків:

- статичність;
- необхідність обліку великої кількості різноманітних показників;
- неповнота і неадекватність інформації;
- низька якість прогнозних оцінок;
- неоднозначність оцінок;
- неоднозначність причинно-наслідкових зв'язків;
- низька продуктивність діагностики;
- необхідність сканування і підготовки поверхонь для контролю.

Повна діагностична система підшипників приводних агрегатів редукторів, муфт, паливної апаратури включає параметричні, вібраційні, термоелектричні та інші методи контролю, оптичний контроль за допомогою ендоскопів, візуальний контроль вимірювання ударних імпульсів.

Разом з тим жорсткі умови експлуатації характеризуються різкими перепадами температур і тисків, знакозмінними навантаженнями на робочі органи машин і механізмів у періоди штормів та екстремальних навантажень змінюють властивості матеріалів виробів та різко знижують їхню міцність та інші експлуатаційні характеристики та параметри. Оскільки врахувати заздалегідь ці зовнішні чинники неможливо внаслідок непередбачуваності та невизначеності розвитку ситуації, необхідна розробка нових діагностичних засобів і параметрів ПЗР, які забезпечують досягнення кінцевої мети – підвищення ефективності використання суднових транспортних засобів [55].

Визначення ЗР металевих конструкцій в процесі експлуатації пов'язано з спостереженнями при накопиченні пошкоджень. Однією з проблем, що

обмежують ефективність технічної діагностики, прогнозування та оцінки ЗР в процесі експлуатації в умовах складних динамічних навантажень є відсутність кількісного зв'язку результатів діагностики з ЗР. Тому розробка та створення нових методів та засобів апаратного, комп'ютерного моделювання діагностики та прогнозування змін експлуатаційних властивостей СТЗ має науковий та практичний інтерес.

Висновки до I розділу

1. На підставі завдань з аналізу інформаційних матеріалів з технічної діагностики процеси експлуатації транспортних засобів в умовах невизначеності характеру та величині навантажень здійснений підхід щодо розуміння особливостей категоріальних понять ризику та невизначеності. Наголошено, що підставою для прийняття рішень щодо подальшої експлуатації виробів при накопиченні пошкоджень виробів є оцінка ЗР та його граничного стану. Встановлено, що основні проблеми удосконалення діагностики та прогнозування технічної експлуатації транспортних засобів і ідентифікації їх стану пов'язані не тільки з використанням нових зразків вимірювальної техніки, але з розробкою нових інформативних параметрів і прийомів обробки інформації про зміни структурного стану середовища.

2. Проаналізовано сучасний стан розробок щодо діагностики, прогнозування і визначення ЗР транспортних конструкцій та споруд, що експлуатуються в умовах складних динамічних навантажень. Виконано структурування основних напрямів досліджень за результатами чисельних методів механіки руйнувань, за результатами НК та дефектоскопії, з використанням нормативних документів та стандартів, моделювання та інформаційного супроводу. Це дозволило виділити основні обмеження щодо застосування існуючих методик оцінки ушкоджень конструкцій при їх експлуатації та визначити шляхи їх вдосконалення. Підкреслено, що перспективність методів діагностики, прогнозування та ЗР належить

математичному моделюванню і ймовірнісним співвідношенням, інформаційному супроводу структурних ефектів, що утворюють з експертними висновками нерозривний комплекс моніторингу суднового обладнання.

3. Розглянуто сучасні системи технічного діагностування транспортних засобів силових комплексів суднового устаткування. Визначені їх основні недоліки, до складу яких слід віднести необхідність обліку великої кількості показників, статичність обмеження у часі і просторі, неоднозначність причинно-наслідкових зв'язків. Основним завданням ідентифікації стану прогнозування та визначення ЗР транспортних засобів в процесі експлуатації є спостереження за зміною механічних властивостей матеріалів при накопичуванні пошкоджень, а також визначення параметрів передвісників виникнення інформаційних сигналів під час руйнування обладнання. Складено блок-схема заходів щодо діагностики та ПЗР, основними з яких є придбання вхідної інформації, вибір контрольованих параметрів, використовувані методи, експлуатаційні фактори, засоби візуального огляду, дефектоскопія, розрахунки на повзучість та втомну міцність. Визначені основні напрямки удосконалення діагностування технічного стану суднового обладнання, які включають аналіз інформаційних матеріалів, встановлення норм функціонального призначення устаткування, пошук нових інформаційних параметрів процесу спостереження у експлуатації, розробку процедур діагностики і локалізації джерел пошкоджень.

4. Встановлені особливості вимог до діагностики технічної експлуатації СТЗ. Показано, що протягом терміну служби здійснюють безперервне технічне обслуговування і періодичний ремонт. Разом з тим у процесі експлуатації в умовах невизначеності характеру навантажень відбувається відхилення властивостей матеріалу від нормативних значень, що вимагає вимушених зупинок обладнання. Крім того, зазвичай контролюють один вид деформацій у той час, коли при експлуатації матеріал піддається комплексному впливу навантажень.

РОЗДІЛ 2

ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1. Синтез математичних моделей діагностики технічного стану транспортних засобів під час їх експлуатації

Синтез математичних моделей діагностики технічного стану елементів транспортного обладнання під час їх експлуатації залежить від повноти та якості наявної апріорної інформації. Однак невизначеність характеру та величини навантажень при експлуатації деталей СТЗ, ускладнюють використання існуючої інформації і вимагають подальших експериментальних досліджень та розробки на їх основі математичних моделей технічної діагностики.

Прогнозування та видача висновків про результати технічного стану транспортних засобів на підставі ТД так само як і оцінка ЗР є найбільш уразливою ланкою технологічної експлуатації деталей механізмів суднового обладнання.

В основі математичних моделей оцінки технічного стану конструкцій під навантаженням лежить загальний принцип перетворення деградації структури на фіксований сигнал різної природи походження. Це може бути локалізація дефекту, що виявляється у вигляді імпульсу кінцевої довжини та розвитку дефекту під навантаженням, що проявляється у вигляді низки безперервних подій.

Математичні моделі діагностики технічного стану об'єктів, повинні детально описувати внутрішні та зовнішні характеристики процесів взаємодії з навколишнім середовищем їх функціонування. Цей клас моделей відносять до імітаційних [56]. Класифікація математичних імітаційних моделей і їх різновидів з погляду механізму діагностики та прогнозування

експлуатаційних властивостей транспортного обладнання представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1 – Різновиди математичних моделей інтелектуального забезпечення діагностики та прогнозування експлуатаційних властивостей транспортних пристроїв

Подана на рис. 2.1 структуризація математичних моделей розглядається як інформаційна підтримка інтелектуального забезпечення діагностики зміни властивостей транспортних об'єктів, кожна з яких має певну мету.

Статистичні моделі будуються на підставі експериментальних даних взаємодії вхідних і вихідних змінних та відображають макети розташування елементів у реальних конструкціях. Що стосується діагностики експлуатаційних властивостей, то вони можуть бути використані при статичних випробуваннях на вигин, розтягування, кручення.

Коливання атомів не ініціюють поширення хвиль. Для цього необхідні зовнішні обурення, що викликані змінами структури при навантаженні. Перетворення дискретних сигналів, викликаних напруженнями в структурі матеріальців в безперервну аналітичну функцію можливо за допомогою рядів Фур'є.

Для побудови математичної моделі процесу ідентифікації стану конструкцій можливо використовувати синтез математичних моделей закону збереження імпульсу і закону збереження моменту імпульсу [53].

$$\int_V \frac{dv}{dt} = \int_V \rho f dv + \int_V \sigma_n ds$$

$$\int_V \frac{d}{dt} (r \times v) dV = \int_V r \times \rho f dv + \int_S r \times \sigma_n ds$$

де ρ – густина матеріалу;
 v – швидкість поширення коливань;
 S – площа поверхні;
 V – об'єм елементарного осередку;
 r – відстань від початку координат;
 f – одиничне зусилля.

Динамічні моделі відображають взаємодію елементів транспортних пристроїв у зменшеному вигляді. Їх особливістю є зовнішня та функціональна схожість. Різновидом їх є аналогові моделі, у яких властивості реального об'єкта є іншою ідентичною властивістю. Щодо діагностики експлуатаційних властивостей транспортних об'єктів, то цією властивістю можуть бути швидкість поширення ультразвукових коливань, коерцитивна сила, товщинометрія.

Детерміновані моделі ґрунтуються на взаємодії управлінських впливів та машинних обчислювальних компонент інформації реєструючих пристроїв. Що стосується моніторингу експлуатаційних властивостей транспортних об'єктів, то такі моделі можуть бути використані при встановленні взаємозв'язку вимірювальних і обчислювальних значень. Такі моделі можуть бути використані як заміна аналітичних уявлень цифровізацією та гібридними моделями, що є найбільш сучасними та перспективними моделями діагностики та прогнозування.

Стохастичні моделі будуються на основі ймовірнісних уявлень. Визначаються функції розподілу ймовірностей змінних, що лежать в основі досліджуваного явища та випадкового збудження. Стохастичне імітаційне моделювання зберігає логічну структуру та послідовність чергування станів явища. У таких моделях немає необхідності зіставлення аналітичних виразів

шуканих величин. Це особливо привабливо для оцінки граничного стану обладнання, прогнозуванні та оцінки ЗР при його експлуатації.

Дискретні математичні моделі ґрунтуються на вивченні поведінки та функціональних можливостей системи у часі. При цьому стан системи змінюється лише в моменти здійснення подій, а між цими станами система не змінена. Функціонування дискретної імітаційної моделі відбувається в дискретні проміжки часу, організовуючи пошук наступної події. Перспективність такого виду моделей для визначення діагностики стану транспортного обладнання у процесі його експлуатації полягає у фіксації екстремальних навантажень, які перевищують нормативні.

Безперервні імітаційні моделі використовуються для систем, що безперервно змінюються у часі, здійснюючи оперування з безперервним часом. Реалізація моделей проводиться в термінах похідних змінних за допомогою диференціальних рівнянь. Щодо діагностики експлуатаційних властивостей, то вони можуть бути використані при опису швидкості корозійних пошкоджень. Мета такого виду моделювання визначити реакцію змінної, якою є стан системи в залежності від безперервного часу.

Виходячи з синтезу математичних моделей для ТД та прогнозування технічного стану транспортних засобів під час експлуатації може бути корисною одномірною моделлю дискретної мікроструктури у вигляді точкових мас, з'єднаних пружними зв'язками [57].

Потенційна енергія такої системи має вигляд:

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_n u^2(n, t)$$

де u – енергія у рівноважному стані;

n, n' – номери взаємодіючих частинок.

Кінетична енергія такого ланцюжка

$$T = \frac{m}{2} \sum_n u^2(n, t)$$

Різниця кінетичної та потенційної енергії виражається через функцію Лагранжа L .

$$L = \frac{m}{2} \sum_n u^2(n, t) - \frac{1}{2} \sum_{n, n'} \Phi(n, n') u(n, t) u(n', t) + \sum_n q(n, t) u(n, t)$$

де $\sum_n q(n, t)$ та $\Phi(n, n')$ оператор пружної енергії.

У загальному вигляді рівняння Лагранжа має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{u}} - \frac{\partial L}{\partial u} = 0$$

З урахуванням функції Лагранжа рівняння коливального руху приймає вигляд:

$$m \ddot{u}(n, t) + \sum_n \Phi(n, n') u(n, t) = q(n, t)$$

Ідентифікація технічного процесу діагностування стану контрольованих транспортних засобів трактується як розробка моделі динамічного процесу перетворення вихідних даних системи діагностування в інформацію стану матеріалу в момент руйнування. При цьому реалізується можливість визначення стану матеріалу у джерелі пошкодження конструкцій.

Якщо підставити рівняння Коші у формулу Остроградського-Гауса отримаємо:

$$\int_V \rho \frac{dv}{dt} dV = \int_V f \rho dV + \int_S \sigma n dS$$

де n – одинична нормаль.

Компоненти тензора напруги можуть бути представлені в декартові системі координат

$$\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

Компоненти $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ є нормальними напругами, компоненти τ_x, τ_y, τ_z – дотичні напруги.

Рівняння збурень викликаних екстремальними або піковими навантаженнями набуває вигляду

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho f_x = \rho \frac{dv_x}{dt} \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho f_y = \rho \frac{dv_y}{dt} \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho f_z = \rho \frac{dv_z}{dt} \end{cases}$$

Інтегруючи аналітичні залежності у часі, можна визначити реакцію системи на управляючі впливи. Щодо діагностики та прогнозування експлуатаційних властивостей СТЗ, то це може бути реакція на екстремальні навантаження. Зведена інформаційна підтримка ТД суднових транспортних засобів представлена в таблиці 2.1 [58].

Таблиця 2.1 – Інформаційна підтримка діагностики експлуатаційних властивостей суднових транспортних пристроїв

Статистичне імітаційне моделювання	Динамічне імітаційне моделювання	Детерміноване імітаційне моделювання	Стохастичне імітаційне моделювання	Дискретне імітаційне моделювання	Безперервне імітаційне моделювання
Натурні випробування. Випробування на розтяг, вигин, кручення	Контроль супутніх ідентичних властивостей, товщиниметрія, коерцитивна сила, швидкість ультразвуку, аналогові моделі	Встановлення взаємозв'язку вимірювальних та обчислювальних значень. Заміна аналітичних моделей цифровою та гібридними моделями	Кінетика накопичення ушкоджень, побудова графіків у реальному часі	Фіксація екстремальних навантажень, використання інтервальних оцінок	Функціональна діагностика, реакція на навантаження та пошкодження, диференціювання супутніх факторів

При моделюванні складних систем їх діагностики та прогнозування, якими є елементи транспортних пристроїв, слід використовувати сукупність декількох видів моделей, що відрізняються деталізацією їх зміни. Відповідно до сценарію, моделювання ЗР транспортних пристроїв може бути виконане шляхом створення інтерактивних моделей, які передбачають діалог з користувачем. Питання, які механізми моделювання слід використовувати, вирішується шляхом аналізу переваг і недоліків стосовно конкретної моделі.

Така інформація дозволить змінити режим експлуатації обладнання, знизити завантаження на його робочі органи та загалом забезпечити підвищення надійності та ефективності СТЗ.

2.2. Цифровізація діагностики суднових транспортних засобів

До існуючих недоліків оцінки працездатності СТЗ у процесі їх експлуатації слід віднести відсутність достовірної та актуальної інформації необхідної для компетентних рішень щодо оцінки ризиків та ефективного управління функціонуванням обладнання. Впровадження найдосконаліших апаратних засобів потребує обов'язкового використання телекомунікаційних елементів із застосуванням цифровізації.

Цифровізація являє собою процес перетворення аналогових даних про робочі процеси експлуатації транспортних засобів та результатів їх діагностики та прогнозування у цифровій формі. Використовуючи цифрові технології в оцінці граничного стану елементів транспортного обладнання можна різко підвищити точність оцінок і визначити нові діагностичні параметри і структурні закономірності, що дозволяє підвищити надійність об'єктів діагностики. Класифікація переваг цифровізації діагностики експлуатаційних властивостей транспортних об'єктів наведено на рис. 2.2 [58].

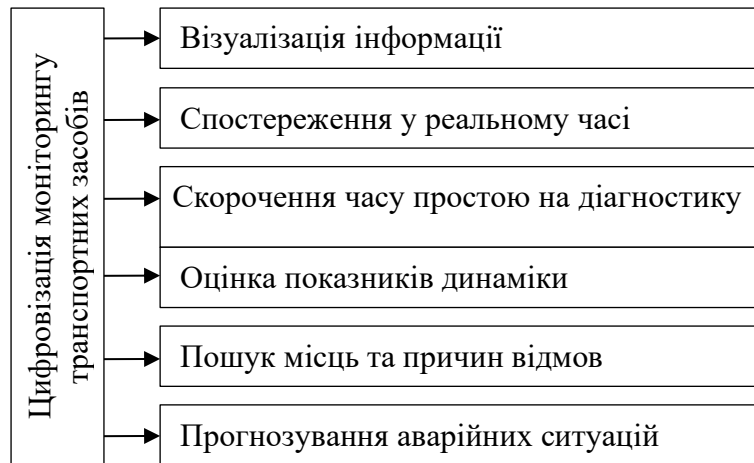


Рис. 2.2 – Класифікація переваг цифровізації діагностики експлуатаційних властивостей транспортних об'єктів

Особливо велике значення набуває вплив цифрових технологій на результати оцінок експериментальних досліджень на основі статистичних вимірювань системного аналізу та штучного інтелекту, пов'язаного з великими даними. Просування цифрових технологій ґрунтується на парадигмі нерозривного зв'язку досягнень сучасних інструментів діагностики стану технічних об'єктів у процесі їх експлуатації з генеруванням, акумулюванням, агрегуванням та формалізацією інформаційних потоків та знань, представлених у цифровому вигляді.

Створення цифрових платформ забезпечує збирання та обробку даних, аналітику оцінки стану об'єкта діагностування. Питання безаварійної експлуатації транспортних засобів та підвищення якості технічного обслуговування пов'язані з діагностикою та ремонтом, тому технологія цифровізації насамперед впроваджується саме у цьому напрямі. У своїй практичній основі цифровізація діагностики базується на складних взаємозв'язках інформаційних та комунікаційних елементів, що ґрунтуються на діагностуванні та обробці великого масиву експериментальних даних цифрового простору та його прогнозуванні.

У застосуванні до розробки методичних основ технічної діагностики транспортних засобів основні категоріальні поняття, що використовуються у

цифрових технологіях, набувають своїх особливостей формулювань та актуальності використання. Оцифрування – це переведення процесу діагностики у цифрову digital форму. Цифровізація – це використання digital формату для оптимізації операцій. Цифрова трансформація – це створення нових каналів та рішень щодо оцінки результатів технічної діагностики з використанням перетворених цифрових даних.

Використання цифрових двійників замість натурних випробувань дозволяє досліджувати процеси навантаження транспортних конструкцій при їх експлуатації у вигляді цифрових копій. Використання цифрових двійників дозволяє значно зменшити кількість натурних випробувань та час діагностики причин, що викликають відхилення експлуатаційних параметрів, таких як температура, тиск в мастилi, деформації від значень, що визначаються нормативними документами.

Для того, щоб вибрати оптимальну стратегію оцифрування трансформації та їх прогнозування необхідно відстежувати цифрові тренди та технологічні рішення щодо пошуку нових інформаційних діагностичних та прогнозних параметрів. Цифрові технології в метрологічних вимірах включають зміни деформацій та товщини об'єкта в процесі візуального контролю, методів постобробки даних неруйнівного контролю, оцифрування експлуатаційних характеристик у період міжремонтних циклів, моделювання оцінок ЗР при наближенні до граничного стану експлуатації об'єктів. Цифрова технологія працює з дискретними сигналами займаючись збиранням, зберіганням, обробкою даних в електронному вигляді. При їх використанні спрощується процес доступу до факторів, що відображають зміну експлуатаційних параметрів у процесі накопичення пошкоджень та збільшується швидкість надходження інформації.

До переваг цифровізації діагностики транспортних засобів слід віднести той факт, що в процесі оцінок технічного стану об'єктів, що експлуатуються, цифрові тренди діагностичних параметрів довго не можуть бути критичними, а в певний момент починають розвиватися лавиноподібно.

Вивчення цифрових трендів та їх використання в діагностиці зміни експлуатаційних властивостей є основою запобіжних заходів та повідомлень про небезпеку, що насувається. Основні призначення цифровізації діагностики СТЗ, складені на основі операційної діяльності етапів діагностування та їх можливого застосування за допомогою цифрових трендів, представлено на рис. 2.3 [59].



Рис. 2.3 – Етапи діагностування та їх можливого застосування за допомогою цифрових трендів

Для контролю технічного стану обладнання, що знаходиться в складних умовах експлуатації, застосовуються різні засоби технічного діагностування, оснащеного різними датчиками і контролерами, які забезпечують вимірювання вібрації, температури, тиску і т.д. У разі виходу контрольованого діагностичного параметру за граничні значення цифровізація обробляє діагностичний сигнал і сигналізує про виявлені несправності [58].

2.3. Методологія управління діагностичної інформацією

Різноманітність та різні розмірності діагностичних сигналів призводять до необхідності їх злиття в єдиний узагальнений показник без втрати вхідної

інформації. Для цього можна використовувати метод головних компонент.

Метод головних компонент дозволяє зменшити розмірності даних, втративши найменшу кількість інформації. Обчислення основних компонент може бути зведено до обчислення сингулярного розкладання матриці даних або обчислення власних векторів коваріаційної матриці. Стосовно вібраційної діагностики формалізація використання методу головних компонент виглядає як побудова ортогонального перетворення координат заданої багатовимірної випадкової величини, в результаті якого кореляції між окремими координатами звернуться в нуль.

За допомогою методу головних компонент можна прибрати шум вібраційного сигналу припускаючи, що дисперсія шуму мала в порівнянні з дисперсією корисного сигналу. Після перетворення вхідної діагностичної інформації аналізованим методом значення шумів будуть дуже малі. Для вибору основних компонент встановлюється поріг дисперсії, і вибирають кількість компонент, які генерують сукупну суму дисперсій, розташованих якомога ближче до цього порога. Аналіз головних компонент полягає у обчисленні основних компонент та їх використання для зміни структури вхідної інформації, застосовуючи кілька основних компонент з ігноруванням інших ітерацій. При цьому відбувається перетворення вихідних змінних на набір нових некорельованих змінних, які називаються головними компонентами. У статистиці аналіз головних компонент є статистичною процедурою підсумовування інформаційного змісту у великі таблиці даних за допомогою меншого набору нових змінних зведених параметрів, які легше візуалізувати та аналізувати. Сигнали на виході систем діагностики характеризуються різними амплітудами, частотами, періодами виникнення, енергією, щільністю, інтенсивністю дисперсією, тобто. є цифровими. Їх характеризує великий обсяг інформації. Цифрові сигнали виходять з урахуванням чисельних методів і цифрових комп'ютерних технологій.

Завдяки розвитку методу головних компонент з'являються нові можливості виділення слабких корисних сигналів навіть коли їхня амплітуда

значно нижча за рівень шуму.

Метод головних компонент [60] апроксимує n -мірного хмарного нагляду до m -мірного еліпсоїду, піввісі якого будуть основними компонентами. Метод головних компонент застосовується до даних, записаних у вигляді матриці X чисел. Для підготовки даних вибірку центрують, змістив її так щоб середнє значення ознак дорівнювало нулю. У цьому випадку матриця вхідних даних X перетворюється на матрицю нормалізованих центрованих величин Y . Практично метод починається з вирішення задачі наближення кінцевої множини точок прямими та площинами. Для кінцевого набору множини векторів $x_1, x_2, \dots, x_m \in R^n$, де R^n – лінійні різноманіття, потрібно знайти таке значення $S_k \subset R^n$ щоб сума квадратів відхилень x_i від S_k була мінімальною [60]

$$\sum_{i=1}^m dist^2(x_i, S_k) \rightarrow \min,$$

де $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$ лінійне різноманіття R^n ;

$dist^2(x_i, S_k)$ – евклідова відстань від точки до лінії.

Лінійні різноманіття визначаються набором основних компонент векторів $\{a_1 \dots a_{k-1}\}$ та вектору a_0 , який визначається мінімізацією S_0 , що виражають наступним рівнянням

$$a_0 = \arg \left(\sum_{i=1}^m dist^2(x_i, S_k) \right) = \arg \min_{a_0 \in R^n} \left(\sum_{i=1}^m |x_i - a_0|^2 \right)$$

Варіаційні визначення середнього значення як точки, яка мінімізує суму квадратів, виражають наступним рівнянням

$$a_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^2$$

Операції знаходження компонент полягають у послідовному використанні наступних положень:

– центрування даних за допомогою обчислення середнього значення x_i

$$x_i := x_i - \bar{X}$$

де символ $:=$ означає рівність за визначенням

– визначення першої головної компоненти

$$a_1 = \arg \min_{|a_1|=1} \left(\sum_{i=1}^m |x_i - a_1(x_i)|^2 \right)$$

– віднімання з прогнозних даних першої головної компоненти

$$x_i := x_i - a_1(a_1, x_i)$$

– визначення другої головної компоненти

$$a_2 = \arg \min_{|a_2|=1} \left(\sum_{i=1}^m |x_i - a_2(a_2, x_i)|^2 \right)$$

– віднімання з прогнозних даних $k - 1$ компоненти

$$x_i := x_i - a_{k-1}(a_{k-1}, x_i)$$

Отримані вектори $a_1 \dots a_{k-1}$ ортонормовані. На кожному підготовчому кроці $2k - 1$ віднімається проекція на попередню головну компоненту

– визначення k -тої головної компоненти

$$a_k = \arg \min_{|a_k|=1} \left(\sum_{i=1}^m |x_i - a_k(a_k, x_i)|^2 \right)$$

Управління діагностичною інформацією пов'язане не тільки із вилученням корисних відомостей про стан матеріалу об'єкта діагностування, а й із використанням форматування та обробки інформації для встановлення цільових функцій визначення чутливості до структурних змін, що відбуваються під час складних умов експлуатації та ПЗР обладнання.

2.4. Модель ймовірнісної динаміки процесів діагностики елементів СЕУ на основі ланцюгів Маркова

Безперебійна робота елементів енергетичного обладнання морських суден залежить від якості діагностики їх технічного стану. Найбільш ефективним методом зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності обладнання є проведення технічного обслуговування, виявлення несправностей і прогнозування параметрів енергетичного обладнання. Це

робить задачі контролю, діагностики та прогнозування параметрів енергетичного обладнання особливо актуальними.

Ланцюги Маркова є інструментом стохастичного моделювання, що реалізує послідовність подій з кінцевим числом прогнозованих результатів. Особливістю ланцюгів Маркова є те, що ймовірність отримання кожного можливого прогнозованого стану не визначається минулими змінами і сума вхідних умовних ймовірностей у графічній інтерпретації процесу прогнозування відмов дорівнює сумі вхідних дуг (рис. 2.4) [61].

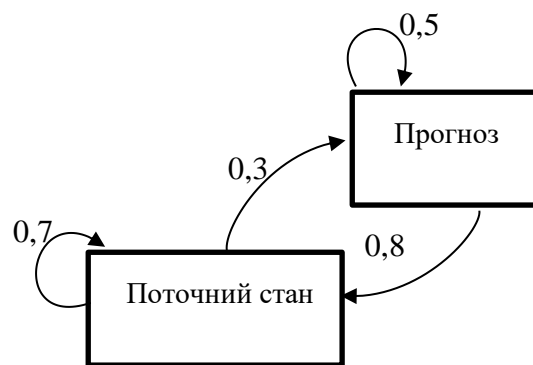


Рис. 2.4 – Ланцюги Маркова з двома станами об'єктів

Розподіл ймовірностей переходів подаються у вигляді матриці, рядки та стовпці, якої в сумі дають одиницю. Для визначення ймовірності переходу з одного стану в інший за кілька кроків необхідно зведення матриці переходів в цю ступень. Ланцюги Маркова характеризують стохастичний процес, в якому умовний розподіл ймовірностей майбутніх станів залежить тільки від поточного стану процесу. Ланцюги Маркова дозволяють удосконалити механізм прийняття рішень, діагностики та прогнозування ситуації на різних рівнях процесів [59]. Використання інформаційних технологій для оцінки придатності підприємств до інноваційних перетворень з використанням ланцюгів Маркова представлено в роботі [61]. Інформаційна підтримка управління складними організаційно-технічними об'єктами на основі ланцюгів Маркова представлена в [62]. Моделі Марковських процесів

логічних переходів з урахуванням ймовірнісних оцінок наведені в [63]. Зв'язок між управлінням і людським фактором в математичних моделях складних систем на основі ланцюгів Маркова наведено в [64]. В [65] досліджено можливість перевірки асимптотичного розподілу ймовірностей переходу Марковської послідовності параметричного сімейства. В [66, 67] описано стохастичне перехоплення з використанням фільтрації та згладжування, в [68] описано стохастичне оцінювання ефективності транспортування матеріалів. Модель стохастичної оптимізації на основі сценаріїв описана в [69]. Інформаційно-ентропійну модель прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності представлено в [70], аналіз затримки при побудові ієрархії байєсівських мереж описано в [71]. Використання інформаційних технологій для ідентифікації параметрів невизначеності в статистичних оцінках представлено в [72]. Математичне забезпечення для виключення впливу людського фактору на системи навігаційного обладнання в умовах невизначеності та ризику представлено в роботах [73]. Кількісна оцінка прогнозів невизначеності представлена в [74], в [75] наведено огляд характеристик механічних випробувань. Матриця пунктів відправлення та призначення на основі ланцюгів Маркова представлена в [76]. Інтелектуальна зарядка електромобілів, що з'єднуються, в умовах невизначеності поведінки водія показана в [77]. Застосування методу Монте-Карло при побудові ланцюгів Маркова описано в [78, 79]. Цей огляд показує, що практичне застосування ланцюгів Маркова є широким і різноманітним. Окремі фрагменти представленого досвіду були використані для розробки методології дослідження.

Як бачимо з наведеного огляду, ланцюги Маркова мають специфічні застосування, що характеризуються загальною методологією зміни динаміки ймовірностей у відповідних областях. Однак характерні особливості процесу діагностичного та прогнозного моделювання елементів СТЗ не дозволяють повною мірою використовувати і передавати накопичений досвід розв'язання слабо структурованих задач. Це пов'язано з необхідністю переходу від

дискретного часу функціонування транспортних засобів до безперервної послідовності станів, що характеризуються інтервалами в процесі діагностування. У цьому контексті важлива побудова матриць ймовірностей переходів та відповідних орієнтованих графів, спрямованих на ранжування елементів СТЗ з точки зору їх відмов під час експлуатації [80].

У дослідженні використовувалися діагностичні параметри елементів турбокомпресора, таких як корпус, компресор, турбіна, ущільнення, ротор, підшипники, масляні насоси, а також ймовірнісні оцінки їх відмов. Ці оцінки були отримані на основі великого статистичного масиву даних про експлуатацію судна в умовах невизначених зовнішніх впливів. В якості методу дослідження були використані Марковські ланцюги [61].

У контексті діагностування та прогнозування в умовах невизначених зовнішніх впливів, що характеризуються елементами випадковості, метою Марковських ланцюгів є пошук комбінації характеристик і параметрів, які покращують механізми діагностування та прийняття рішень у наочній формі. Якщо система переходить з одного стану в інший через задані проміжки часу з накопиченням відповідних інформаційних ресурсів, то вона являє собою дискретний послідовний Марковський процес. Вхідна інформація про відмови елементів турбокомпресора в термінах умовних ймовірностей представлена в таблиці 2.2 [61].

Таблиця 2.2 – Поточний стан системи діагностики елементів
турбокомпресора

№	Контрольований параметр	Вагове співвідношення	Позначення
1	Корпус	0,090	v_1
2	Компресор	0,005	v_2
3	Турбіна	0,048	v_3
4	Ущільнення	0,167	v_4
5	Ротор	0,152	v_5
6	Підшипник	0,438	v_6
7	Масляні насоси	0,1	v_7

Ланцюги Маркова дозволяють генерувати події. Технічні рішення для оцінки послідовності застосування діагностичних процедур конкретних елементів турбокомпресорів СЕУ в рамках теорії Маркова постулюють вибір найкращої альтернативи, вибір якої може бути полегшений за допомогою апарату теорії ймовірностей.

Надійність обладнання - це комплексна властивість, яка характеризує його здатність виконувати задані функції зі збереженням своїх характеристик в конкретних умовах експлуатації у встановлених межах або протягом заданого періоду часу. Ланцюги Маркова використовуються як математична модель для дослідження поведінки певних стохастичних систем.

При моделюванні складних технічних об'єктів важливим аспектом є представлення структури взаємодій і переходів. Незалежні випробування є окремим випадком ланцюгів Маркова. Події розглядаються як стани системи, а самі випробування представляють зміни стану системи.

Ймовірності переходів P_{ji} не залежать від моменту часу, а залежать лише від j та i [64]

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix},$$

де $0 \leq P_{ji} \leq 1 \quad \sum_{i=1}^n P_{ji} = 1$

n — кількість компонент системи.

Ланцюг Маркова називається однорідним, якщо ймовірність переходу P_{ji} системи зі стану i в стан j не залежить від номера випробування. Ймовірність P_{ji} називається перехідною ймовірністю.

Ймовірність того, що $P_{ji}(n)$ можна знайти за допомогою формули, відомої як рівність Маркова:

$$P_{ji}(n) = \sum P(m)P(n-m),$$

де m — кількість кроків, за які система діагностики може перейти зі стану i до стану j .

Будь-який стан S_j можна досягти з будь-якого іншого стану за скінченну кількість переходів. Ймовірність переходу з одного стану в інший однакова незалежно від кількості проміжних станів, через які потрібно пройти, щоб досягти наміченої мети.

Характерною особливістю моделювання інтелектуальної підтримки діагностики елементів СЕУ є те, що умовна ймовірність $P_{ji}(S)$ не залежить від поточного стану, тобто

$$P_{ji}(S) = P_{ji},$$

де i - номер попереднього стану;

j - номер наступного стану.

Ймовірності переходів можуть бути представлені наступним рівнянням

$$P(x_0 = S) = q_0(S) \forall S \in E,$$

де \forall - універсальний квантор;

S - дискретні стани;

q_0 - ймовірність знаходження системи стану в момент часу $t_0 = 0$;

x_0 - точка відліку.

Змінна E представляє скінченну кількість станів

$$E = \{e_1, e_2 \dots e_n\}$$

Ймовірність переходу системи між станами виражається через етапи діагностування

$$P(x_{n+1} = S_{n+1} | x_n = S_n) = P(S_n, S_{n+1}) \forall (S_{n+1}, S_n)$$

Використання ланцюгів Маркова для визначення процесів діагностування елементів турбокомпресорів базується на наступних принципах. Система діагностування функціонує в станах $S_1, S_2 \dots S_n$. Переходи можливі лише в моменти часу, що відповідають етапам діагностики, які розглядаються як кроки. Аргументом ланцюга Маркова є номер кроку.

У будь-який момент часу ланцюг Маркова можна охарактеризувати рядками матриці ймовірностей переходів. Помноживши вектор-рядок, що описує розподіл ймовірностей на певному етапі діагностики, на матрицю

ймовірностей переходу, отримаємо розподіл ймовірностей на наступному етапі на різних рівнях діагностики та прогнозування [61].

Запропоновано концептуальну модель інтелектуальної діагностики з використанням Марковських ланцюгів, яка відображена у вигляді окремих структурних блоків (рис. 2.5).



Рис. 2.5 – Модель ймовірнісної динаміки процесів діагностики елементів СЕУ на основі ланцюгів Маркова

Формалізація основних заходів з розробки інтелектуального програмного забезпечення для діагностики елементів суднових енергетичних установок, яка представлена на рис. 2.5, дозволила встановити ступінь достовірності взаємозв'язків між окремими характеристиками системи діагностування. Це слугує основою для прогнозування відмов елементів суднової енергетичної установки до і після процесу діагностування.

Ключовою особливістю представленої моделі є врахування можливих відхилень від нормального функціонування елементів турбокомпресорів СЕУ

та узгодженого рівня ризику при прийнятті управлінських рішень щодо їх подальшої експлуатації в складних умовах.

Вибравши надійність і придатність до експлуатації, як основні параметри для діагностування елементів турбокомпресорів суднових енергетичних установок, з точки зору, ймовірності їх відмов, можна побудувати матрицю перехідних ймовірностей (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Умовні ймовірності процесу діагностики елементів турбокомпресору

Елемент	Корпус	Компресор	Турбіна	Ущільнення	Ротор	Підшипник	Масляні насоси
Корпус	0,09	0,005	0,048	0,167	0,152	0,438	0,1
Компресор	0,09	0,008	0,051	0,15	0,18	0,431	0,09
Турбіна	0,08	0,006	0,068	0,169	0,151	0,446	0,08
Ущільнення	0,08	0,007	0,054	0,152	0,163	0,474	0,07
Ротор	0,07	0,005	0,062	0,141	0,172	0,44	0,11
Підшипник	0,09	0,007	0,056	0,15	0,166	0,421	0,11
Масляні насоси	0,08	0,006	0,064	0,159	0,161	0,43	0,1

Згідно з табл. 2.2 і 2.3, система діагностики може перебувати в одному з семи станів. Якщо елементи СЕУ працюють в умовах екстремальних навантажень, то ймовірність відмови корпусу турбокомпресора, згідно з таблицею 2,3, становитиме 0,09. Ймовірність відмови компресору складає 0,005, турбіни – 0,048, ущільнення – 0,167, ротору – 0,152, підшипника – 0,438, масляного насосу – 0,101.

Якщо в процесі експлуатації виникають аварійні зміни в роботі обладнання, то стан системи діагностування буде характеризуватися другим рядком матриці переходів. Тому ймовірність відмов корпусу залишається на тому ж рівні 0,09. Однак ймовірність відмови компресору зростає до 0,008, турбіни - до 0,051, ущільнення - до 0,18, підшипника - до 0,431. Ймовірність

відмови масляного насосу зменшується до 0,09.

Аналогічні перетворення умовних ймовірностей можуть відбуватися в процесі діагностики через інші рядки матриці переходів на наступних етапах пріоритетного використання діагностичних параметрів.

Якщо помножити вектор розподілу ймовірностей початкового стану на матрицю перехідних ймовірностей, то отримаємо розподіл ймовірностей для наступного етапу діагностування. Ймовірність $P(1)$ переходу системи діагностування зі стану S_0 в стан S_1 на першому кроці буде дорівнювати

$$P(1) = (0,09 \ 0,005 \ 0,048 \ 0,167 \ 0,152 \ 0,438 \ 0,1) \times \begin{pmatrix} 0,09 & 0,005 & 0,048 & 0,167 & 0,152 & 0,438 & 0,1 \\ 0,09 & 0,008 & 0,051 & 0,15 & 0,18 & 0,431 & 0,09 \\ 0,08 & 0,006 & 0,068 & 0,169 & 0,151 & 0,446 & 0,08 \\ 0,08 & 0,007 & 0,054 & 0,152 & 0,163 & 0,474 & 0,07 \\ 0,07 & 0,005 & 0,062 & 0,141 & 0,172 & 0,44 & 0,11 \\ 0,09 & 0,007 & 0,056 & 0,15 & 0,166 & 0,421 & 0,11 \\ 0,08 & 0,006 & 0,064 & 0,159 & 0,161 & 0,43 & 0,1 \end{pmatrix} =$$

$$= (0,076115 \ 0,005932 \ 0,0530915 \ 0,138106 \ 0,150879 \ 0,3990015 \ 0,091375)$$

Ймовірність $P(2)$ того, що на другому кроці система діагностування перейде в стан S_2 під впливом постійних змін умов експлуатації та впливу зовнішнього середовища буде дорівнювати

$$P(2) = (0,076 \ 0,0059 \ 0,0531 \ 0,138 \ 0,151 \ 0,399 \ 0,091) \times \begin{pmatrix} 0,09 & 0,005 & 0,048 & 0,167 & 0,152 & 0,438 & 0,1 \\ 0,09 & 0,008 & 0,051 & 0,15 & 0,18 & 0,431 & 0,09 \\ 0,08 & 0,006 & 0,068 & 0,169 & 0,151 & 0,446 & 0,08 \\ 0,08 & 0,007 & 0,054 & 0,152 & 0,163 & 0,474 & 0,07 \\ 0,07 & 0,005 & 0,062 & 0,141 & 0,172 & 0,44 & 0,11 \\ 0,09 & 0,007 & 0,056 & 0,15 & 0,166 & 0,421 & 0,11 \\ 0,08 & 0,006 & 0,064 & 0,159 & 0,161 & 0,43 & 0,1 \end{pmatrix} =$$

$$= (0,07646161 \ 0,005808971 \ 0,052570518 \ 0,13921821 \ 0,150061988 \ 0,398693323 \ 0,09168438)$$

В умовах нестабільної роботи турбокомпресорів СЕУ, екстремальних впливів навколишнього середовища та змінних навантажень ймовірність $P(3)$ переходу системи діагностування зі стану S_2 в стан S_3 дорівнює

$$P(3)=(0,076 \ 0,0058 \ 0,0525 \ 0,139 \ 0,1501 \ 0,398 \ 0,0916) \times \begin{vmatrix} 0,09 & 0,005 & 0,048 & 0,167 & 0,152 & 0,438 & 0,1 \\ 0,09 & 0,008 & 0,051 & 0,15 & 0,18 & 0,431 & 0,09 \\ 0,08 & 0,006 & 0,068 & 0,169 & 0,151 & 0,446 & 0,08 \\ 0,08 & 0,007 & 0,054 & 0,152 & 0,163 & 0,474 & 0,07 \\ 0,07 & 0,005 & 0,062 & 0,141 & 0,172 & 0,44 & 0,11 \\ 0,09 & 0,007 & 0,056 & 0,15 & 0,166 & 0,421 & 0,11 \\ 0,08 & 0,006 & 0,064 & 0,159 & 0,161 & 0,43 & 0,1 \end{vmatrix} =$$

$$= (0,07646861 \ 0,005809975 \ 0,052557234 \ 0,13922596 \ 0,15005277 \ 0,398729431 \ 0,09165102)$$

Ймовірність $P(4)$ переходу системи діагностування зі стану S_3 у стан S_4 дорівнює

$$P(4)=(0,0765 \ 0,0058 \ 0,0525 \ 0,1392 \ 0,15005 \ 0,3987 \ 0,0916) \times \begin{vmatrix} 0,09 & 0,005 & 0,048 & 0,167 & 0,152 & 0,438 & 0,1 \\ 0,09 & 0,008 & 0,051 & 0,15 & 0,18 & 0,431 & 0,09 \\ 0,08 & 0,006 & 0,068 & 0,169 & 0,151 & 0,446 & 0,08 \\ 0,08 & 0,007 & 0,054 & 0,152 & 0,163 & 0,474 & 0,07 \\ 0,07 & 0,005 & 0,062 & 0,141 & 0,172 & 0,44 & 0,11 \\ 0,09 & 0,007 & 0,056 & 0,15 & 0,166 & 0,421 & 0,11 \\ 0,08 & 0,006 & 0,064 & 0,159 & 0,161 & 0,43 & 0,1 \end{vmatrix} =$$

$$= (0,07646882 \ 0,005809998 \ 0,052556461 \ 0,13922503 \ 0,150052307 \ 0,398727454 \ 0,09165093)$$

Ймовірність $P(5)$ переходу системи діагностування зі стану S_4 заявити S_5 дорівнює

$$P(5)=(0,0765 \ 0,00581 \ 0,0525 \ 0,1392 \ 0,15005 \ 0,3987 \ 0,0916) \times \begin{vmatrix} 0,09 & 0,005 & 0,048 & 0,167 & 0,152 & 0,438 & 0,1 \\ 0,09 & 0,008 & 0,051 & 0,15 & 0,18 & 0,431 & 0,09 \\ 0,08 & 0,006 & 0,068 & 0,169 & 0,151 & 0,446 & 0,08 \\ 0,08 & 0,007 & 0,054 & 0,152 & 0,163 & 0,474 & 0,07 \\ 0,07 & 0,005 & 0,062 & 0,141 & 0,172 & 0,44 & 0,11 \\ 0,09 & 0,007 & 0,056 & 0,15 & 0,166 & 0,421 & 0,11 \\ 0,08 & 0,006 & 0,064 & 0,159 & 0,161 & 0,43 & 0,1 \end{vmatrix} =$$

$$= (0,07646857 \ 0,00580998 \ 0,052556268 \ 0,139224552 \ 0,150051843 \ 0,398726167 \ 0,09165062)$$

Ймовірність $P(6)$ переходу системи діагностування зі стану S_5 у стан S_6 дорівнює

$$P(6)=(0,0765 \ 0,0058 \ 0,0525 \ 0,1392 \ 0,15005 \ 0,3987 \ 0,0916) \times \begin{vmatrix} 0,09 & 0,005 & 0,048 & 0,167 & 0,152 & 0,438 & 0,1 \\ 0,09 & 0,008 & 0,051 & 0,15 & 0,18 & 0,431 & 0,09 \\ 0,08 & 0,006 & 0,068 & 0,169 & 0,151 & 0,446 & 0,08 \\ 0,08 & 0,007 & 0,054 & 0,152 & 0,163 & 0,474 & 0,07 \\ 0,07 & 0,005 & 0,062 & 0,141 & 0,172 & 0,44 & 0,11 \\ 0,09 & 0,007 & 0,056 & 0,15 & 0,166 & 0,421 & 0,11 \\ 0,08 & 0,006 & 0,064 & 0,159 & 0,161 & 0,43 & 0,1 \end{vmatrix} =$$

$$= (0,07646824 \ 0,005809953 \ 0,052556045 \ 0,139223959 \ 0,150051162 \ 0,398724401 \ 0,09165024)$$

Ймовірність $P(7)$ переходу системи діагностування зі стану S_6 у стану S_7 дорівнює

$$P(7) = (0,076 \ 0,0058 \ 0,0525 \ 0,1392 \ 0,15005 \ 0,3987 \ 0,0916) \times \begin{vmatrix} 0,09 & 0,05 & 0,048 & 0,167 & 0,152 & 0,438 & 0,1 \\ 0,05 & 0,008 & 0,051 & 0,15 & 0,18 & 0,431 & 0,09 \\ 0,08 & 0,006 & 0,068 & 0,0169 & 0,161 & 0,436 & 0,08 \\ 0,08 & 0,007 & 0,054 & 0,0152 & 0,153 & 0,421 & 0,07 \\ 0,07 & 0,005 & 0,062 & 0,141 & 0,172 & 0,44 & 0,11 \\ 0,09 & 0,007 & 0,052 & 0,15 & 0,166 & 0,421 & 0,11 \\ 0,08 & 0,006 & 0,064 & 0,159 & 0,161 & 0,43 & 0,1 \end{vmatrix} =$$

$$= (0,07646798 \ 0,005809932 \ 0,052555879 \ 0,139223507 \ 0,150050667 \ 0,398723085 \ 0,09164995)$$

Загальна ймовірність системи діагностики та прогнозування турбокомпресорів СЕУ може бути представлена у вигляді системи нерівностей, з якої видно, що ймовірність виникнення відмов і нездатності системи їх виявити зменшується на кожному кроці:

$$P(1) > P(2) > P(3) > P(4) > P(5) > P(6) > P(7).$$

При прийнятті управлінських рішень щодо впровадження інтелектуального програмного забезпечення для діагностики та прогнозування елементів СЕУ єдиною безпомилковою оцінкою є оцінка поточної ситуації щодо стану елементів турбокомпресора суднової енергетичної установки. На результати ТД впливають численні фактори, деякі з яких важко врахувати і які можна представити у вигляді асоціативних ймовірностей.

Ймовірність обраного стану в наступному часовому інтервалі, позначена як P_{ij} , буде визначатися на основі існуючої ситуації без їх одночасності. Об'єднавши всі ймовірності переходу з цих станів, отримаємо матрицю ймовірностей, візуалізація якої може бути відображена у вигляді орієнтованого графа або мережевої діаграми [61].

Кожен перехід зі стану i в стан j характеризується ймовірністю переходу, яка показує, як часто система буде переходити зі стану i в стан j . Якщо виміряти частоти переходів за досить тривалий період часу, то вони будуть збігатися з ймовірностями переходів.

Для реалізації запропонованої концептуальної моделі інтелектуального

програмного забезпечення для діагностики елементів СЕУ з використанням ланцюгів Маркова була створена імітаційна модель у вигляді орієнтованого графа або мережевої діаграми.

В орієнтованому графі вершини представляють стани процесу, а ребра - переходи між ними. Гнучкість імітаційної моделі, реалізованої за допомогою орієнтованого графа, полягає в її адаптивності до зовнішнього середовища, в якому експлуатуються діагностичні об'єкти. Ключовими факторами імітаційних моделей є вхідні змінні, які визначаються реакціями на зовнішні збурення. Оскільки граф є орієнтованим, то з кожного стану неможливо перейти в інший, коли кожен стан має свою ймовірність. Перехід від одного вузла до іншого може відбуватися через випадковий інтервал часу. Пропонується розглядати номер кроку як аргумент, що визначає процес, а не час. У цьому випадку випадковий процес буде характеризуватися послідовністю станів.

Коли відомий початковий розподіл ймовірностей і матриця перехідних ймовірностей, загальна ймовірнісна динаміка процесу може бути визначена і розрахована циклічно.

Як приклад побудови ланцюгового орграфа Маркова, що відображає моделювання інтелектуальних систем діагностики СЕУ з використанням ланцюгів Маркова, були обрані стани, виходячи з пріоритетності розміщення параметрів, що характеризуються найбільш значущими ймовірностями відмов. До таких параметрів належать підшипники, ущільнення, ротор, масляні насоси, корпус, турбіна та компресор. Переходи між цими станами представлені у вигляді ребер або дуг компонентів орграфа.

Ваги ребер, які виражені в термінах емпірично визначених ймовірностей, базуються на узагальненні інформації, опублікованої в статистичних збірниках. На основі проведених розрахунків визначається пріоритетність, основний зміст, методологія та рівень діагностичного процесу. Розробляється покроковий план, формуються стратегії та мобілізуються необхідні ресурси.

Метою використання ланцюгів Маркова є пошук такої комбінації характеристик і параметрів системи діагностики, яка дозволяє у кількісній та візуальній формах удосконалити механізм діагностики та процес прийняття рішень. Ланцюги Маркова у своєму формалізованому описі є ланцюжком взаємопов'язаних безперервних і цілих подій з'єднаних між собою імовірнісними переходами. Стан переходів, які має займати система, взаємовиключні. У нашому випадку це елементи СЕУ, де найчастіше спостерігаються відмови.

Візуалізація ланцюгів Маркова в скінчено вимірному просторі станів для моделювання інтелектуального діагностування елементів турбокомпресора СЕУ з використанням ланцюгів Маркова представлена на рис. 2.6 [61].

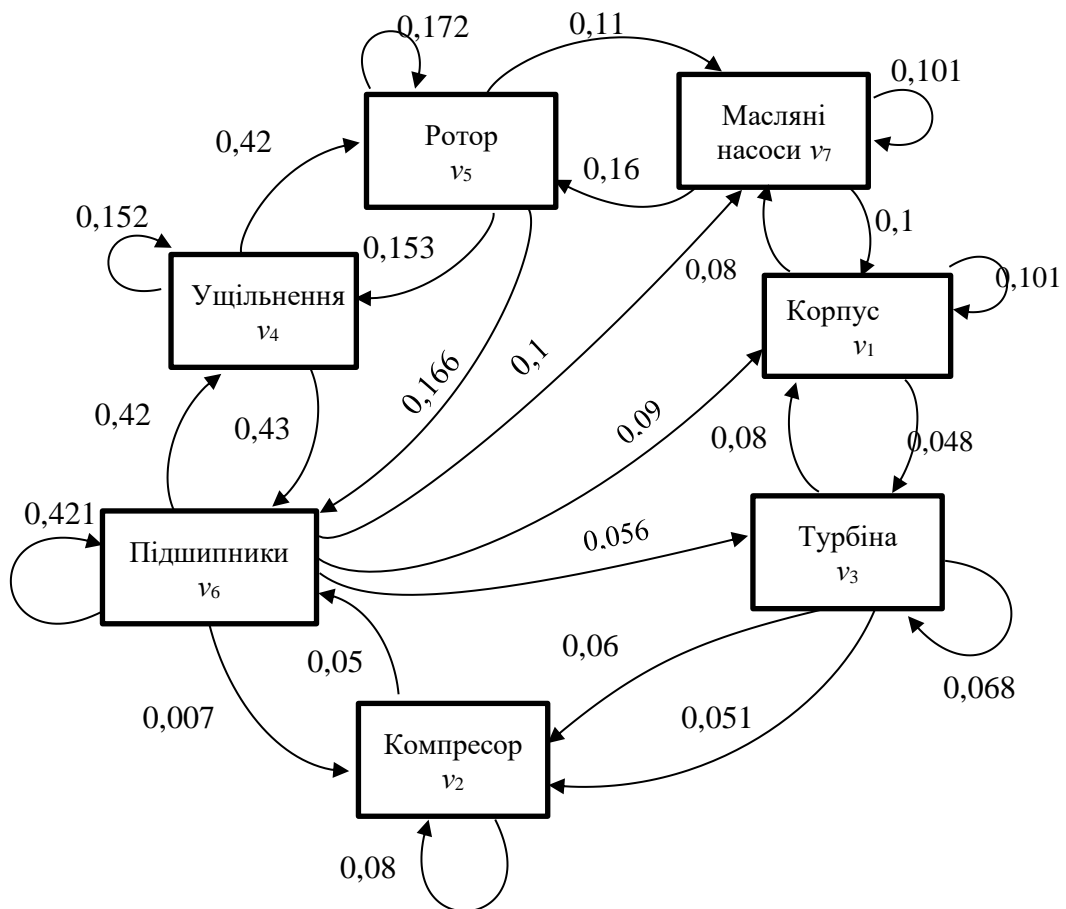


Рис. 2.6 – Орієнтований граф ланцюгів Маркова для діагностики елементів турбокомпресора

Перевагою концептуальної моделі інтелектуального забезпечення діагностики елементів СЕУ на основі ланцюгів Маркова є можливість налаштування системи під будь-яку інформаційну ситуацію. Можна змінювати пріоритет першого контрольованого елемента, яким в нашій схемі є підшипник, і послідовність наступних кроків. Це надає можливість удосконалення механізму діагностики.

Висновки до II розділу

1. Необхідність інтелектуального забезпечення діагностики технічного стану СТЗ під час експлуатації пов'язана з тим, що невизначеність характеризується величиною навантажень при експлуатації складних конструкцій, що ускладнюють використання існуючої інформації. Прогнозування та видача висновків про результати технічної діагностики, так само як оцінка ЗР, є найбільш уразливою ланкою технічного обслуговування. Виконано синтез математичних моделей технічного стану елементів СЕУ, в основі якого покладено загальний принцип перетворення деградації структури у фіксований сигнал різної природи походження. Вивчено їх застосування для вирішення завдань моніторингу в реальному часі. Встановлено, що для моніторингу технічного стану СТЗ слід використовувати сукупність кількох видів моделей, що відрізняються деталізацією їх змін. Вибір механізмів моделювання здійснюється шляхом аналізу переваг та недоліків властивостей розглянутим моделям. Моделювання ЗР транспортних пристроїв може бути виконане шляхом створення інтерактивних моделей, що передбачають діалог з користувачем.

2. Надано потенційні можливості отримання достовірної та актуальної інформації про робочі процеси експлуатації СТЗ у цифровій формі. Показано, що цифровізація ТД базується на складних взаємозв'язках інформаційних та комунікаційних елементів, які засновані на моніторингу та обробці великого масиву експериментальних даних цифрового простору з використанням

цифрових двійників, що дозволяє значно зменшити кількість натурних випробувань, вибрати оптимальну стратегію цифрової трансформації, відстежувати цифрові тренди та знаходити технологічні рішення щодо пошуку нових інформаційних параметрів ТД. Вивчення цифрових трендів та їх використання в діагностики зміни експлуатаційних властивостей СТЗ є основою запобіжних заходів та повідомлень про небезпеку, що насувається.

3. Призначення управління діагностичної інформації у тому, що різноманіття різних розмірностей діагностичних ознак призводить до необхідності їх злиття в єдиний узагальнений показник без втрати вхідної інформації. Для цього в роботі використано метод головних компонент. Обчислення головних компонент зводиться до обчислення сингулярного розкладання матриці даних і обчислення власних векторів коваріаційної матриці. За допомогою головних компонент можна прибрати шум вібраційного сигналу, оскільки дисперсія шуму мала в порівнянні з дисперсією корисного сигналу. Після перетворення вхідний діагностичної інформації значення шумів будуть дуже малі. На прикладі методу головних компонент розвинена методологія управління діагностичною інформацією, яка представляє собою статистичну процедуру використання інформаційного змісту даних за допомогою меншого набору нових змінних.

4. Розроблено інтелектуальну модель ймовірнісної динаміки в процесі діагностики елементів СЕУ на основі ланцюгів Маркова. Новизною моделі є заміна дискретних часових інтервалів процесу діагностики послідовністю станів технічних об'єктів. У такій постановці Марковські ланцюги є інструментом теорії випадкових процесів, які складаються з послідовності станів, причому зв'язки між її вузлами послідовності створюються лише за умови, що ці стани знаходяться поруч строго один з одним, що акумулює різноманітні фактори. Наведено результати розрахунків перехідних матриць та побудови орграфа дозволяють досліджувати кінетику ймовірнісної динаміки. Відмінною особливістю представленого орграфа є її адаптивність до впливів зовнішнього середовища.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЙМОВІРНІСНИХ ТА СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІАГНОСТИКИ ВІДМОВ СУДНОВИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

3.1. Інтелектуальна система діагностики експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання

Сучасні системи технічної діагностики, які використовують на практиці транспортних перевезень, відносяться до складних об'єктів, що характеризуються при їх поодинокому використанні високими показниками ризику та невизначеності, внаслідок сильного впливу навколишнього середовища, тому для підвищення надійності та достовірності висновків використовують цілий комплекс вимірювань різними методами. Методи діагностування дозволяють виявляти поступові відмови технологічного обладнання, визначати зношування та ЗР, проводити моніторинг змін станів контрольованих об'єктів у період міжремонтних циклів. Разом з тим системи діагностування дозволяють визначати лише інформацію, що знімається з датчиків, виконавчих пристроїв, контролерів. Математичні моделі, що описують діагностики технічного стану, дозволяють детально описувати внутрішні та зовнішні характеристики процесів взаємодії експлуатаційних та інформаційних факторів.

Побудова інтелектуальних систем діагностики, повинно здійснювати комплексну технологію діагностики відмов під час технічної експлуатації та обслуговування суднових транспортних засобів, що дають оперативну, максимально об'єктивну інформацію про об'єкт діагностування, є важливим науково-технічним завданням.

Інструментарій інтелектуальної системи експлуатаційних властивостей елементів СЕУ покликаний забезпечити комплекс взаємодій інформаційних технологій від розробників до користувача та баз даних. Це дозволяє

забезпечити розуміння причин зародження дефектів під час експлуатації, зниження ризиків, які можуть виникати через збої нормальної експлуатації, онлайн-платформ та додатків. Крім цього забезпечується діагностика за рахунок оптимізації характеристик багатокомпонентних вібраційних сигналів, зниження рівня помилок шляхом впровадження нових діагностичних параметрів та прогнозування розвитку несправностей при оцінці ЗР [81].

Підставою прийняття рішень про можливість подальшої експлуатації устаткування є результати оцінки ЗР [82-84]. ЗР – це сумарне напрацювання об'єкта від контролю його технічного стану до граничного стану. У цьому сенсі під граничним станом устаткування розуміють стан, у якому подальша експлуатація устаткування недоцільна [62, 85, 86]. Якщо технічним регламентом не встановлені норми оцінки відповідності вимогам до контрольованого об'єкту, він підлягає експертному оцінюванню. При перевищенні кількості циклів навантажень проведення розрахунку ЗР та прогнозного стану обладнання входить в експертизу виробничої безпеки [7, 54]. Коли технічною документацією обладнання встановлено нормативний термін безвідмовної експлуатації, його можна продовжити провівши розрахунок ЗР [70, 87].

Оцінки невизначеності у системах діагностики відображено у [63,79, 88-91]. Елементи побудови інтелектуальних систем ТД з використанням ланцюгів Маркова та ймовірнісної динаміки відмов відображені у роботах [66, 74]. Частотно-часова відмова терміну служби підшипників представлена в [90]. У [91] розглянуто вібраційні характеристики та наведено класифікацію дефектів, на основі якої обґрунтовано використання конкретних методів віброаналізу. На основі узагальнення досвіду експлуатації елементів суднових транспортних засобів, розроблено систему технічної експлуатації суднових транспортних засобів [92]. Огляд цитованих джерел вказує на неослабний інтерес до проблеми інтелектуалізації діагностики та прогнозування експлуатаційних властивостей конструкцій у

процесі їх експлуатації, що виключає або принаймні знижує суб'єктивізм оцінок технічного стану.

В якості матеріалу дослідження використовувалися параметри діагностики турбонагнітачів: корпусу, компресора, турбіни, ущільнень, ротора, підшипників, масляних насосів, а також ймовірнісні оцінки їх відмов, отримані на основі великого статистичного матеріалу. В якості методів дослідження використовувалися ланцюги Маркова та елементи ймовірнісної динаміки, обчислення за ймовірнісними моделями, багатокритеріальної оптимізації діагностичних параметрів, симуляції та генерації сценаріїв. Оцінки та ПЗР в умовах відсутності інформації про пікові та екстремальні навантаження на обладнання в період міжремонтних циклів у процесі експлуатації виробів відчують при своєму використанні ряд обмежень і не точностей оцінок, викликаних динамічними змінами довкілля та стохастичністю процесів, тобто має місце ситуація ризику.

Запропонована ІСД та прогнозування експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання у вигляді окремих структурних блоків (рис. 3.1) [93].

Виконання діагностичних робіт на транспорті визначається технічними умовами та нормативами. Початковий блок наданої інтелектуальної системи (рис. 3.1) пов'язаний із аналізом вхідної інформації, технічної та конструкторської документації, визначенням інтервалів діагностики за регламентом.

Наступним базовим блоком представленої інтелектуальної системи діагностики ІСД та прогнозування експлуатаційних властивостей СТЗ, які працюють у складних умовах змінних навантажень, температур, вологості, тисків у короткостроковому терміні їх виникнення, врахувати які не можливо, необхідною ланкою прогнозування є пошук відповідальної апріорної інформації щодо статистики відмов головного та допоміжного двигунів і турбонагнітачів, турбіни, ущільнень, ротора, підшипників та масляних насосів в процесі їх експлуатації.

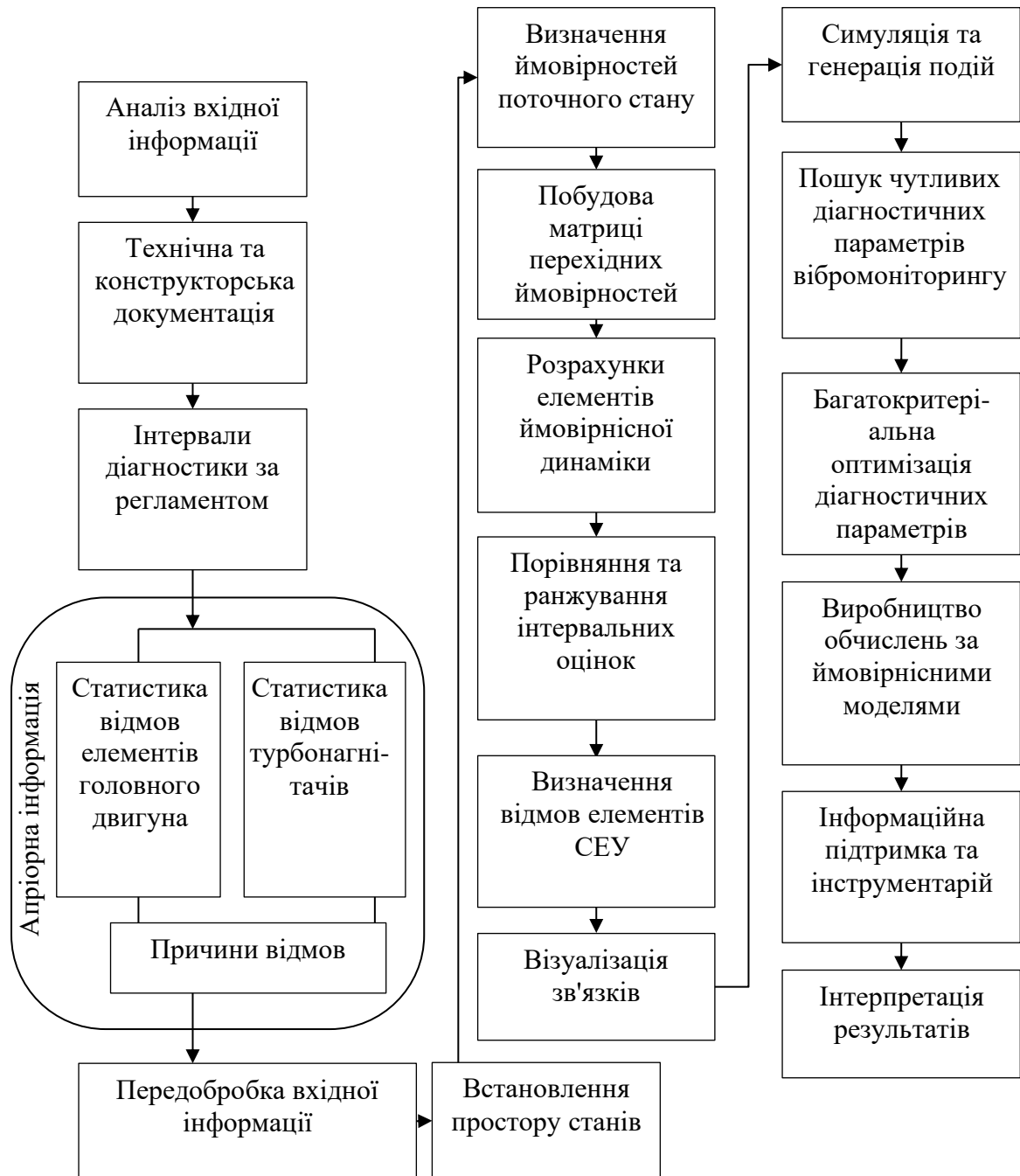


Рис. 3.1 – Інтелектуальна система діагностики та прогнозування експлуатаційних властивостей суднових транспортних засобів

Докладно розглянуто зміст кожного із блоків цієї схеми.

Як показує досвід експлуатації морських суден, основним завданням технічної діагностики є визначення технічного стану головних двигунів та елементів СЕУ. Поперечний розріз двигуна MAN B&W L32/40

представлений на рис. 3.2 [93].

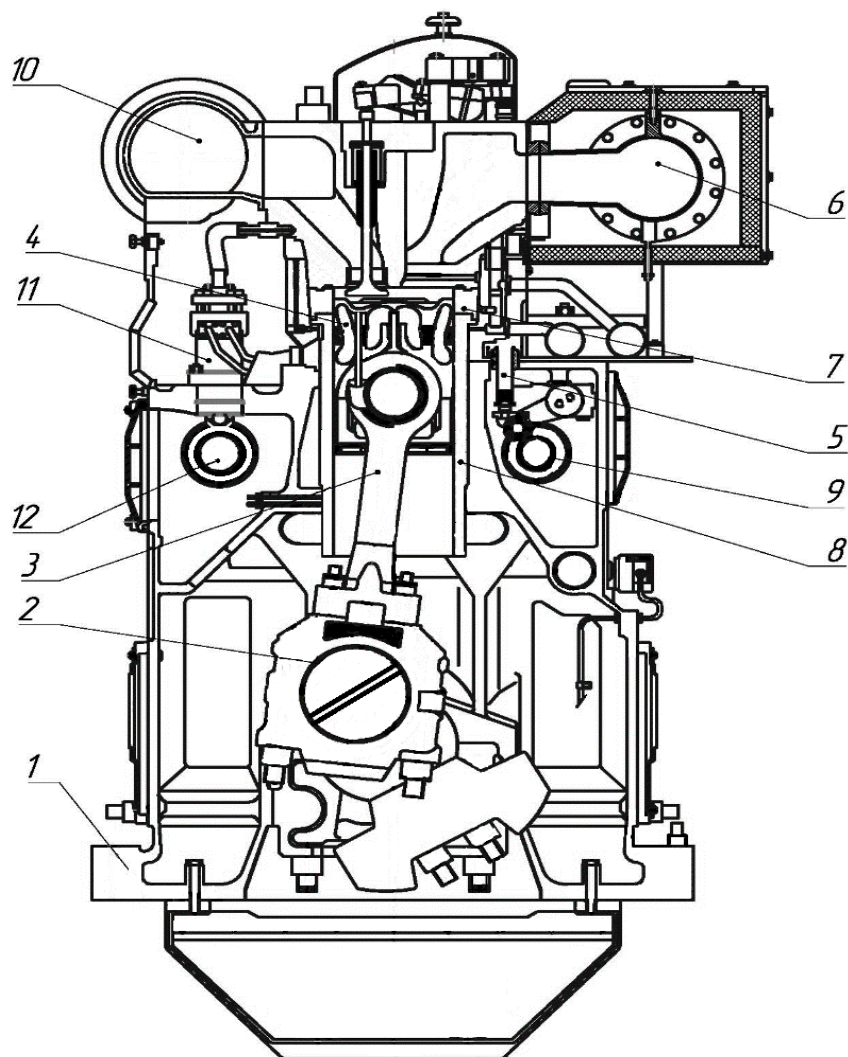


Рис. 3.2 – Поперечний розріз двигуна MAN B&W L32/40 (познач. див. у тексті)

До складу головного двигуна суднової енергетичної установки входять: остов головного двигуна – 1, колінчатий вал – 2, шатун – 3, поршень – 4, газорозподільний механізм – 5, випускний колектор – 6, сорочка охолодження – 7, втулка циліндра – 8, газорозподільний вал – 9, випускний колектор – 10, паливний насос високого тиску – 11, паливорозподільний вал – 12 (рис. 3.2). Крім цього, до складу енергетичної установки входять турбоагнітачі, валопроводи, дизель-генератори, утилізаційні та допоміжні котли, механізми та пристрої.

У таблиці 3.1 наведено дані щодо відносної частоти відмов елементів судових ДВЗ [93].

Таблиця 3.1 – Статистика відносної частоти відмов елементів судових ДВЗ

№ п/п	Вузол ДВС	Відносна частота відмов
1	Втулка циліндра	0,042
2	Кришка циліндра	0,017
3	Клапанний механізм	0,072
4	Привід механізму газорозподілу	0,032
5	Паливний насос	0,090
6	Форсунка	0,105
7	Турбокомпресор	0,054
8	Трубопровід високого тиску	0,096
9	Кривошипно-шатунний механізм	0,096
10	Підшипники	0,021
11	Повітряний розподільник	0,014
12	Навісні механізми	0,121
13	Інші	0,240

У всіх чотиритактних ДВЗ стиснення повітря досягається за допомогою компресора, який приводиться в дію газовою турбіною. Поєднання компресора і газової турбіни називається турбокомпресором. Газова секція турбокомпресора складається з радіально-осьового колеса, розташованого в корпусі. Ущільнення вздовж газової секції має на меті запобігти витоку газу з робочої камери газової секції. Структурні властивості компонент турбокомпресора погіршуються не тільки зі збільшенням часу експлуатації, але і з посиленням силових навантажень.

Наведені дані підтверджують необхідність упровадження нових

технічних засобів діагностики та прогнозування ресурсу обладнання.

Турбокомпресор є найбільш навантаженим агрегатом двигуна, який працює в умовах високих перепадів температур і динамічних навантажень, тому будь-які відхилення характеристик двигуна впливають на роботу турбіни і можуть призвести до відмови. Турбокомпресор – індикатор стану двигуна. Основним завданням застосування турбокомпресорів на двигунах внутрішнього згоряння є підвищення потужності при зниженні питомої витрати палива, а також зниження токсичності вихлопних газів (рис. 3.3) [93].

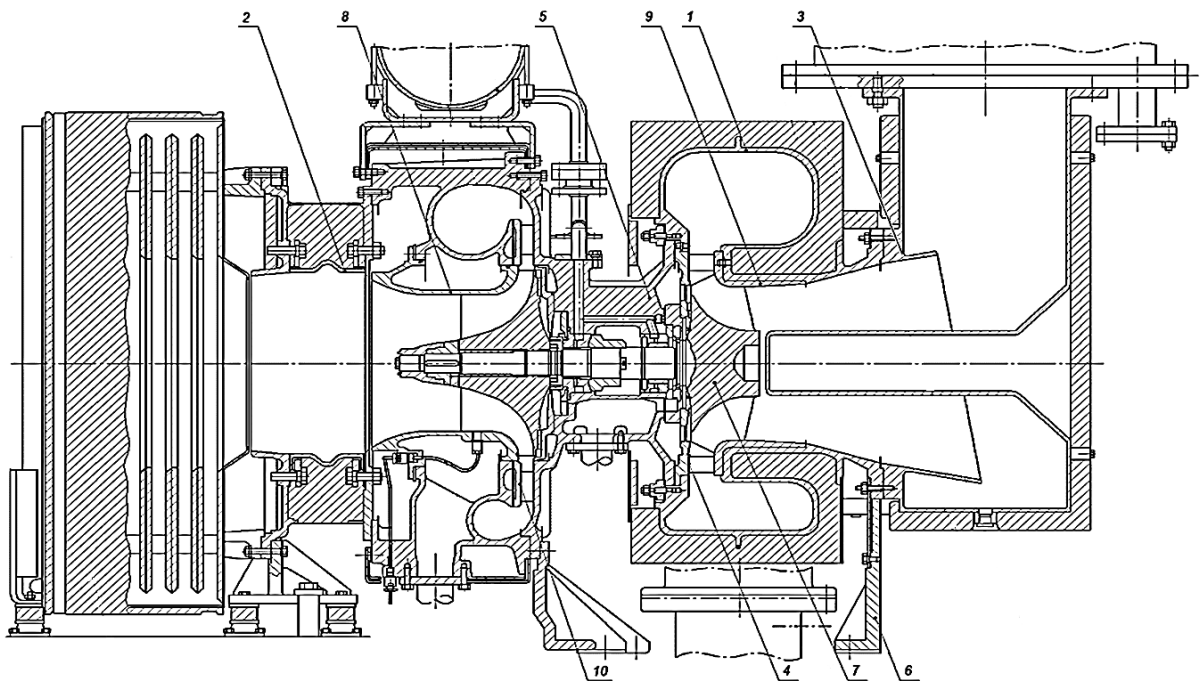


Рис. 3.3 – Компресор турбонагнітача NR34/S102 (познач. див. у тексті)

До складу суднових турбонагнітачів (рис. 3.3) входять: корпус турбокомпресора - 1, повітряний фільтр - 2, площа всмоктування повітря - 3, глушник - 4, колесо компресора - 5, дифузор - 6, датчик частоти обертів валу турбокомпресора - 7, масляний пневмоакумулятор - 8, пристрій для очищення турбокомпресора - 9, сполучна частина глушника з корпусом турбокомпресора – 10.

Компресор турбонагнітача являє собою одноступеневий відцентровий компресор із лопатевим дифузором. Вихлопні гази від головного двигуна

надходять на робоче колесо турбіни через сопловий апарат. Робочі лопатки закручені, мають бандаж та ялинкове кріплення на колесі. Колінчастий вал захищається від гарячих газів кожухом, а робоче колесо компресора – шаром ізоляції та діафрагмою. Найбільш часто виявленні відмови вузлів турбокомпресорів наведено у табл. 3.2 [93].

Таблиця 3.2 – Статистика відмов вузлів турбокомпресорів

№ п/п	Деталь турбокомпресора	Відсоток відмов, %
1	Корпус	9,0
2	Компресор	0,5
3	Турбіна	4,8
4	Ущільнення	16,7
5	Ротор	15,2
6	Підшипники	43,8
7	Масляні насоси	10,0

Згідно з рис. 3.1 іншим структуроутворюючим блоком ІСД експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання є аналіз причин відмов. Найбільш поширеною причиною відмов суднових турбокомпресорів є потрапляння сторонніх частинок в оливу і далі в турбінне або компресорне колесо, що призводить до порушення балансування ротора. Цей вид відмов призводить до виходу з ладу підшипників.

Причинами відмов можуть бути порушення технологічних процесів виготовлення та приховані дефекти матеріалу. Можливе також неточне конструктивне виконання та порушення експлуатації. Відмови за параметрами міцності виявляються у змінанні поверхні виробів або у вигляді зламів при згинанні та крученні. У загальному випадку причиною відмов є деградація параметрів та характеристик матеріалів, що відбувається внаслідок фізичних та хімічних процесів.

Згідно статистики найбільше число відмов доводиться на чинник зносу (табл. 3.3) [93].

Таблиця 3.3 – Статистика причин відмов вузлів турбокомпресорів

№ п/п	Вид пошкодження	% від загальної кількості відмов
1	Знос	44,7
2	Поломка елементів	11
3	Забруднення фільтрів і систем	8,5
4	Ерозія, корозія, кавітація	6,6
5	Негерметичність вузлів	5,7
6	Старіння матеріалу	3,7
7	Заклинювання елементів	3,7
8	Інші причини	16,1

У структурі всіх відмов турбокомпресорів більшість припадає на гальмування і заклинювання валу ротора через перегрівання корпусу, ознаками якого є течі мастила з боку турбіни. Поряд із цим відбувається сильний перегрів мастила, швидке його старіння та утворення відкладень на деталях турбокомпресора. Завдяки проведенню діагностики агрегатів наддуву можна попередити передчасне зношування деталей і продовжити термін служби турбокомпресора (рис. 3.4) [93].



Рис. 3.4 – Турбокомпресор головного двигуна AN B&W L32/40

Наступним структурним блоком інтелектуальної системи моніторингу та прогнозування (рис. 3.1) є визначення ймовірностей характеристик поточного стану обладнання. Технічний стан матеріалів елементів суднових транспортних засобів може перебувати в кінцевій множині станів, яка складається з підмножини працездатних станів та підмножини непрацездатних станів. Поділ множини на підмножини визначається умовами працездатності. Умови працездатності задають у просторі діагностичних показників області працездатності, у межах якої виробу виконують своє функціональне призначення.

В умовах експлуатації елементів СЕУ під дією непередбачуваних екстремальних навантажень ідентифікація їх технічного стану носить ймовірнісний характер і процес діагностування починається без внесення будь-яких поправок до ситуації, згідно з регламенту. У разі отримання нової інформації про виявлення дефектів усередині інтервалу регламентних робіт відбуваються порушення циклу діагностування, тобто зміни точки початку діагностики. Таким чином, зміна положення точки відліку носить випадковий характер, що характеризується дискретним тимчасовим і кінцевим числом можливих станів. Такий процес буде Марковським, оскільки наступні стани процесу діагностування не залежать від попередніх. Ланцюги Маркова характеризують стохастичний процес, у якому умовний розподіл ймовірностей майбутніх станів залежить лише від поточного стану цих процесів.

Окремим структурним блоком ІСД та прогнозування є побудова матриці перехідних ймовірностей динаміки ідентифікації елементів СЕУ у процесі навантаження. При моделюванні складних технічних об'єктів ключовим моментом є відображення структури взаємодій та переходів. Згідно зі структурою відмов, наведених в табл. 3.2 система діагностування може перебувати в одному із семи станів. Перехідні ймовірності P_{ji} не залежать від часу, а залежать тільки від j і i . Вибравши як основний параметр діагностики придатність до експлуатації з погляду відмов цих елементів у

термінах умовних ймовірностей формуємо матрицю перехідних ймовірностей.

Блок розрахунку елементів ймовірнісної діагностики передбачає обчислення умовних ймовірностей на кожному кроці системи. Трансформаційні умови ймовірностей у процесі переходу можуть відбутися як помноження рядків перехідної матриці на саму матрицю.

Наступними блоком ІСД (рис. 3.1) є порівняння та ранжування інтервальних оцінок. Ранжування, виконано з використанням апріорної інформації (табл. 3.2) і матриці перехідних ймовірностей. Тобто, якщо $P(1) > P(2) > P(3) > P(4) > P(5) > P(6) > P(7)$, ймовірність пропуску дефектів інтелектуальною системою моніторингу зменшується.

Для візуалізації запропонованої концептуальної моделі інтелектуального забезпечення ТД елементів СЕУ за допомогою ланцюгів Маркова може бути рекомендована імітаційна модель у вигляді орієнтованого графа. При побудові оргграфа їх специфічна частина, замкнута як компоненти відповідних параметрів, тобто елементів турбонагнітачів (табл. 3.2). Інші зв'язки перебували як дуги з урахуванням того, що сумарні вхідні та вихідні ймовірності мають бути рівними.

Оргграф, характеризує склад та структуру статистики відмов, на підставі яких можуть бути виділені найнебезпечніші елементи конструктивного виконання, що становлять найбільшу загрозу при експлуатації.

Окремим структурним блоком ІСД та прогнозування експлуатаційних властивостей елементів СЕУ є симуляція та генерація подій. Симуляція та генерування подій у процесі невизначеності екстремальних навантажень дозволяє забезпечити можливість налаштування системи на будь-яку інформаційну ситуацію. Процес перетворення аналогових даних про робочі процеси експлуатації повинен бути відображений у цифровій формі. Використання цифрових технологій для оцінки граничного стану елементів СЕУ дозволить різко підвищити точність оцінок стану устаткування.

Окремим блоком у представленій схемі інтелектуальної системи

експлуатаційних властивостей елементів СЕУ (рис. 3.1) є пошук чутливих діагностичних параметрів. Будь-яке обладнання, що обертається, вібрує під час своєї експлуатації. Для кожного механізму існує певний набір вібрацій, який дозволяє забезпечити діагностику механізмів в цілому так і окремих його частин. Періодична вібродіагностика полягає в регулярному вимірі вібрації шляхом встановлення датчиків, після чого виконують вимірювання на певних частотах. Однак, при цьому відсутня можливість оцінки стану механізму між вимірюваннями. НК динамічного обладнання СЕУ, заснований на аналізі спектральних характеристик вібраційних сигналів, встановлених трендів та порогових значень, вимагає при своїй реалізації, крім вимірювання параметрів вібрації обов'язкової обробки, великої кількості характерних ознак. До таких ознак у часовій області відносяться середнє значення, стандартне відхилення, асиметрія, ексцес, повний розмах коливань, середньоквадратичне значення, хрест-фактор, форм-фактор, імпульсний фактор, граничний фактор, енергія. У частотній області визначаються такі статистичні характеристики вібросигналів, як середнє спектральне значення, стандартне спектральне відхилення, спектральна асиметрія, спектральний ексцес. Перелічені спектральні характеристики не виходять безпосередньо з вимірів змін вібрацій та реалізуються обчисленнями за спеціальними програмами. Ці інформаційні параметри, засновані на використанні методу головних компонент при скороченні розмірностей і об'єднанні признаков спектральних характеристик та придушення шумів.

Наступним блоком ІСД та прогнозування експлуатаційних властивостей елементів СЕУ є багатокритеріальна оптимізація діагностичних параметрів. Параметри оптимізації ґрунтуються на зміні основної діагностичної ознаки при її наближенні до стану деградації. Багатокритеріальна оптимізація показників ефективності діагностики включає статистичні характеристики вібросигналів, критерії статистичних рішень Лапласа, Вальда, Гурвіца, адаптивної та мультиплікативної згорток та практичні реалізації вібродіагностики.

3.2 Аналіз причинно-наслідкових зв'язків виникнення пошкоджень при експлуатації підшипників кочення

Нормальна робота СЕУ залежить від правильного функціонування їхніх основоположних елементів, циліндро-поршневої групи, паливної апаратури, газотурбонагнітачів, підшипників тощо. Серед відмов елементів СЕУ найпоширенішими є відмови підшипників кочення.

Підшипники є одним із відповідальних вузлів, що визначають працездатність та довговічність об'єктів діагностики двигунів внутрішнього згоряння, турбонагнітачів та турбін.

Працюють підшипники кочення в дуже складних умовах змінного навантаження. Їхня придатність залежить від швидкості обертання вала, питомого тиску, температури вібраційних навантажень, характеристик мастила. Правилами експлуатації СЕУ передбачено, що після проведення монтажу підшипників необхідно проводити їх підгонку і притирання шляхом обкатки двигуна. Контроль стану підшипників кочення здійснюють під час поточного або капітального ремонту.

Визначення пошкоджень підшипників кочення проводиться шляхом вимірювання вібрацій. Знос викликає зміну траєкторії змішання центру мас і появу ударних імпульсів.

Функціональне призначення підшипників кочення полягає в забезпеченні обертання валів з мінімальним коефіцієнтом тертя. Закономірності руху мастильних матеріалів мають індивідуальність, що виражається в різних режимах змащування і довговічності підшипників. На підставі генезису пошкоджень підшипників кочення визначено причини пошкодження підшипників кочення:

- нестача мастилу в підшипникових вузлах;
- накопичення продуктів зносу деталей підшипників;
- накопичення продуктів окислення у вікнах сепараторів підшипника;
- нерівномірне змащування доріжок підшипників.

Характеристики об'єкта ідентифікації, які є підшипниками кочення, мають ознаки динамічності, так як поведінка вихідного сигналу залежить від попередніх значень накопичення пошкоджень. З іншого боку сам об'єкт є непередбачуваним джерелом випадкових збуджень тому йому притаманні властивості стохастичності, нелінійності і дискретності.

Однією з найпоширеніших причин відмов є зношування елементів механізмів. Статистичні дані свідчать, що у ряді випадків відмови із-за зношування поверхонь досягають 50...80% всіх видів відмов, що виникають в процесі експлуатації. Серед відмов елементів СЕУ найпоширенішими є відмови підшипників кочення. Чинники прояви зносу можуть бути металургійного і експлуатаційного характеру. До металургійних відносяться шлакові включення, пори, тріщини та раковини, до експлуатаційних – корозія, задири робочих поверхонь, вм'ятини та вибоїни, руйнування поверхонь (рис. 3.5). По характерних пошкодженнях можна визначити причини їх появи (рис. 3.6) [93].

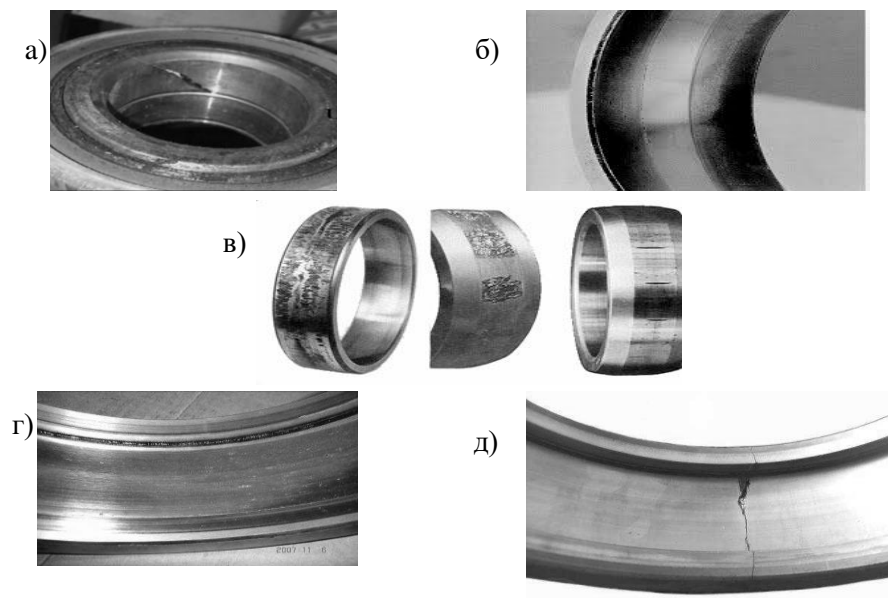


Рис. 3.5 – Металургійні дефекти підшипників кочення:

- а) дефект внутрішньої обойми; б) дефект зовнішньої обойми;
в) корозійне ушкодження; г) контактно втомне ушкодження; д) тріщини

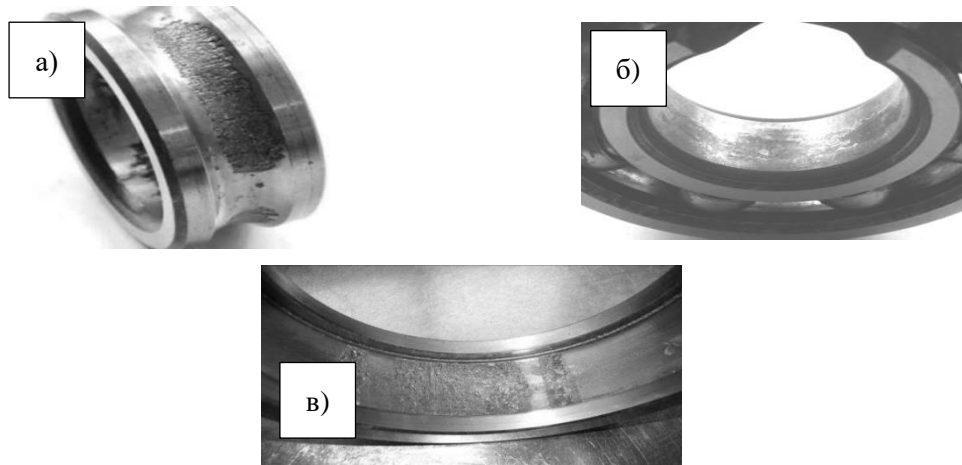


Рис. 3.6 – Експлуатаційні дефекти підшипників кочення:

- а) місцеве викошування внутрішнього кільця за обертової радіальної сили і нерухомого зовнішнього кільця; б) зміщення слідів зношування на внутрішньому кільці під дією осьової сили

Основними дефектами підшипників кочення є зношування, втома, корозія, риски, подряпини, ерозія, кавітація, фретинг-корозія, пітинг.

При руйнуванні масляної плівки, яка захищає поверхню, що треться, від прямого контакту, має місце молекулярно-механічне зношування. Під дією пульсуючого навантаження, спрямованого вздовж поверхні кочення, спостерігається втомне викришування, що супроводжується зростанням шуму і вібрацій. Тріщини, під час перекошування по них тіл кочення, викликають окремі частини у матеріалі і надалі призводять до руйнування.

Контактна або фретинг-корозія - це пошкодження, які виникають через відносний рух деталей підшипника в місцях контакту кільця з посадковим місцем на валу. За активного її розвитку вона може дуже глибоко проникнути вглиб кільця і спричинити його руйнування.

Пітинг-корозія - це точкові ушкодження, що ведуть до появи виразок, порожнин у металі, починаючи з поверхні.

У підшипників кочення, що працюють під навантаженням, на доріжках присутні матові сліди зносу. Вони залежать від умов роботи і напрямків навантаження.

Найбільшого розвитку під час діагностики підшипників кочення набув метод діагностики, що ґрунтується на вимірюванні та аналізі комплексу параметрів вібрації. Приклад промислового впровадження вібродіагностики підшипників кочення наведено на рис. 3.7 [95].



Рис. 3.7 – Вібродіагностика підшипників кочення

На підставі таких вимірювань можна отримати інформацію про стан працюючого обладнання. Вібродіагностика являє собою технічну діагностику об'єму діагностування в якій досліджується часовий сигнал або спектр вібрації. Аналізуються віброшвидкості, вібропереміщення, віброприскорення. Як діагностичні параметри використовують максимальне значення сигналу в досліджуваному інтервалі часу, його середньоквадратичне значення, їхні відношення і розмах, тобто різницю у вигляді різниці максимального і мінімального значень.

До переваг методу можна віднести можливість визначення прихованих дефектів без розбирання механізмів для діагностики та можливість виявляти дефекти на етапі їх зародження, а до недоліків - складність виділення вібраційних сигналів про несправності устаткування. На точність діагностування впливає кількість згладжувальних параметрів.

Для встановлення причинно-наслідкових зв'язків перетворення накопичених пошкоджень в діагностичних параметрів необхідно розглянути форми знань в структурних моделях суцільного середовища при забезпеченні обертового руху її структурних складових.

3.3. Нові інформаційно-діагностичні параметри вібродіагностики підшипників кочення

Фундаментальні явища і концепції, які можуть бути використані в моделі діагностики стану підшипників кочення, можуть бути представлені або в моделі з одним ступенем свободи, або в моделі з декількома ступенями свободи, або в моделі непружної струни.

Згідно з моделлю дискретної однорідної структури [57] керування рухом частинки в моделі з одним ступенем свободи описується рівнянням

$$m\ddot{u}(n,t) + \sum_{n'} \Phi(n,n')u(n',t) = q(n,t)$$

де n, n' номери частинок, що взаємодіють;

$\Phi(n,n')$ – силові константи;

$u(n,t)$ – зміщення;

$q(n,t)$ – змінні сили, що діють на частинку.

Оскільки всі атоми коливаються однаково, достатньо розглянути лише один ланцюжок однакових і рівновіддалених атомів. У такій моделі, якщо вихідний сигнал має скінченну ширину, то за більшої частоти дискретизації можна відфільтрувати осцилювальні сигнали і вибрати з них найбільш інформативні.

За великої частоти дискретизації в такій моделі можна відфільтрувати осцилювальні сигнали і вибрати серед них найбільш інформативні.

Дискретна структура нанорозмірних об'єктів з одним ступенем свободи характеризуються близькодією взаємодії складових елементів, тоді як безперервне середовище – далеко дією [57]. Форма вихідного сигналу залежить як від часу, так і від частоти. Тому слід розглядати їхні Фур'є образи

$$u(\omega) = \int u(t)e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{2\pi} u(\omega)e^{-i\omega} d\omega$$

де $u(t)$ - функція зміщення в часі;

$u(\omega)$ - функція зміщення від частоти ω .

Відмінність моделі з декількома ступенями від одновимірної моделі полягає в тому, що в її вузлах розташовані матеріальні об'єкти скінченних розмірів: домени, фулерени, нанотрубки, молекулярні кластери (рис. 3.8).

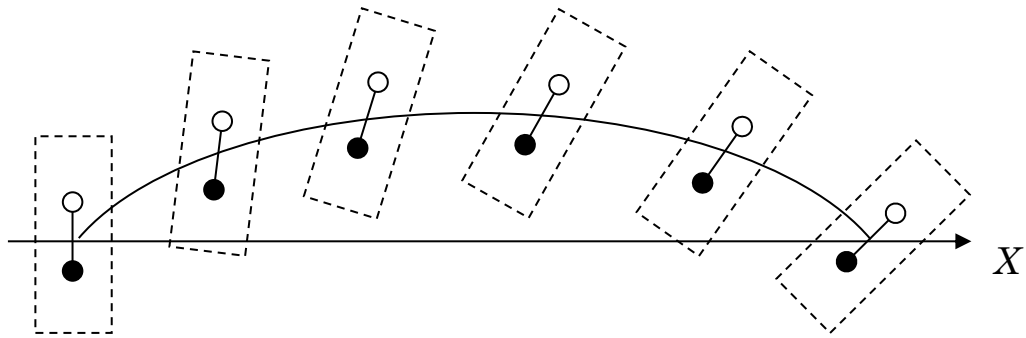


Рис. 3.8 – Модель вібродіагностики двохатомної структури

Кінематичними змінними в такій моделі є не тільки поздовжні та поперечні зміщення мас, а й кут повороту в тій самій площині. Такий стан за цих змінних близький до обертового [82].

Інваріантність енергії відносно трансляції дає змогу замінити рух атомів комірки рухом центру мас $u(n)$.

$$u(n) = \frac{1}{m} [m_1(\omega n_1) + m_2(\omega n_2)]$$

де $u(n)$ - рух центру мас;

m_1 та m_2 маси частинок у комірниці, $m = m_1 + m_2$, $m = m_1 + m_2$, Зміщення частинок у середині комірниці

$$\eta(n) = \frac{m_1 \xi_1 \omega(n_1) + m_2 \xi_2 \omega(n_2)}{I}$$

де $\eta(n)$ - зміщення частинок у середині комірниці;

I – момент інерції комірниці, $I = m_1 \xi_1^2 + m_2 \xi_2^2$;

ξ_1 та ξ_2 координати частинок відносно центру мас.

Позначивши через $q(n)$ та $\mu(n)$ узагальнення сили отримаємо рівняння руху всієї комірниці

$$m \ddot{u}(n) + \sum_{n'} \Phi^{00}(n - n') u(n') + \sum_{n'} \Phi^{01}(n - n') \eta(n') = q(n)$$

$$I\dot{\eta}(n) + \sum_{n'} \Phi^{10}(n-n')u(n') + \sum_{n'} \Phi^{11}(n-n')\eta(n') = \mu(n)$$

Матриця $\Phi^{SS'}(n)$ ($SS' = 0,1$) виражається через силові константи.

Розв'язання цих рівнянь дає змогу знайти рівняння енергетичного спектра складного середовища, що забезпечує зв'язок між трансляційними і ротаційними ступенями свободи, виражені через осциляторні властивості діагностованого сигналу. Сили взаємодії між атомами перестають бути центральними й у них поряд із поздовжньою з'являється поперечна складова, яка викликана провісниками дефекту. Розглянуті теоретичні положення і представлені моделі відносяться до суцільних середовищ з мікроструктурою [57, 82]. Що стосується вібродіагностики, то тут необхідно розглядати моменти зіткнення двох середовищ, рівняння руху в яких ідентичні й відрізняються тільки індексами.

Спільним є ударний імпульс обертання, що ініціює вібраційний сигнал в обох середовищах. Саме цей вібраційний сигнал є тим діагностичним параметром, який аналізується як засіб інформатизації та інтелектуального забезпечення моніторингу рухомих об'єктів під час їхньої експлуатації.

Інший тип теорій виникнення діагностичних сигналів під час експлуатації підшипників кочення належить до молекулярної теорії кочення, в основі якої лежить енергетична взаємодія дотичних поверхонь. Молекулярні взаємодії сил тяжіння і відштовхування залежать від відстані між молекулами. У разі дії стискаючих зовнішніх сил центр коливань зміщується і дія зовнішніх сил компенсується внутрішніми силами відштовхування. У разі непружної деформації взаємодіючих тіл, що має місце в стані, який передує руйнуванню, враховуються додаткові витрати енергії на зміну форми тіла або структури речовини.

Переходячи до більших масштабів взаємодіючих тіл під час кочення, слід зазначити, що сила тертя кочення залежить від площі фізичного контакту, являючи собою функцію тиску, швидкості ковзання, температури та інших чинників. Моделювання тертя кочення ґрунтується на геометричних

уявленнях мікронерівностей взаємодіючих тіл у вигляді сфер, конусів циліндрів та інших простих форм.

У розрахункових схемах тертя кочення враховується як деформація взаємодіючих тіл, а також як сили адгезії, коли нормальна реакція опори зміщується від центру тяжіння в бік кочення. При цьому виникає пара сил, що створює момент, спрямований у бік, протилежний коченню.

Вібродіагностика підшипників кочення під час динамічних і статистичних навантажень, що виникають на працюючому обладнанні, здійснюється методами аналізу прямого спектра, методами огинаючого спектра, методами пік-фактора, методами ударних імпульсів.

Метод пік-фактора полягає в періодичній зміні середньквдратичного значення і пікових амплітуд вібрації. На всьому часовому інтервалі обчислюється відношення цих величин. Точка екстремуму є індикатором стану підшипника. Метод дає добрі результати для механізмів із простою кінематикою.

Метод прямого спектра полягає у визначенні періодичності появи стрибків вібрації. Частотний діапазон розбивається на низку вузькосмугових спектрів. Кожен дефект виявляється на певній частоті. Глибину залягання дефектів визначають за амплітудою сплеску. Метод має велику інформативність.

Метод огинаючого спектра полягає в тому, що високочастотний сигнал модулюється низькочастотним у діапазоні 6...10 кГц. Модульований сигнал у формі огинаючого спектра є індикатором дефекту підшипника, що зароджується.

Метод ударних імпульсів полягає у вимірюванні амплітуди коливань імпульсів на частоті 28...32 кГц, які виникають у результаті утворення дефектів підшипників. Висновок про характер і глибину залягання дефектів роблять на підставі аналізу амплітуди імпульсів. Недоліки методу полягають у неможливості визначати дефекти в підшипниках, що обертаються зі швидкістю менше 100 об/хв.

Для точного визначення характерних гармонік роботи підшипника кочення достатнього чотири первинні параметри, три з яких є конструктивними, а четвертий визначається робочою частотою обертання ротора.

Частота обкатування тіл кочення по зовнішній обоймі підшипника

$$F = \frac{ND_C \cos \gamma}{2F_1(1 - D_K)}$$

де N – кількість тіл обертання в одному ряду підшипника

F_1 – частота обертання ротора

D_K – діаметр тіла кочення

D_C – діаметр сепаратора

γ – кут контакту тіла кочення з обоймою

Частота обкочування тіл кочення по внутрішній обоймі підшипника

$$F_B = \frac{ND_C \cos \gamma}{2F_1(1 - D_K)}$$

Частота роботи сепаратора

$$F_C = \frac{D_C \cos \gamma}{2F_1(1 - D_K)}$$

Частота обертання тіл кочення

$$F_{T.K} = \frac{D_C^2 \cos^2 \gamma}{2F_1 D_K D_C (1 - D_K)}$$

Як діагностичні параметри у вібродіагностиці використовують:

- максимальне значення сигналу на розглянутому інтервалі часу;
- середньоквадратичне значення в розглянутій полосі частот;
- відношення обох параметрів;
- розмах або різниця між екстремальними значеннями в розглянутому діапазоні частот;
- аналіз спектрального складу та алгоритму обробки ударних імпульсів;
- аналіз пік-фактора на резонансній частоті акселерометра;
- контроль ступеня кондиції мастила.

У процесі роботи підшипники кочення генерують вібрації, які зумовлені впливом одразу декількох елементів, які здійснюють складні рухи з різними кутовими швидкостями з недосконаlostями підшипників кочення на стадії їхнього виготовлення: волокнистістю, овальністю, гранню доріжок підшипників кочення, розкидом діаметрів кульок. Дефекти, що виникають під час експлуатації внаслідок: зносу, забруднення мастила, збільшення радіального зазору. Ці причини призводять до складного характеру руху центру вала під впливом сили взаємодії деталей, що контактують. Таке різноманіття діагностичних параметрів позначається на ефективності їх застосування, тому що внаслідок їх послідовного або одночасного використання недоліки, що характерні для цих параметрів, підсумовуються.

3.4. Експериментальне обладнання та технологія вібродіагностики суднових підшипників

Експериментальне обладнання вібродіагностики включає послідовно з'єднані вимірювальні об'єкти, датчики вібрації, віброметр, аналізатор спектру, комп'ютер (рис. 3.9).



Рис. 3.9 – Блок схема експериментальної установки:

- 1) вимірювальний об'єкт; 2) датчик вібрації; 3) віброметр; 4) аналізатор спектру; 5) комп'ютер

Сигнали від датчиків можна оцифрувати і записати для аналізу тенденцій. Для реєстрації рівнів вібрації використовують акселерометр. Вібраційний сигнал тривалістю 6 с отримували щодня протягом 10 днів поспіль. Виникла несправність підшипника, яка призвела до виходу його з ладу.

Візуалізація сигналів вібрації в часовій області показана на рис. 3.10.

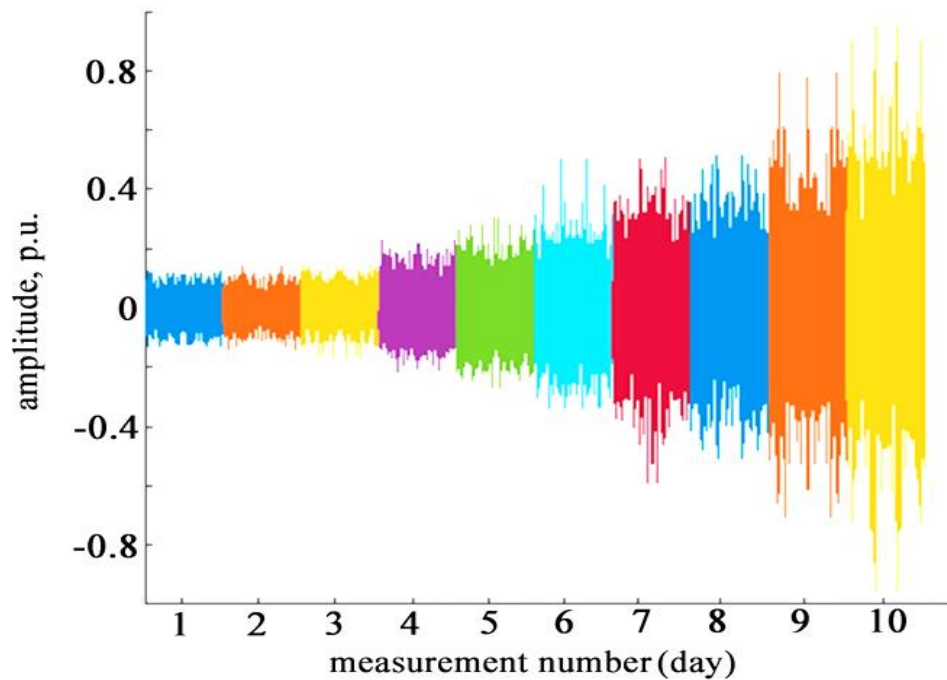


Рис. 3.10 – Візуалізація вібросигналів у часовій області

Кольорова індикація застосована, щоб чітко розрізняти вібраційні сигнали, отримані в кожному окремому вимірі. Вібраційні сигнали в часовій області демонструють тенденцію до збільшення імпульсивності сигналу.

Будь-яке оберতальне обладнання вібрує під час експлуатації. Для кожного механізму існує певний набір вібрацій, який дозволяє забезпечити діагностику механізмів в цілому, так і окремих його частин. В умовах технічної експлуатації вібродіагностика полягає в регулярному вимірі об'єму вібрації шляхом встановлення датчиків, після чого вимірюють на певних частотах. Отримання даних порівнюються з попередніми вимірами.

Спочатку стан підшипника контролюють за допомогою моделі

нормального зношування, коли в ньому відсутні дефекти. При виявленні дефекту переходять до аналізу розвитку дефекту. Після виявлення перших ознак дефекту, що зароджується, інтервал часу між двома вимірами скорочують. Залежно від локалізації дефекту, інтервал часу мінімальний при дефектах, які можуть розвиватися дуже швидко.

Періодичність проведення діагностичних вимірювань вібрації залежить від максимальної швидкості розвитку дефектів підшипника з інтервалом часу від декількох годин до одного року. При нормальній експлуатації вимірювання проводять через 6 місяців.

У процесі експлуатації СЕУ контролюється зниження оборотів головного двигуна, температура мастила на вході та виході, нормальний та аварійний тиск на турбонагнітачі та головному двигуні, вміст заліза в мастилі. Серед відмов СЕУ найпоширенішими є відмови підшипників.

Діагностику підшипників кочення в процесі їхньої експлуатації проводять в автоматичному режимі інструментальними методами за зміною температури і тиску в підшипникових вузлах (рис. 3.11-3.13).

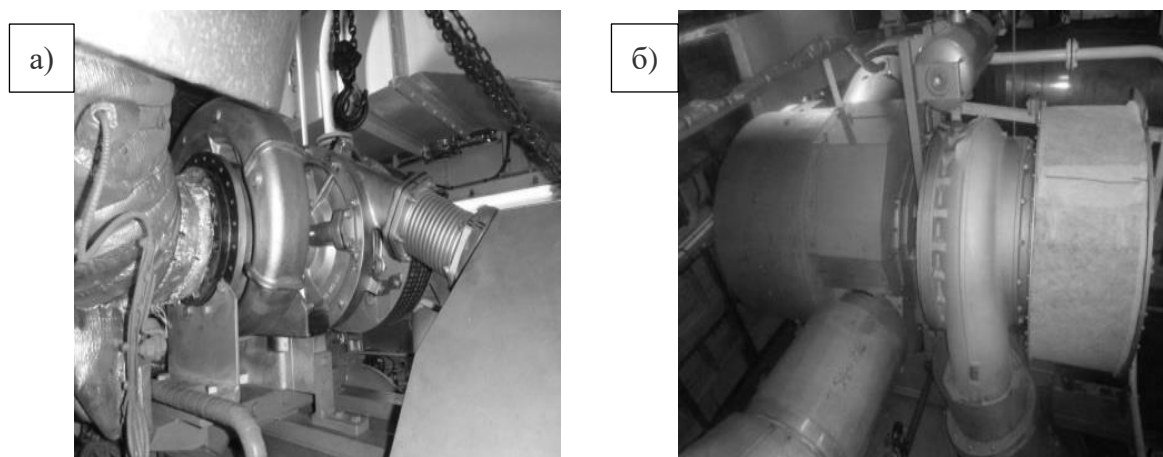


Рис. 3.11 – Експлуатація суднових підшипників двигуна:

а) допоміжного; б) головного

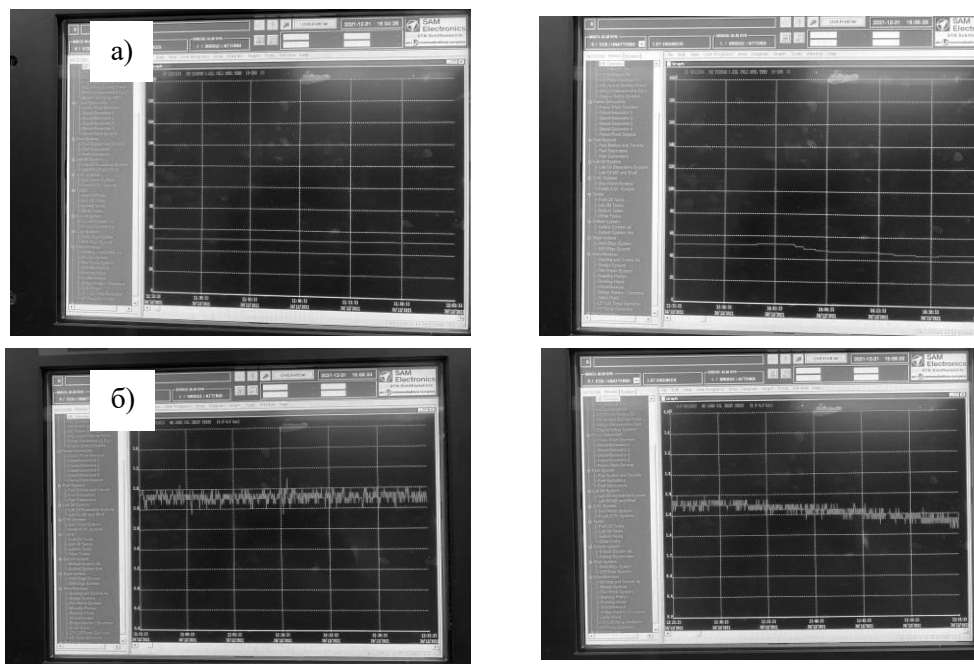


Рис. 3.12 – Виявлення пошкоджень у підшипників кочення:

а) за зміною тиску; б) за зміною температури



Рис. 3.13 – Дефекти поверхні внутрішньої сторони підшипника

Представлений дефект отримано внаслідок реальної ситуації аварії на судні «UHL FRONTIER» 30.12.2021р. (див. додаток В). Моніторинг аварійної ситуації пов'язаний с руйнуванням підшипника кочення VTR304P11/021 турбокомпресора NR34/S102 головного двигуна MAN B&W 32/40 судна «UHL FRONTIER» при його русі від порту Генуя до порту Барселона, хронометраж дій екіпажу та виявлений дефект, також подано у додатку Г.

Вимірювання проводять на корпусі підшипникового вузла, а саме в нижній його частині, тому що тут навантаження на вузол максимальні (рис. 3.14).



Рис. 3.14 – Експлуатація підшипникового вузла

Контроль динамічного обладнання СЕУ з вібрації включає вібромоніторинг і вібродіагностику. Вібромоніторинг полягає у спостереженні під час змін, що відбуваються, контрольованих параметрів, побудові трендів, встановленні основних тенденцій та їх порівнянні з пороговими значеннями шляхом графічного аналізу результатів вимірювань. Вібродіагностика полягає у виявленні та ідентифікації дефектів шляхом виявлення характерних ознак вібрації, встановлення виду та глибини дефектів, прогнозування їх розвитку.

Вібродіагностика виявляє дефекти, які є ланками цілої низки дефектів. Її виробляють через невеликі проміжки часу. На практиці вібродіагностика служить захисним заходом, що відключає дію обладнання при перевищенні рівня вібрацій вище за порогове значення. Вібродіагностика полягає у вимірі вібрації в діапазоні низьких та середніх частот у точках на корпусі які віддалені від віброактивних вузлів.

Під час діагностики роторних вузлів контролюють високочастотну складову вібрації. Тому вимірювання вібрації проводять періодично.

Корисну діагностичну інформацію отримують шляхом використання методу ударних імпульсів, методу ексцесу, методу пік-фактора, вейвлет аналізу, щоб зафіксувати навіть слабкі зміни у спектрах вібрації. При цьому діагностуються дефекти на ранній стадії свого розвитку, що дозволяє здійснювати їх прогнози.

Вібродіагностика підшипників кочення енергетичних установок здійснюється методом аналізу великої кількості діагностичних параметрів. У роботі обробка даних була виконана за допомогою комп'ютерної математичної системи Matlab 2018. Створення методів вібродіагностики передбачає початкову побудову фізичної моделі та діагностичних моделей, у яких використовуються детерміністичні і ймовірнісні методи. У фізичних моделях коливання, які створювані підшипниками кочення за її експлуатації ставляться до розряду кінематичних, коли вихідними є навантаження, а вхідними є переміщення зовнішнього і внутрішнього кільця підшипника. При розвитку несправностей вібраційні характеристики кінематичних збуджень змінюються, що дозволяє виявляти несправності підшипників щодо зміни вібрації.

У діагностичних аналітичних моделях процедура контролю стану підшипників стає можливою, коли є база даних та сучасні експертні системи діагностики, що використовують складні алгоритми обробки та фільтрації сигналів. При моніторингу для забезпечення точності розрахунків ресурсу діагностичних об'єктів та встановлення дати проведення ремонту за станом об'єкта необхідне застосування математичних моделей.

Наукові розробки діагностичних параметрів та технологій ТД елементів суднового енергетичного обладнання щодо забезпечення підвищення ефективності їх експлуатації з використанням методу діагностики і прогнозування стану деталей впроваджено у навчальний процес Херсонської державної морської академії (див. додаток Б).

3.5. Комп'ютерна діагностика стану суднових підшипників кочення при їх експлуатації

Інтелектуальне забезпечення діагностики технічної експлуатації суднового обладнання полягає в оцінках перетворень деформації структури матеріалу у фіксований сигнал різної природи походження. З метою підвищення ефективності діагностики та прогнозування використовують сукупність статистичних, динамічних, детермінованих і стохастичних моделей з дискретним і безперервним часом. Це дає змогу здійснити заміну аналітичних уявлень цифровізацією з фіксованими навантаженнями, що перевищують нормативні. Вона регулюється методами НК та аналізом і встановленням закономірностей змін експлуатаційних характеристик. До її завдань входить пошук місць і причин несправностей із прогнозуванням поточного стану. Моніторинг полягає у спостереженні та перевірці якості обладнання з обов'язковим поданням оповіщення.

ЗР - це сумарне напрацювання об'єкта від моменту контролю його технічного стану до граничного стану. При цьому під граничним станом обладнання розуміють стан, за якого подальша експлуатація обладнання недоцільна. Оцінка та ПЗР в умовах відсутності інформації про пікові та екстремальні навантаження на обладнання в період міжремонтних циклів зазнає під час свого використання низки обмежень і неточностей, викликаних динамічними змінами зовнішнього середовища, тобто має місце ситуація ризику. Різноманіття статистичних характеристик вібросигналів і неоднозначність їх трендів ускладнюють їх практичне використання. Перспективним для цього є використання методу головних компонент.

Інформаційними параметрами для ПЗР можуть бути як значні пошкодження, що проявляються у вигляді корозії, зносу, деформаційної повзучості, так і параметри супутніх процесів, рівні вібрації, величина витоків, температура вузлів тертя, витрата продуктів відносно середніх значень.

Поєднуючи суб'єктивні експертні та об'єктивні елементи ТД зі способами опрацювання наявної інформації методами математичного моделювання та ймовірнісної динаміки, можна одержати надійний спосіб моніторингу устаткування, яке довго працює, у процесі його експлуатації.

Правилами експлуатації СЕУ передбачено, що після проведення монтажу підшипників необхідно проводити їхню підгонку і притирання шляхом обкатки двигуна. Контроль стану підшипників кочення проводять під час поточного або капітального ремонту. Як об'єкти дослідження використовували підшипники кочення VTR304P11/021 турбокомпресора NR34/S102 головного двигуна MAN B&W L32/40 рис. 3.15 [94].

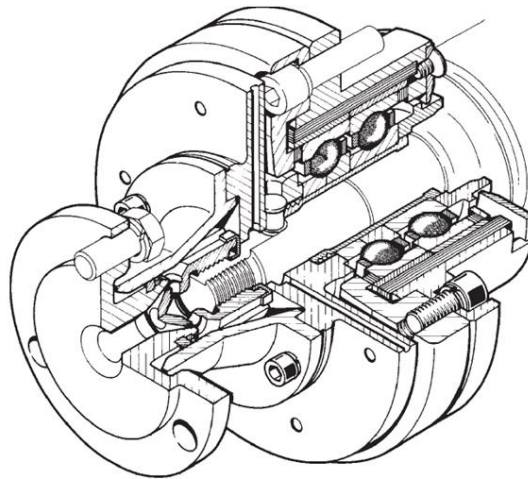


Рис. 3.15 – Конструктивні особливості підшипника кочення турбоагнітача VTR304P11/021

Параметри підшипника кочення турбоагнітача VTR304P11/021 подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Параметри підшипника кочення турбоагнітача VTR304P11/021 і характеристична частота вібрацій точкового дефекту зовнішнього кільця

D_b , мм	D_c , мм	N_B	Θ , рад	f_r , Гц	f , Гц
14	90,9	12	0	485	2461,9

Технологічне розташування: 12 кульок по 4 мм у два ряди з боку

компресора і 12 роликів по 14 мм в один ряд з боку турбіни.

Як матеріали досліджень використовували статистичні характеристики вібраційних сигналів під час експлуатації цих підшипників. Як методи дослідження використовували метод головних компонент, що полягає в об'єднанні статистичних ознак різної розмірності та отриманні нових закономірностей [94].

Несправність призводить до вібрації крутного моменту валу турбонагнітача з характеристичною частотою, що визначається за формулою

$$f = 0,5N_B \cdot f_r \left(1 - \frac{D_b \cos \theta}{D_c} \right)$$

де D_b – діаметр кульки,

D_c – діаметр кола, проведеного через центри кульок,

θ – кут контакту кульки,

f_r – частота обертання підшипника,

N_B – кількість кульок у підшипнику.

Конфігурація підшипника кочення з дефектом, що розвивається, показано на рис. 3.16 [94].

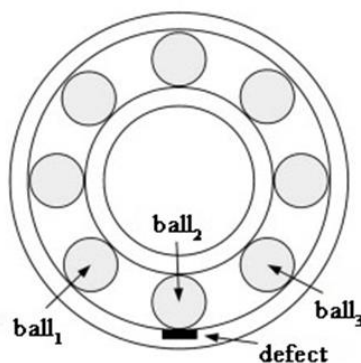


Рис. 3.16 – Підшипник кочення із дефектом зовнішнього кільця

Виконані розрахунки статистичних характеристик вібраційних сигналів у тимчасовій області, такі як стандартне відхилення (Std), асиметрія (Skewness), ексцес (Kurtosis), повний розмах коливань (Peak2Peak), середньоквадратичне значення (RMS), хрест-фактор (CrestFactor), форм-фактор (ShapeFactor), імпульсний фактор (ImpulseFactor), граничний фактор

(MarginFactor), енергія (Energy) показали зростання їхніх значень під час накопичення пошкоджень (рис. 3.17, табл. 3.5).

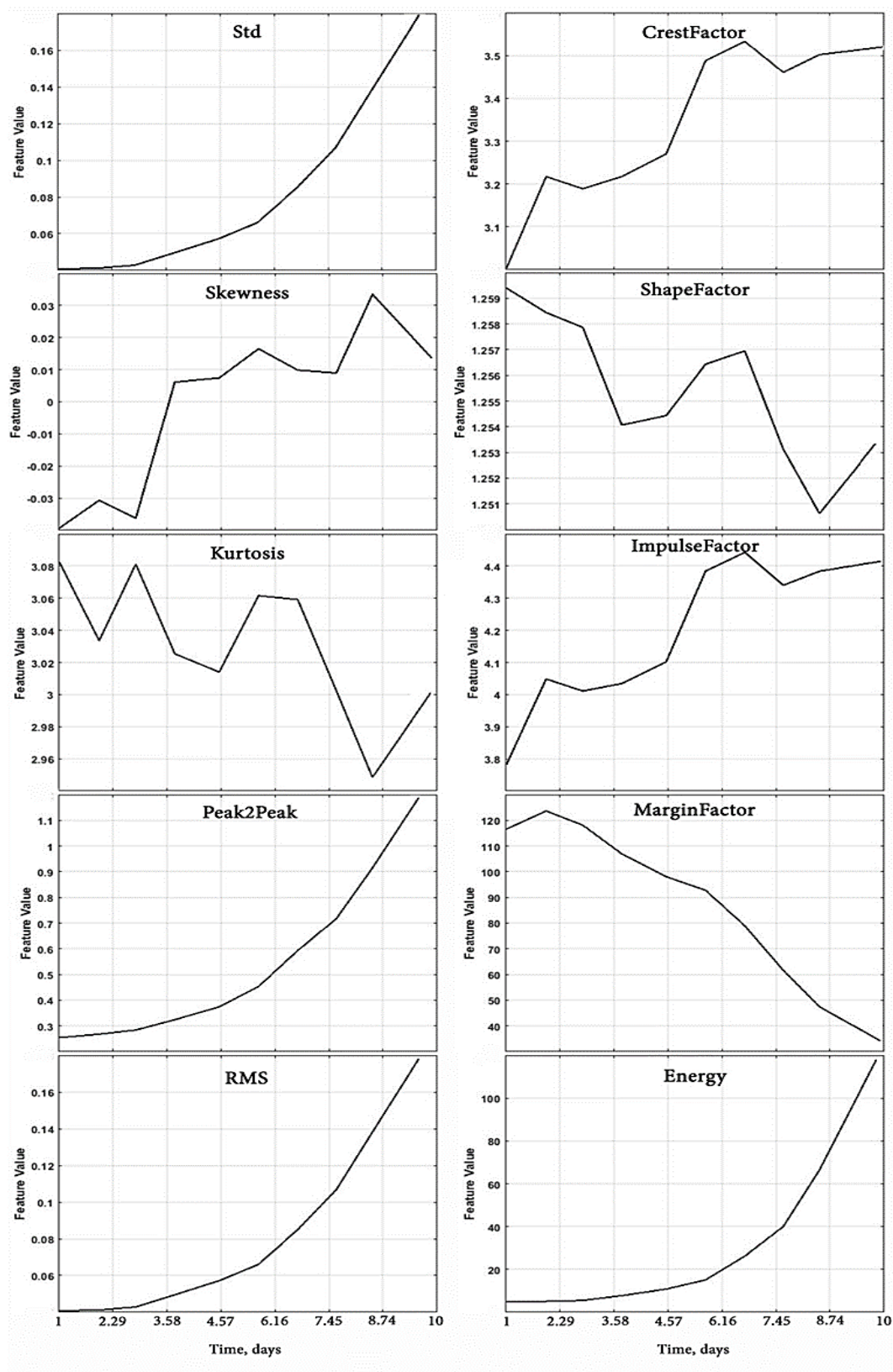


Рис. 3.17 – Еволюція безрозмірних статистичних характеристик вібраційних сигналів у процесі експлуатації підшипника кочення

Таблиця 3.5 – Статистичні характеристики вібросигналів підшипника за наявності точкового дефекту

№ вимірювання	Std	Skewness	Kurtosis	Peak2Peak	RMS	CrestFactor	ShapeFactor	ImpulseFactor	MarginFactor	Energy
1	0,0572	-0,0089	1,8192	0,1999	0,0572	1,7476	1,155	2,019	40,777	9,816
2	0,0578	0,0061	1,7982	0,2165	0,0578	1,8889	1,153	2,177	43,398	10,019
3	0,0603	0,0874	2,2855	0,3484	0,0603	3,2386	1,161	3,785	71,136	10,934
4	0,0690	0,1468	3,8063	0,6145	0,0689	4,5265	1,178	5,416	86,692	14,967
5	0,0801	0,2644	4,4138	0,7800	0,0801	5,1182	1,185	6,153	87,080	21,325
6	0,0930	0,2547	5,3490	1,0849	0,0930	5,7282	1,193	6,932	86,681	30,193
7	0,1198	0,4314	16,8085	2,1631	0,1198	7,991	1,251	10,430	106,292	52,310
8	0,1508	0,8135	29,2221	3,1804	0,1508	9,995	1,329	13,826	123,682	80,421
9	0,1958	0,7147	39,4535	4,3363	0,1958	10,885	1,456	16,309	123,719	134,515
10	0,2640	0,7340	47,5874	5,4602	0,2460	11,247	1,596	18,239	120,580	208,424

Разом про те слід зазначити, що графічна інтерпретація змін цих статистичних характеристик вібраційних сигналів не однозначна. Є зростаючі та спадні тренди з нестійким характером зміни статистичних характеристик та великим розкидом із флуктаціями аналізованих залежностей.

Однак, незважаючи на зазначені недоліки та труднощі використання апарату розкладання вібраційних сигналів на їх статистичні характеристики, явища їх залежностей від станів деградації матеріалу підшипників кочення існують. Це свідчить про те, що вони можуть бути потенційними індикаторами деградації стану підшипників кочення.

Різноманіття статистичних характеристик вібросигналів створює проблему вибору найбільш надійної та інформативної характеристики для діагностування та прогнозування стану підшипника. Кожна окрема характеристика може бути більш чутливою за одних типів дефектів і менш

чутливою за інших. Комплексний моніторинг механізму діагностування з погляду можливості виявлення різних типів дефектів, має бути універсальним. Тому для надійної діагностики слід враховувати й аналізувати всю сукупність доступних для аналізу характеристик вібросигналів. Це в свою чергу призводить до ускладнення інтерпретації отриманої таким чином інформації. Пропонується об'єднати всі аналізовані статистичні характеристики в одну узагальнену, використовуючи для цього метод головних компонент.

Метод головних компонент (PCA - Principal Component Analysis) використовується для зменшення розмірності та об'єднання статистичних характеристик вібраційних сигналів у часовій області, які наведені в табл. 3.6. Проведені розрахунки головних компонент вібраційних сигналів показали їхню прийнятність для оцінювання стану підшипників кочення турбонагнітачів, причому залежність зміни першого головного компонента від накопичення пошкоджень виявилася монотонно зростаючою, на відміну від інших головних компонент, залежність яких має нестійкий коливальний характер. Таким чином, перша головна компонента є потенційним комбінованим прогностичним показником стану підшипника турбонагнітача. Графік на рис. 3.18 показує, що перший головний компонент монотонно зростає, коли підшипник кочення наближається до відмови.

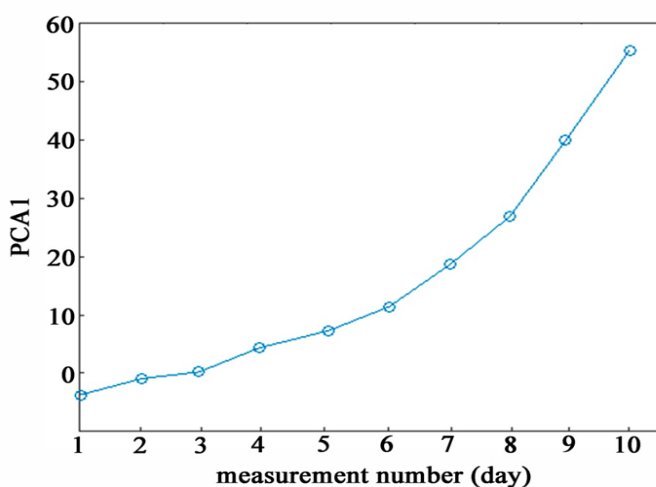


Рис. 3.18 – Перша головна компонента як індикатор стану підшипника турбонагнітача

Спектральний ексцес вважається потужним інструментом прогнозу стану підшипників у частотній області. Спектральний ексцес являє собою статистичну величину, яка застосовується в частотній області і дозволяє визначити імпульсну характеристику сигналу. Він є безрозмірною величиною і порівнює розподіл даних з розподілом Гауса. Щоб візуалізувати зміни спектрального ексцесу в часі, нанесемо на графік (рис. 3.19) значення спектрального ексцесу як функцію частоти і дня (номера) вимірювання.

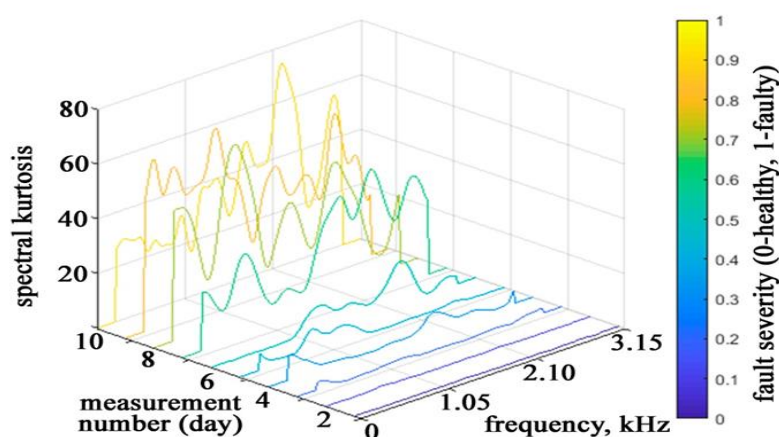


Рис. 3.19 – Залежність спектрального ексцесу від частоти та номера вимірювання вібросигналів при поступовому зростанні розбалансування підшипника кочення

Небезпека несправності, вказана на кольоровій шкалі. Вона є номером вимірювання нормованої за шкалою від 0 до 1. На початку процесу, коли підшипник перебуває у справному стані, спостерігається відсутність піків. Поява точкового дефекту проявляється в появі коливальної складової спектрального ексцесу, величина якої наростає з наближенням руйнування підшипника. Чітко видно, що значення спектрального ексцесу біля характеристичної частоти дефекту 2,46 кГц (табл. 3.5) поступово збільшується в міру погіршення стану підшипника.

Спектральний ексцес набуває більших значень у смузі частот, де сигнал несправності є домінуючим і дорівнює нулю в смузі частот, де в спектрі переважають вібрації в штатному режимі. Таким чином,

спектральний ексцес дає змогу не тільки судити про ступінь пошкодження підшипника кочення, а й спостерігати динаміку розвитку дефекту і робити відносний прогноз робочого ресурсу підшипника кочення.

Таким чином, на основі експериментальних даних вібромоніторингу експлуатаційних властивостей підшипників кочення турбонагнітачів і великої кількості цифрової інформації щодо параметрів вібраційних сигналів, які передують руйнуванню, досліджено структуру вібраційного спектра. Для аналізу структури вібраційного спектра було використано метод головних компонент.

Виявлено та експериментально підтверджено новий інформаційний параметр вібродіагностики точкових дефектів, що ґрунтується на аналізі величини зміни в часі першого головного компонента під час його наближення до стану руйнування.

Запропоновано інформаційний параметр прогнозу стану підшипників, що базується на аналізі частотних змін спектрального ексцесу вібраційного сигналу під час наближення до стану відмови. Виконана візуалізація змін цього параметра підтвердила можливість спостереження за динамікою розвитку точкових дефектів.

Дослідно-промислову перевірку ІСД експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання виконано на судні «UHL FRONTIER». Впровадження нового методу діагностування суднових транспортних засобів під час їх експлуатації дозволяє збільшити обсяг діагностичної інформації без додаткового втручання в їх конструкції, підвищити надійність проведення діагностичних робіт у 1.3...1.5 разів (див. додаток А).

Висновки до III розділу

1. Запропоновано інтелектуальну систему діагностики та прогнозування експлуатаційних властивостей деталей суднового обладнання, що базується на відокремленні та аналізі експериментальних і статистичних

даних у режимі реального часу. ІСД експлуатаційних властивостей елементів СЕУ виокремлює ключові особливості об'єктів і виявляє нові можливості та сегменти розвитку накопичення пошкоджень у процесі експлуатації. Інтелектуальна складова системи діагностики експлуатаційних властивостей елементів СЕУ полягає у використанні алгоритмів і програмних продуктів, які мінімізують суб'єктивізм у прийнятті висновку про продовження використання ресурсу обладнання.

Початковий блок ІСД елементів СЕУ діагностики пов'язаний з використанням вхідної інформації, технічної документації, інтервалів діагностики. Далі слідує апіорна інформація статистики і причин відмов вузлів турбокомпресора і головного двигуна, визначення ймовірностей динаміки управління діагностичної інформації, ранжування інтегральних оцінок, побудова орграфів, симуляція і генерація подій. Платформа впровадження ІСД та прогнозування передбачає використання структурованої інформації інтеграції вібраційних характеристик в нові діагностичні параметри. Система дозволяє спостерігати, вимірювати та аналізувати результати з видачою необхідних рекомендацій.

2. На підставі генезису пошкоджень визначено причини відмов. Показано, що експлуатація підшипників кочення несе в собі ознаки динамічності, де аналізований сигнал залежить від накопичення інформації попередніх значень. Надано, що основним напрямком удосконалення ТД є не тільки експлуатація а визначення діагностичних сигналів чутливих до локальних мікронапруг. Найбільший розвиток при діагностиці підшипників кочення отримав метод вібродіагностики. Розроблена блок-схема експериментальної установки вібродіагностики суднових засобів.

На підставі вивчення результатів практичних та експериментальних досліджень про стан працюючого обладнання та локальних ушкоджень встановлено, що серед відмов елементів СЕУ найпоширенішими є відмови підшипників кочення, визначені вимоги до умов експлуатації. Показано, що знос викликає зміни зміщення центру мас та появу ударних імпульсів.

Встановлено діагностичні параметри вібродіагностики.

3. Вивчено та розвинуто теоретичні основи вібродіагностики з позицією моніторингу технічної експлуатації та обслуговування підшипників кочення. Виокремлено та додано такі її розділи, як енергетичні спектри, рівняння суцільного середовища, зв'язки між трансляційними та ротаційними властивостями з осциляторними характеристиками вібраційних сигналів. Окремо розглянуто питання застосовності теорії вібраційної діагностики до моніторингу технічного стану підшипників кочення: молекулярної взаємодії, кінематики теорії кочення, характеристик вібраційних сигналів. Показано, що різноманіття і різні розмірності діагностичних сигналів призводять до необхідності злиття показників різної розмірності без втрати наявної інформації в єдиний узагальнюваний показник.

4. Встановлено, що кожна з статистичних характеристик вібраційних сигналів придатна для спостереження за розвитком одних типів дефектів та менш чутлива до інших. Комплексне використання різних типів статистичних характеристик може забезпечити надійне виявлення різних типів дефектів. Універсальним методом, що поєднує результати статистичних показників вібраційних сигналів є метод головних компонент. Запропоновано нові діагностичні параметри підшипників кочення, в основі яких покладено спосіб обробки статистичних характеристик вібраційних сигналів, який відрізняється від існуючих, використанням першої головної компоненти в часовій області та спектрального ексцесу в частотній області. Це дозволяє підвищити якість ПЗР устаткування. У роботі розглянуто реальну практичну ситуацію вібродіагностики точкового дефекту зовнішнього кільця підшипника. Вивчення застосовності методу головних компонент до інших типів дефектів показало їхню перспективність для вібродіагностики дефектів, розташованих на внутрішньому кільці підшипника, і під час випадання кульки з обойми.

РОЗДІЛ 4

ДІАГНОСТИКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НАКОПИЧЕННІ ПОШКОДЖЕНЬ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВОГО ОБЛАДНАННЯ

4.1. Розробка інформаційно-діагностичних параметрів вібродіагностики підшипників ковзання

Розробка інформаційних параметрів технічної діагностики працездатності елементів суднового обладнання потребує індивідуального підходу, якій враховує специфіку функціонування вузлів, наявності бази даних та експертних систем. Труднощі у визначенні таких параметрів пов'язані з різноманіттям статистичних характеристик вібросигналів, їх аналізом та придатністю для оцінки структурних змін, що відбуваються при експлуатації обладнання, а також їх інформативності та зручності використання. Особливість визначення параметрів вібродіагностики деталей СЕУ полягає в тому, що крім фізичних вимірювань вібраційних сигналів потрібне використання математичних моделей та встановлення їх адекватності реальному стану об'єктів діагностики.

Підшипники ковзання є важливим трибологічним компонентом устаткування, що обертається. Їхнє основне призначення є запобігання зносу у процесі експлуатації. Вони являють собою опори або напрямки механізму, в якому тертя відбувається при ковзанні поверхонь, що стикаються. За конструктивним виконанням підшипники ковзання складаються з корпусу, антифрикційного вкладиша, частини поверхні валу – підшипникової шийки та шару мастили між ними (рис. 4.1).

Підшипники ковзання є невід'ємною частиною відповідальних агрегатів. Суднові підшипники ковзання з антифрикційним шаром із сплаву олова та свинцю використовуються на суднових мало- та середньо-обертових

дизелях, турбінах, валопроводах, а також у турбокомпресорах високооборотних дизелів [99].

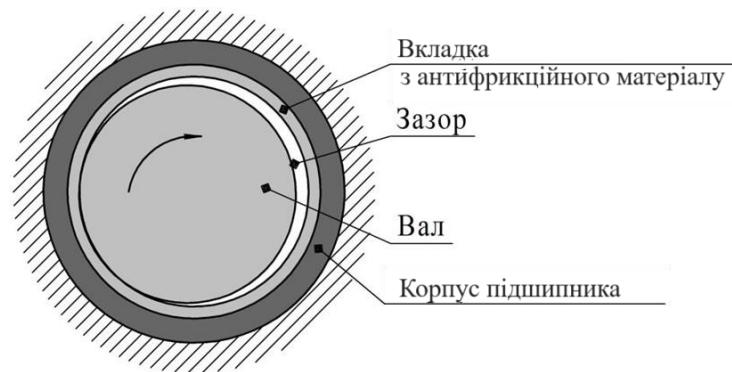


Рис. 4.1 – Конструкція підшипника ковзання

Принцип дії підшипників ковзання полягає у наступному. Поточне середовище, зазвичай мастило, із зовнішнім тиском нагнітається між двома елементами, які знаходяться в відносному русі. Мастило під тиском утворює клин між частинами, що рухаються, і розділяє їх. Шари мастила можуть бути дуже тонкими, але поки немає прямого контакту, зносу не буде. Рух шийки змушує мастило переміщатися між валом та корпусом, створюючи постійний клин.

Правильна обробка і складання вкладишів підшипників ковзання повинна забезпечувати створення масляної плівки між поверхнями тертя, що труться. Внутрішній діаметр вкладиша підшипників ковзання повинен бути більшим за шийку валу на величину масляного зазору, який змінюється в залежності від діаметра шийки валу, його маси та числа оборотів. Кожен підшипник є закритий, зібраний вузол, що монтується на шийку валу (рис. 4.2) [102].

Пристрої з такими підшипниками є найдорожчими і найвідповідальнішими елементами обладнання, тому необхідно забезпечити діагностику їх технічного стану.



Рис. 4.2 – Експлуатація суднових підшипників ковзання

Дефекти, що виникають при виготовленні, монтажі та експлуатації підшипників ковзання впливають на всі складові вібрації з різною природою збудження. Види дефектів підшипників ковзання та їх вплив на вібрацію механізму надано у табл. 4.1 [84].

Таблиця 4.1 – Види дефектів підшипників ковзання та їх вплив на вібраційні сигнали

Типи дефектів	Причини	Форми прояву	Наслідки	Зовнішні індикатори	Методи реєстрації
Технологічні	Відхилення від проектних технологій	Зміни в поверхнях тертя, дисбаланс, розцентрування	Перекося вкладашів, погіршення умов змащення, бій вала	Автоколивання підшипника, нестабільність траєкторії вала	Низькочастотна вібрація всього підшипникового вузла
Експлуатаційні	Вплив змінних навантажень на підшипниковий вузол	Повний або частковий розрив масляної плівки, сухий контакт поверхонь тертя	Збільшення зазору, пов'язаного зі зносом, вібрацію вкладашів, тріщини на поверхнях тертя	Гідродинамічні та механічні удари, локальні прояви тиску в мастилі	Аналіз огинаючої спектра високочастотної вібрації

Оскільки на вібрацію підшипникового вузла впливають як дефекти, так і умови його роботи, при діагностиці необхідно визначити особливості роботи підшипника ковзання, а потім надавати рішення про працездатності усього вузла з урахуванням виду і глибини дефектів. Ознаками появи дефектів у підшипниках є шум та вібрації при роботі. Для виявлення та ідентифікації дефектів підшипників ковзання необхідні вимірювання спектрів високочастотної вібрації, що огинає, і спектра вібрації всього підшипникового вузла на низьких і середніх частотах.

Оскільки, як показує статистика, події відмов являють собою зміни в характеристиках вібраційних сигналів, в якості методів досліджень використовувалися результати цифровізації та спектрального аналізу вібраційних характеристик, що генеруються при роботі суднових підшипників. Для реалізації заходів по вибору оптимальних інформаційних параметрів діагностики суднового обладнання використовувався набір статистичних характеристик вібраційних сигналів у частотній та часовій області.

Структура вібраційних сигналів включає сукупність діагностичних ознак різної величини та розмірності. У цих умовах пріоритетність використання конкретних ознак вібраційних сигналів пов'язується з результативністю діагностики та вивчення трендів для прогнозування працездатного стану обладнання при його експлуатації в складних умовах зовнішнього оточення.

Вібромоніторинг підшипників полягає у безпосередньому вимірі частот вібросигналів та аналізі їх статистичних характеристик після математичної обробки.

На рис. 4.3 в одному масштабі показано весь набір отриманих вібраційних сигналів у порядку їхнього виникнення та фіксації в процесі 50-денного терміну експлуатації підшипника ковзання, що дає наочне уявлення про зміну пікових амплітуд.

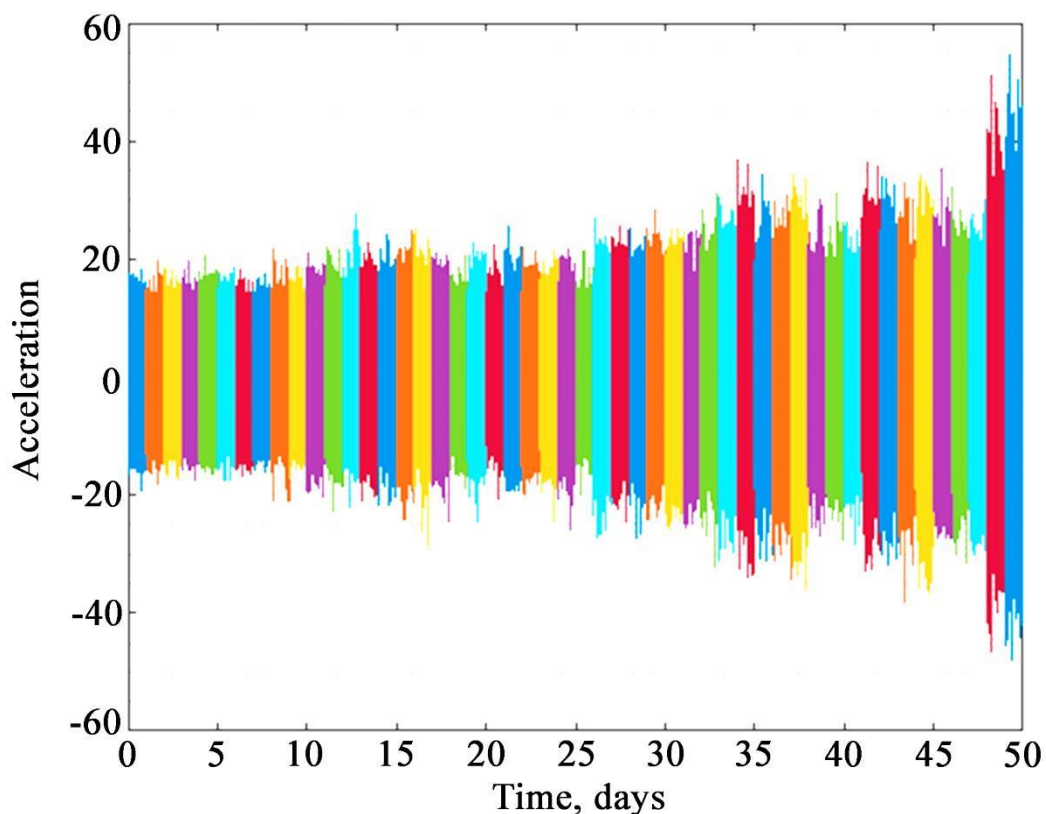


Рис. 4.3 – Послідовність отриманих вібраційних сигналів у порядку їх виникнення в процесі експлуатації підшипника ковзання

Під час постобробки діагностичної інформації було визначено статистичні характеристики вібросигналів у тимчасовій і частотній областях. У тимчасовій ділянці визначали 11 статистичних характеристик: середнє значення (Mean), стандартне відхилення (Std), асиметрія (Skewness), ексцес (Kurtosis), повний розмах коливань (Peak2Peak), середньоквадратичне значення (RMS), хрест-фактор (CrestFactor), форм-фактор (ShapeFactor), імпульсний фактор (ImpulseFactor), граничний фактор (MarginFactor), енергія (Energy). У частотній області визначали 4 статистичні характеристики: середнє спектральне значення (SKMean), стандартне спектральне відхилення (SKStd), спектральна асиметрія (SKSkewness) і спектральний ексцес (SKKurtosis). Усі перераховані статистичні характеристики вібросигналів можуть слугувати потенційними індикаторами деградації стану підшипника (рис. 4.4).

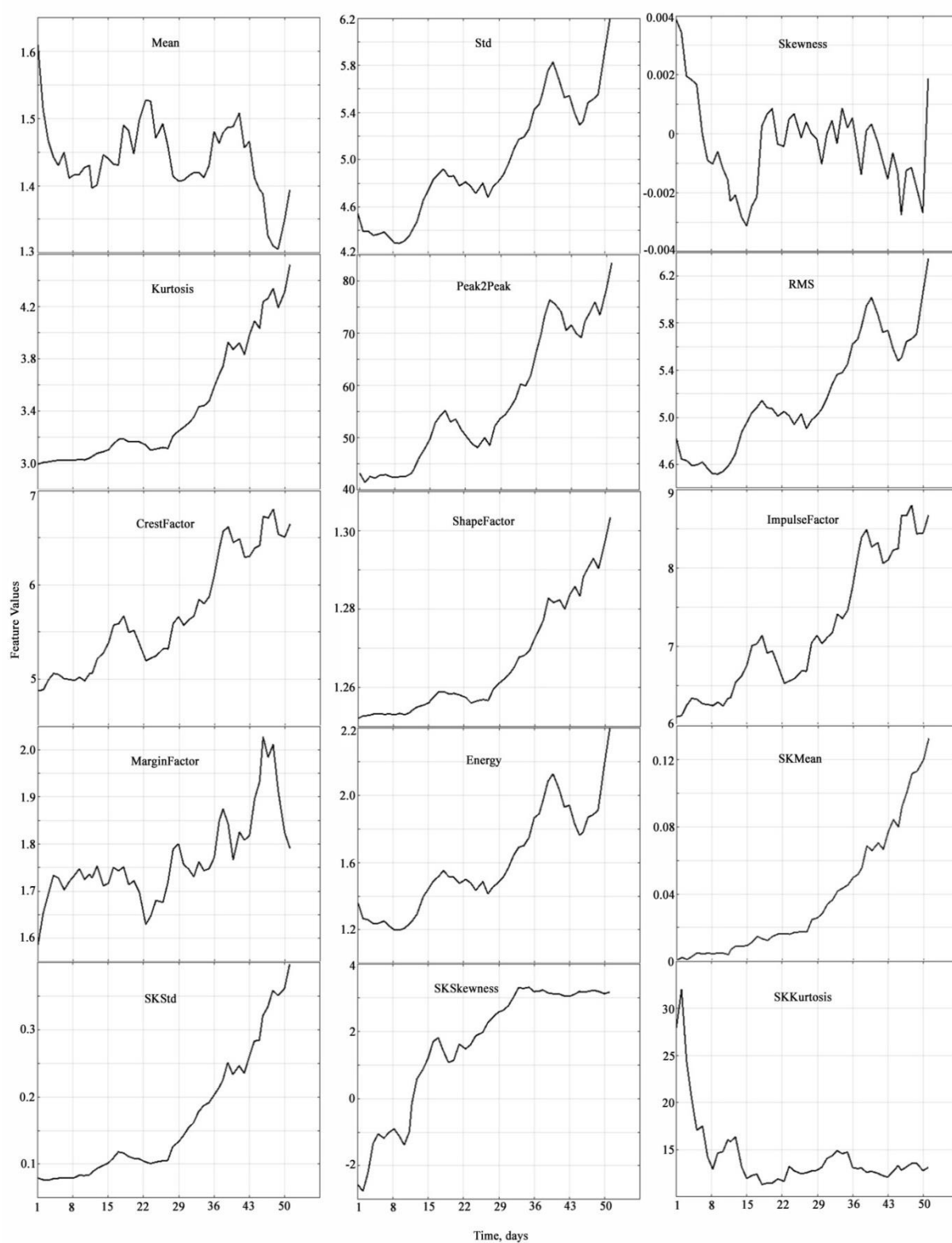


Рис. 4.4 – Еволюція безрозмірних статистичних характеристик вібраційних сигналів у процесі експлуатації підшипника ковзання

Для забезпечення точності ПЗР до цих статистичних характеристик застосовано процедуру фільтрації та згладжування.

Аналіз залежностей наведених на рис. 4.4 не дозволяє однозначно віддати перевагу будь-яким статистичним характеристикам вібраційних сигналів і які можна використовувати як індикатор стану підшипника ковзання при експлуатації у складних умовах.

У ряді випадків при проведенні досліджень, коли об'єкти, що діагностуються, або процеси їх експлуатації надмірно складні, а розуміння механізму процесів недостатньо, неможливо побудувати аналітичні детерміновані залежності, засновані на явищах перенесення або балансу різних величин. Такі завдання можуть бути вирішені лише шляхом побудови багатofакторної математичної моделі.

4.2. Метод багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик моніторингу судових підшипників ковзання

Основним завданням ідентифікації та ПЗР транспортних засобів у процесі експлуатації є спостереження за зміною механічних властивостей матеріалів при накопиченні пошкоджень, а також визначення параметрів провісників виникнення інформаційних сигналів під час руйнування обладнання.

Вібродіагностика є найефективнішим методом визначення технічного стану різних механізмів роторного типу. У більшості практичних випадків відмовам передували зміни в характеристиках вібраційного сигналу. Підшипниковий вузол багато чому визначає експлуатаційні показники роторних механізмів. Рівень вібрації служить індикатором подій про небезпеку. Тому моніторинг стану підшипників є основою діагностики роторного обладнання.

Вібраційні сигнали є багатокомпонентними, тобто являють собою кінцевий адитивний набір різномасштабних компонент, локалізованих частотних смуг різних типів вібрацій. Частотна структура характеризується нерегулярністю локальних особливостей різної природи. Розмаїття

статистичних характеристик вібраційних сигналів призводить до необхідності їх ранжування та пріоритетного використання, що може бути досягнуто за допомогою багатокритеріальної оптимізації.

Методи оцінювання параметрів багатокомпонентних вібраційних сигналів з використанням перетворення Фур'є широко використовуються на практиці для контролю підшипників роторного обладнання, хоча мають ряд недоліків, пов'язаних з тим, що оцінюється і аналізується лише незначна частина параметрів сигналів у тимчасовій області і не оцінюються параметри в частотній області. За наявності розподілених локальних особливостей не забезпечується якість оцінок параметрів сигналу, у разі розвитку нештатної ситуації, коли відхилення у роботі об'єкта лише починають проявлятися. Ефективність методу досить низька.

Моделі вібраційного сигналу відповідно до зміни режимів роботи динамічного об'єкта представлені в [86, 87]. Розглядається багатокомпонентна структура вібраційних сигналів, яка обумовлена різними типами вібрацій і натовість шумів. Описаний спосіб обробки багатокомпонентних вібраційних сигналів у часовій області з урахуванням їх структури та факторів. В [95-97] представлені обчислювальні алгоритми параметрів вібраційного сигналу, що оцінюються в частотній області, які характеризують потенційно небезпечні явища на основі перетворень Фур'є. Зазначається, що вібраційні сигнали устаткування, що експлуатується у складних і змінних умовах роботи і можуть бути оцінені з урахуванням частотно-часового аналізу. В [98] представлено метод нелінійного аналізу часових рядів для моніторингу стану підшипників. Динамічним інструментом провісників виникнення сигналів пропонується вважати ентропію, яка наведена у вигляді статистичної міри характеристик сигналу. Характеристики зносу при контакті ковзання та кочення з використанням особливостей вібрації, викликані тертям, представлені в [99]. Досліджено механізм фрикційної вібрації та прогнозування сили опору навантаження на основі моделювання морфології доріжок кочення. У [100, 101] представлений

механізм багатоходових вибірок вібраційних сигналів. Наявність несправностей у роботі устаткування можна розглянути як нестационарний сигнал, поширення якого у [102] розглядається з допомогою Марковської моделі. Наголошується, що представлені методології дозволяють заздалегідь знаходити точки початкової деградації стану обладнання. Вилучення ознак та характеристик сигналів вібрації підшипників кочення на основі об'єднання та екранування багато параметричної інформації описано в [103]. У методі використовується вейвлет-паketне розкладання сигналу вібрації підшипників кочення для поєднання значень асиметрії, ексцесу та перестановки для ідентифікації інформації про характер несправності. Подібні роботи зі злиття даних контрастного навчання [104], статистичних та нелінійних методів обробки сигналів [105] та прогнозування стану підшипників з використанням методу головних компонент [89] використовують кореляцію сигналів від декількох джерел для здійснення діагностики механічного обладнання.

Кінематичні частоти устаткування, що обертається, ідентифіковані за допомогою розрядженого кодування знайдені в [106]. Показано, що швидкість активації вібраційних сигналів під час машинного навчання є одним із індикаторів стану підшипників, що може бути використане для автоматичного виявлення несправностей.

Окрему групу робіт із встановлення характеристик стану обертового роторного обладнання складають праці із застосуванням дисперсійної ентропії [107, 108], ентропії перестановок [109], двовимірної багатомасштабної ентропії дробової дисперсії [110], промислового виробництва [70]. При використанні цих методів велика кількість інформації фільтрується в просторових багатомірних динамічних характеристик обсягів діагностування.

Нові методики оцінки глобальних рівнів вібрації в підшипниках кочення машин, описані в [111, 112]. Обговорюються можливості діагностики з урахуванням характеристик вібраційних сигналів: спектральної щільності потужності, ексцесу, залишкової енергії.

У багатокритеріальному підході до вибору оптимальних діагностичних характеристик моніторингу підшипників використовуються альтернативні рішення в кількісному вираженні ефективності їх вкладу в загальну ефективність діагностики.

Основними прийомами в багатокритеріальному підході є згортання критеріїв, оптимізація за основними критеріями та метод послідовних поступок. Головним невирішеним завданням багатокритеріального підходу до вибору оптимальних діагностичних характеристик діагностики стану обладнання є еквівалентність заміни вихідних критеріїв загальними агрегованими критеріями.

Ефективність діагностики залежить від швидкості розвитку дефекту і може визначатися параметрами оптимізації, заснованими на зміні траєкторії основного діагностичного параметра. Ці параметри можуть бути використані як рядки матриці ефективності діагностики. Матриця ефективності діагностики R має вигляд [124]:

$$R = \begin{pmatrix} & \Pi_1 & \Pi_2 & \dots & \Pi_j \\ q_1 & \delta y_{11} & \delta y_{12} & \dots & \delta y_{1j} \\ q_2 & \delta y_{21} & \delta y_{22} & \dots & \delta y_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_i & \delta y_{i1} & \delta y_{i2} & \dots & \delta y_{ij} \end{pmatrix}$$

де $q_1 \dots q_i$ – характеристики вібраційного сигналу,

$\Pi_1 \dots \Pi_j$ – параметри оптимізації,

i – номер рядка,

j – номер стовпця.

Для визначення елементів матриці використовується оцінка скалярного вектора та його ранжування методом пріоритетних переваг. Перехід від вектора до скаляризації об'єктів здійснюється через функції згортки векторного аргументу $y_i = y_{i1} \dots y_{ij} \dots y_{in}$ в їх скалярне відображення $\delta y_{ij} = f_{y_i}$, що зменшує кількість критеріїв.

Для компенсації малих значень критеріїв більшими значеннями інших застосовується нормалізація. Згортка критеріїв є середньозваженим

значенням вихідних критеріїв і проводиться за допомогою завдання коефіцієнтів вихідних критеріїв і подальшої екстримізації на множині допустимих альтернатив. Нормалізація є умовою приведення до єдиної шкали.

Відносне відхилення δy_{ij} j -го ознака від оптимального значення визначається таким чином [124]:

$$\delta y_{ij} = \begin{cases} \frac{|y_{ij} - c_j|}{y_{j,\max} - c_j}; & y_{ij} > c_j \\ \frac{|y_{ij} - c_j|}{c_j - y_{j,\min}}; & y_{ij} < c_j \end{cases},$$

В якості c_j необхідно вибирати найкращі з погляду розв'язуваної задачі значення аналізованих параметрів. Це можуть бути максимальні або мінімальні значення з експериментальної вибірки. За такого підходу ця формула переведе розмірні величини у відносні в межах шкали (0.1). Однак, за такого вибору параметрів c_j обов'язково спостерігатимуть їх збіг з відповідними елементами матриці ефективності діагностики, які збігаються з величиною c_j , що призведе до $\delta y_{ij} = 0$. У разі використання адитивної згортки це призводить до випадання відповідної ознаки із загальної оцінки об'єкта, а в разі використання мультиплікативної згортки - до її обнулення.

Одним зі способів виключення таких ситуацій є розширення верхньої (для максимуму) або нижньої (для мінімуму) межі кожної ознаки c_j в однаковому процентному співвідношенні. У роботі максимальні (мінімальні) значення кожного з аналізованих параметрів c_j було збільшено (зменшено) на 1%.

Як стовпці матриці ефективності можуть бути використані критерії теорії статистичних рішень (табл. 4.2) [94].

У представлених формулах таблиці 4.2 ρ – індекс песимізму, який у звичайних розрахунках приймається рівним 0,5, ω_j – ваговий коефіцієнт j -го параметра оптимізації.

Таблиця 4.2 – Критерії теорії статистичних рішень

Назва критерію оптимізації	Принципи організації	Розрахункові формули	Стратегія поведінки
Лапласа	Орієнтація на оптимістичний розвиток ситуації	$L = \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} \delta y_{ij}$	Наступальна, ігнорування ризику
Вальда	Орієнтація на песимістичний розвиток ситуації	$W = \max_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} \delta y_{ij}$	Стратегія неминучості та фаталізму
Гурвіця	Песимізму-оптимізму	$H_z = \max_{1 \leq i \leq m} \left\{ \rho \min_{1 \leq j \leq n} \delta y_{ij} + (1 - \rho) \max_{1 \leq o \leq m} \delta y_{ij} \right\}$	Перестраховання у найгірших умовах
Аддитивний згортка	Сукупне значення окремих характеристик з урахуванням їхньої важливості	$y_a = \delta y_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \delta y_{ij}$	Мінімізація суми відхилень
Мультиплікативна згортка	Узгоджені оцінки всіх характеристик	$y_{ms} = \delta y_i = \prod_{j=1}^n (\delta y_{ij})^{\omega_j}$	Мінімізація творів відхилень
Додаткова мультиплікативна згортка	Виняток нульових значень	$y_{md} = \delta y_i = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \omega_j \delta y_{ij})$	Мінімізація відхилень

Найважливішими перевагами багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик та в цілому діагностики суднових підшипників кочення є:

- безперервність і стабільність показників та індикаторів;
- періодичність отримання інформації;
- обробка та агрегування зібраної інформації;
- інтеграція функції моніторингу в систему безаварійної роботи обладнання.

Основними етапами багатокритеріального підходу до вибору оптимальних діагностичних характеристик суднових підшипників є робота з кількісною експериментальною інформацією, математичні розрахунки, зберігання та обмін інформацією, інтерпретація результатів.

В якості апріорної інформацію слід використовувати режими, навантаження, хронологію діагностичних змін, умови експлуатації. При формуванні кількості експериментальної інформації слід враховувати ознаковий простір та постобробку статистичних характеристик. Головною ціллю синтезу математичних моделей є перетворення вхідної інформації для роботи в діалоговому режимі. Для цього необхідно подання інформації згідно накопичення пошкоджень. Алгоритм багатокритеріальної оптимізації наведено на рис. 4.5 [113].

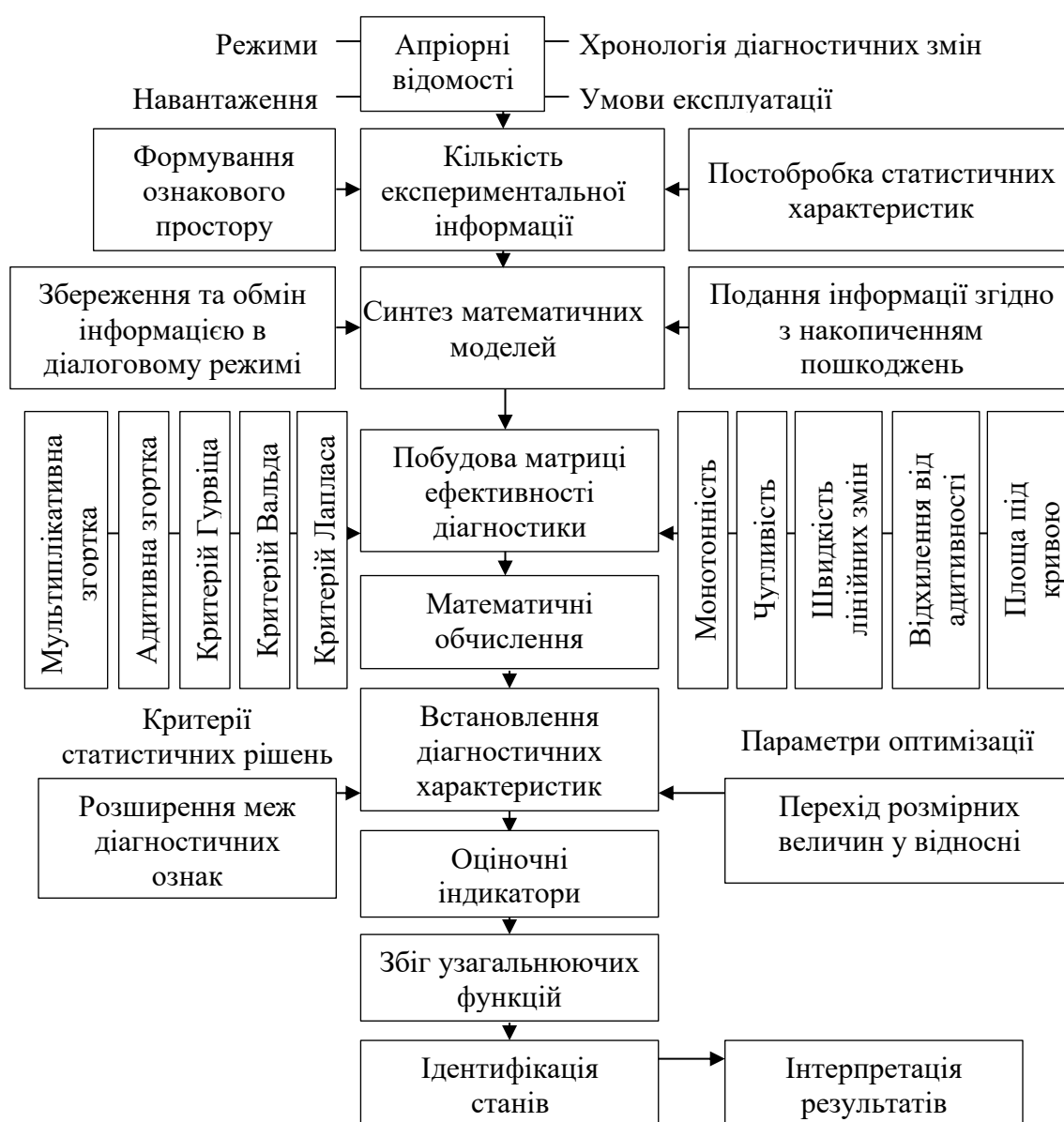


Рис. 4.5 – Алгоритм багатокритеріальної оптимізації

При побудові алгоритму враховувалися можливості декларативного опису стану, виробництва обчислень у діалоговому режимі, синтезу математичних моделей розв'язання слабоструктурованих та погано формалізованих завдань.

Реалізація розробленого алгоритму виконана на основі вібродіагностики суднових підшипників ковзання TPL-88. Вимірювання проводили на корпусі підшипникового вузла, а саме в нижній його частині, оскільки тут навантаження на вузол максимальні. Сигнали від датчиків можна оцифрувати і записати для аналізу тенденцій. Для реєстрації рівнів вібрації використовують акселерометр. Вібраційний сигнал тривалістю 6 с отримували щодня протягом 50 днів поспіль. Виникла несправність підшипника, що призвела до виходу його з ладу.

Щоб визначити найбільш оптимальну характеристику для проведення моніторингу стану підшипника ковзання, було проведено багатокритеріальну оптимізацію за п'ятьма параметрами траєкторії діагностичного сигналу з різними ваговими коефіцієнтами ω , в якості яких обрані параметри, що відносяться до фізичного сенсу вібродіагностики та вказані їх експертні оцінки:

- монотонність ($\omega = 0,25$);
- чутливість ($\omega = 0,25$);
- швидкість лінійної зміни ($\omega = 0,20$);
- відхилення від адитивності ($\omega = 0,15$);
- площа під кривою ($\omega = 0,15$).

Для визначення інших параметрів оптимізації кожен дискретну статистичну характеристику вібросигналу було апроксимовано безперервною нелінійною функцією f_1 у вигляді кубічного сплайна, лінійною функцією f_2 , отриманої методом найменших квадратів і лінійною функцією f_3 на фінальному проміжку передруйнування 40...50 днів, отриманої також методом найменших квадратів. На рис. 4.6 показано приклад таких апроксимацій для ексцесу. Вибір лінійного тренда для функцій f_2 та f_3

пояснюється його найбільшою оптимальністю для проведення моніторингу підшипників ковзання.

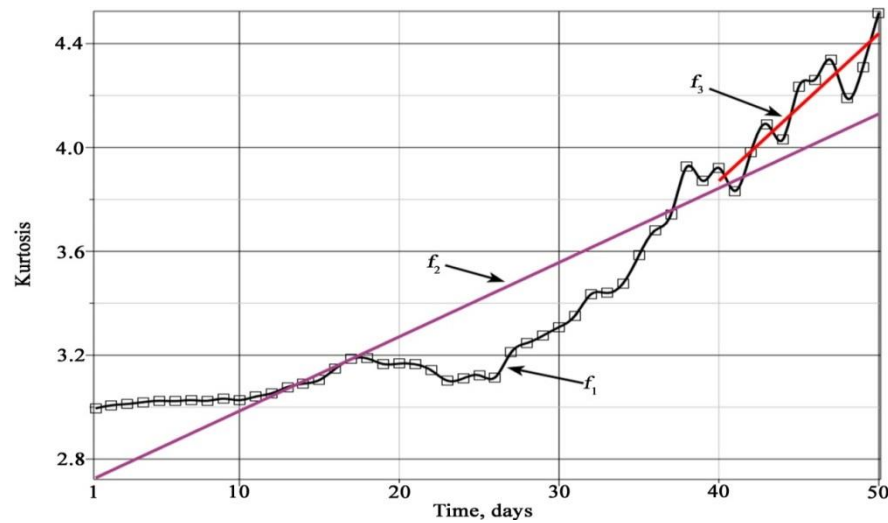


Рис. 4.6 – Апроксимація статистичної характеристики вібросигналу:

f_1 – безперервна нелінійна функція у вигляді кубічного сплайна,
 f_2 – безперервна лінійна функція, f_3 – безперервна лінійна функція в зоні передруйнування, точками показані експериментальні дискретні значення статистичної характеристики

Після проведених апроксимацій відповідні параметри оптимізації визначалися таким чином:

чутливість

$$\Delta = \frac{df_3}{dt}$$

швидкість лінійної зміни

$$\nu = \frac{df_2}{dt}$$

відхилення від адитивності

$$\varepsilon = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i f_{1i} - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n f_{1i}}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n f_{1i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n f_{1i} \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2 \right]}}$$

площа під кривою

$$S = \int_1^n f_1 dt$$

Результати обчислення параметрів оптимізації для кожної статистичної характеристики вібросигналів наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Значення параметрів оптимізації для статистичних характеристик вібросигналів

Показники	Моно- тонність	Чутливість	Швидкість лінійної зміни	Відхилення від адитивності	Площа під кривою
Середнє значення (Mean)	0,1600	0,0159	0,0015	0,4103	46,6570
Стандартне відхилення (Std)	0,3600	0,0416	0,0319	0,9250	243,3900
Асиметрія (Skewness)	0,2600	0,0001	0,0002	0,2798	0,0219
Експес (Kurtosis)	0,5800	0,0567	0,0286	0,9152	167,6600
Повний розмах коливань (Peak2Peak)	0,4650	0,9143	0,8115	0,9431	2788,100
Середньоквадратичне значення (RMS)	0,1600	0,0387	0,0313	0,9220	246,5500
Хрест-фактор (CrestFactor)	0,3600	0,0289	0,0392	0,9389	280,7100
Форм-фактор (ShapeFactor)	0,5800	0,0020	0,0009	0,8700	62,1400
Імпульсний фактор (ImpulseFactor)	0,3600	0,0503	0,0558	0,9408	356,5100
Граничний фактор (MarginFactor)	0,2600	0,0023	0,0042	0,6639	90,0130
Енергія (Energy)	0,1600	0,0282	0,0190	0,9132	73,6190
Середнє спектральне значення (SKMean)	0,1600	0,0064	0,0023	0,9255	1,8038
Стандартне спектральне відхилення (SKStd)	0,3600	0,0157	0,0059	0,9239	5,5387
Спектральна асиметрія (SKSkewness)	0,2600	0,0099	0,0840	0,9197	97,7310
Спектральний експес (SKKurtosis)	0,0450	0,0986	0,1847	0,8270	531,9900

Розраховані відносні відхилення δy_{ij} параметрів статистичних характеристик вібросигналів від оптимального значення, а також значення згорток і критеріїв подано в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Матриця безрозмірних значень параметрів оптимізації статистичних характеристик вібросигналів, значення згорток і критеріїв

Статистична характеристика	Монотонність	Чутливість, Δ	Швидкість лінійної зміни, ν	Відхилення від адитивності, ε	Площа під кривою, S	min	max	Адитивна згортка, y_a	Мультиплікативна згортка, y_{ms}	Додаткова мультиплікативна згортка, y_{md}
Mean	0,787	0,982	0,998	0,806	0,983	0,787	0,998	0,910	0,905	0,636
Std	0,417	0,955	0,961	0,040	0,913	0,040	0,961	0,678	0,481	0,527
Skewness	0,602	1,000	1,000	1,000	1,000	0,602	1,000	0,900	0,881	0,631
Kurtosis	0,010	0,938	0,965	0,055	0,940	0,010	0,965	0,579	0,201	0,475
Peak2Peak	0,223	0,009	0,009	0,014	0,009	0,009	0,223	0,063	0,022	0,063
RMS	0,787	0,958	0,962	0,045	0,912	0,045	0,962	0,772	0,573	0,577
CrestFactor	0,417	0,968	0,952	0,020	0,900	0,020	0,968	0,675	0,433	0,526
ShapeFactor	0,010	0,997	0,999	0,122	0,977	0,010	0,999	0,617	0,233	0,498
ImpulseFactor	0,417	0,945	0,932	0,017	0,873	0,017	0,945	0,660	0,417	0,517
MarginFactor	0,602	0,997	0,995	0,429	0,968	0,429	0,997	0,808	0,770	0,591
Energy	0,787	0,969	0,977	0,058	0,973	0,058	0,977	0,789	0,605	0,585
SKMean	0,787	0,993	0,997	0,040	0,999	0,040	0,999	0,800	0,580	0,591
SKStd	0,417	0,983	0,993	0,042	0,998	0,042	0,998	0,704	0,497	0,542
SKSkewness	0,602	0,989	0,897	0,048	0,965	0,048	0,989	0,729	0,543	0,554
SKKurtosis	1,000	0,893	0,774	0,186	0,811	0,186	1,000	0,777	0,695	0,579
		Vald	Laplas	Bayes						
		0,223	0,009	0,504						

Обчислення проводилися за допомогою системи комп'ютерної математики Maple.

Вирішенням завдання багатокритеріального підходу до вибору оптимальних діагностичних характеристик моніторингу суднових підшипників ковзання вважається елемент, який максимізує або мінімізує оцінну функцію. Для багатокритеріальної векторної оптимізації максимізація одного критерію відбувається за мінімізації інших. Використовуючи дані таблиці 4.3 знаходимо екстремальні значення відхилень від заданого експертами пріоритетного розташування цілей.

Для остаточного висновку щодо оптимальної для діагностики підшипників кочення статистичної характеристики необхідно враховувати збіги за різними узагальнювальними функціями та ступінь адекватності кожної узагальнювальної функції розв'язуваному завданню. Аналіз результатів наведених у табл. 4.3 показує, що адитивна згортка, мультиплікативна згортка, додаткова мультиплікативна згортка, критерії Лапласа і Вальда однозначно вказують на пік-фактор (Peak2Peak) як найоптимальнішу для моніторингу стану підшипника ковзання характеристику.

Вібромоніторинг підшипників ковзання СЕУ дає змогу в кожен момент часу знайти їхній стан і завчасно визначати можливі проблеми подальшої експлуатації, пов'язані зі зміною навантажень, часом їх використання на максимальних чи мінімальних значеннях, зміною швидкості обертання та інших режимів функціонування обладнання. Крім того, аналіз частоти появи несправностей у роботі підшипників дозволяє критично розглянути період міжремонтного циклу та проведення діагностичних робіт.

Складна структура вібраційних сигналів і різноманіття їхніх стохастичних характеристик зумовлює необхідність їхнього ранжування та пріоритетності їхнього використання. Вібраційні сигнали є багатокомпонентними, тобто являють собою скінченний адитивний набір різномасштабних компонент, локалізованих за частотними смугами різних

типів вібрацій. Запропоновано новий діагностичний параметр моніторингу стану суднових підшипників, заснований на аналізі багатокритеріальних оцінок характеристик вібраційних сигналів. Як параметри оптимізації стохастичних характеристик вібраційних сигналів використано особливості траєкторії їхньої зміни під час навантаження: монотонність; швидкість зміни; чутливість до визначення ЗР; відхилення від адитивності; енергію, витрачену на розвиток дефекту.

Новизною багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик є складання матриці ефективності, рядки якої представлено статистичними характеристиками вібросигналів, стовпчики - критеріями статистичних рішень Лапласа, Вальда, Гурвіца, адитивної, мультиплікативної та адитивної мультиплікативної згортки, а її елементи - практичними результатами вібродіагностики підшипників ковзання. Результати розрахунків показали, що динамічними провісниками деградації матеріалу під час навантаження є особливості пік-фактора вібраційного сигналу. Характер змін пік-фактору у різних зонах деградації матеріалів підшипників ковзання при їх експлуатації наведено на рис. 4.7.

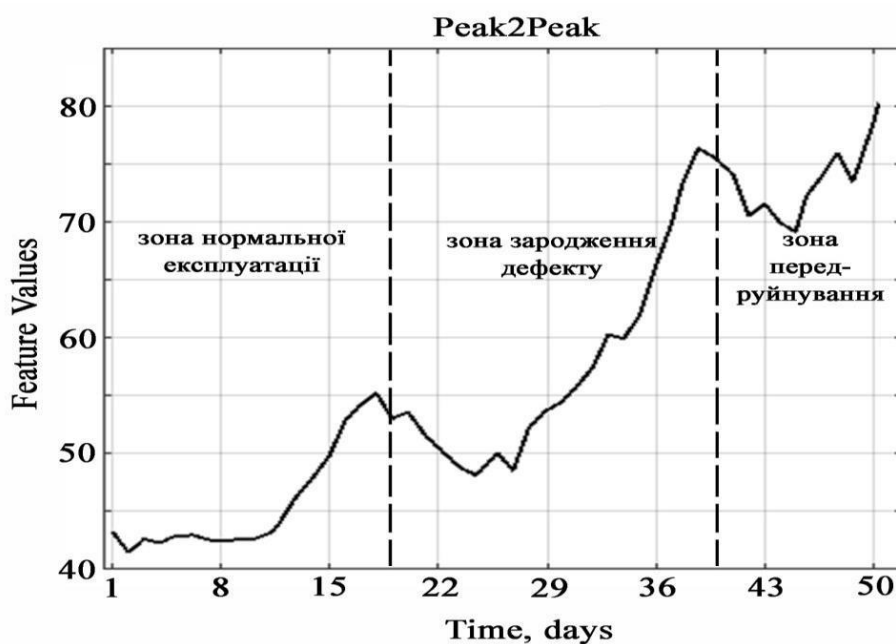


Рис. 4.7 – Новий діагностичний параметр оцінки стану підшипника ковзання у процесі експлуатації

Впровадження цього діагностичного параметра дає змогу здійснити моніторинг стану деталей СЕУ без зупинки обладнання.

Процес діагностики стану підшипників ковзання протягом їх експлуатації це набір експериментальної інформації у вигляді статистичних характеристик вібросигналів, проіндексованих безліччю вимірювань у частотній та часовій області.

Завдяки аналізам вібрації користувач отримує інформацію про технічний стан і наближення до деградації матеріалу. Інтеграція вібромоніторингу в локальну мережу безпеки та надійності обладнання дасть змогу збирати й аналізувати дані з видачою інформації в будь-якому зручному місці або налаштувати на автономну роботу.

Цільовою функцією багатокритеріального аналізу при виборі оптимальних діагностичних характеристик суднових підшипників є інтелектуалізація процесів, що супроводжують еволюцію пошкоджень матеріалу в складних умовах експлуатації. Спрямованість такої оптимізації визначається масштабованістю та адекватністю до робочих навантажень. Складна структура вібраційних сигналів та багатокомпонентність їх статистичних характеристик, локалізованих по частотних смугах різних типів вібрації, вимагає залучення експериментальної інформації та ймовірнісної динаміки настання відмов. Для цього використані ланцюги Маркова. З допомогою ланцюгів Маркова вирішуються якісні сторони слабоструктурованих завдань, розв'язання яких представлено в термінах умовних ймовірностей.

Використання критеріальних методів дає кількісну оцінку, а кінцевий результат найкраще поєднується з результатами обох напрямків і є основою застосування цільових функцій для підвищення достовірності вибору оптимальних діагностичних показників та прогнозування стану деталей СЕУ у процесі експлуатації. Перспективним напрямком подальших досліджень є стан гібридних моделей кількісних та якісних методів обробки діагностичної інформації.

Спостереження за станом об'єкта діагностики за допомогою аналізу пік-фактора є надійним засобом фіксації подій змін, що відбуваються при експлуатації деталей. Розрахунок ефективності діагностики підшипника кочення VTR304P11/021 турбокомпресора NR34/S102 головного двигуна MAN B&W 32/40 наведено у Додатку Г.

Разом з тим, чітко визначити величину ЗР об'єкта діагностування за допомогою багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик моніторингу судових підшипників ковзання дуже важко. Для вирішення цих завдань пропонується прогнозна експоненційна модель стану судових підшипників ковзання.

4.3. Експоненційна модель прогнозу стану судових підшипників ковзання

Організація моніторингу та прогнозування шляхом спостережень за станом працюючого обладнання є засобом підвищення його надійності та безвідмовності. Досвід створення моделей прогнозування та деградації технічного стану динамічного обладнання на основі аналізу механічних коливань описаний у [114]. У [91] докладно розглянуто результати вібраційних характеристик, наведено класифікацію дефектів, на основі якої обґрунтовано використання конкретних методів віброаналізу.

У [115] описаний статистичний аналіз відмов та причин їх виникнення. Особливостям моніторингу елементів транспортних технологій присвячені роботи [116-118]. Показано, що своєчасне виявлення зародження та розвитку дефектів у підшипниках, компресорах, турбінах високошвидкісного технологічного обладнання є основою безпеки транспортних пристроїв. Частотно-часовий аналіз корисного терміну служби підшипників представлений в [90]. Поліпшена модель деградації міцності для прогнозування втомної довговічності з урахуванням характеристик матеріалу представлено в [119]. Модель має високу точність прогнозу, проте її

реалізація пов'язана з великою кількістю труднощів урахування впливу супутніх факторів. Прогноз терміну служби високочастотного підшипника ковзання представлений в [120]. Водночас слід зазначити, що проблема оцінки аномалій у трендах залишається поза увагою. Прогноз терміну служби сферичних підшипників ковзання на основі моделі фізики відмов та прискорених випробувань на деградацію представлений у [121]. Точність прогнозу визначається кількістю діагностичних вимірів, що стримує широке застосування методу.

Розглянуто деякі аспекти математичного, алгоритмічного та програмного апарату моделювання моніторингу стану суднового енергетичного обладнання та надано розробку прогнозної моделі зміни технічного стану за параметрами генерованої вібрації. Для зменшення розмірності вхідної інформації використано метод головних компонент. Наведено результати цифровізації та спектрального аналізу віброакустичних характеристик, що генеруються при роботі динамічного обладнання суднових підшипників ковзання. Встановлено різке збільшення першого головного компонента в порівнянні з рештою та монотонне його наростання при деградації властивостей матеріалів. Показано, що розробка прогнозних моделей зміни технічного стану за параметрами вібрації є кроком переходу на якісно нові форми проведення технічного обслуговування та ремонту, необхідного для забезпечення безпеки обладнання.

Фізичні процеси, які є у підшипниках ковзання при їх експлуатації залежать від особливостей конструкції підшипників і від співвідношення багатьох зовнішніх і внутрішніх чинників, які визначають умови роботи підшипника.

Суднові підшипники ковзання з антифрикційним шаром із сплавів на основі олова та свинцю використовують на суднових мало- та середньо-обертових дизелях, турбінах, валопроводах. За своїм конструктивним виконанням і прямим призначенням вони являють собою опори деталей, що обертаються, і є найбільш відповідальними вузлами енергетичного

обладнання.

Робота підшипників ковзання заснована на принципах тертя ковзання, для реалізації яких потрібен постійний контроль мастила. Внутрішнє кільце виготовляють з матеріалу, що має антифрикційну дію для того, щоб забезпечити низький коефіцієнт тертя, зовнішнє - з високоміцного матеріалу. Переваги підшипників ковзання полягають у стійкості до радіальних навантажень та вібрацій, роз'ємності конструкцій, що спрощує монтаж та техобслуговування, нижчими показниками шуму при роботі. Недоліком є велике зношування дотичних поверхонь. Причинами дефектів є мінливість швидкості обертання валу за зміни режиму роботи, різна ступінь зношеності елементів тощо.

Основною причиною виникнення дефектів у підшипниках ковзання є абразивне зношування сполучених поверхонь цапфи валу і вкладишів, внаслідок попадання на контактну поверхню різних частинок, що знаходяться в мастильних матеріалах і перепадів навантажень, що призводять до напівсухого тертя при запуску та зупинки підшипника. Дефекти вкладишів підшипника свідчать про проблеми роботи дизеля. Якщо вкладка пропрацювала тривалий час, на його поверхнях будуть виявлені різні дефекти. Під вагою ротора та інших статичних навантажень у підшипнику ковзання можуть виникнути коливальні сили кінематичного та імпульсного характеру, які спричинені дією сил тертя. Крім цих сил у підшипниках ковзання можуть спостерігатися вібрації з частотою 0,42...0,48 від частоти обертання, що збуджуються автоколиваннями ротора на масляному клині. Удари гідродинамічного походження зумовлені короткочасною появою кавітаційних зон.

В даний час для оцінки технічного стану підшипників ковзання використовуються методи обробки вібросигналів у частотній та частотно-часовій області. Найбільшого поширення набули спектральні методи вібраційної діагностики з урахуванням перетворення Фур'є, де кожному дефекту устаткування ставиться у відповідність набір дискретних частот. У

зв'язку з тим, що дефекти підшипників ковзання генерують як низькочастотну, так і високочастотну вібрацію, їх діагностика проводиться спільним аналізом спектра низькочастотної вібрації та спектру вібраційного сигналу, що огинає. Моніторинг технічного стану та діагностика дефектів, що виникають, є основою забезпечення високої надійності елементів обладнання. По сукупності дефектних частот, виявлених у досліджуваному частотному діапазоні робиться висновок про дефект і рівень його розвитку. Недоліком спектральних методів є низька ефективність обробки нестационарних сигналів через розмиття спектрів.

Проміжок часу до появи перших ознак втоми матеріалу залежить від частоти обертання підшипника та величини навантаження. Фактична довговічність підшипників ковзання виявляється нижчою за розрахункову внаслідок високих навантажень і недостатнього змащування, а також неправильного вибору мастильного матеріалу та помилок при монтажі. Вивчення можливостей методів та моделей спостереження за розвитком дефектів у підшипнику ковзання в реальному часі представляє не лише науковий, а й великий практичний інтерес.

Як гіпотезу в аналізі моніторингу вібраційних сигналів, отриманих при експлуатації підшипників ковзання, обрана експоненційна модель деградації матеріалу при зовнішніх екстремальних навантаженнях [122].

Як матеріали для аналізу вібродіагностичних сигналів використовувалися судові підшипники ковзання марки TPL-88. Їхні параметри наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 - Параметри підшипника TPL-88

Максимальна частота обертів валу, об/хв	Внутрішній діаметр підшипника, мм	Зовнішній діаметр підшипника, мм	Маса, кг	Антифрикційне покриття
12000	114,073	164,672	7,7	CuPb15Sn

Розміщення підшипників ковзання головному двигуні наведено на рис. 4.8 [93].

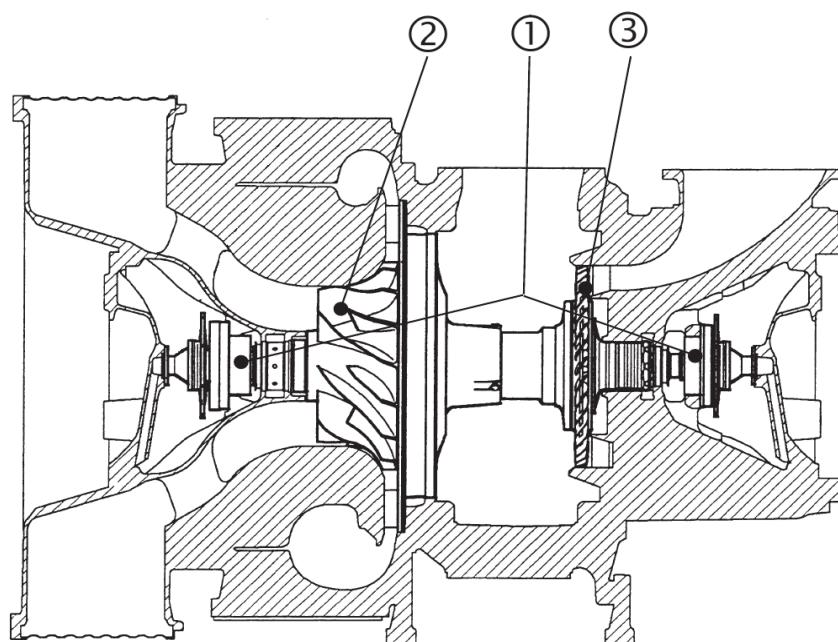


Рис. 4.8 – Розміщення підшипників ковзання на двигуні:

1 – підшипник ковзання; 2 – компресор; 3 – турбіна

У рамках прогнозної моделі повинен бути відсутнім процеси старіння та зносу. Ця модель повинна використовувати для апроксимації невідомої інтенсивності відмов на етапі нормальної експлуатації в припущенні, що інтенсивність відмов залишається постійною.

Модель прогнозу деградації суднових підшипників ковзання екстраполує минулу поведінку, щоб передбачити майбутнє. Цей тип обчислень підходить при визначенні корисного терміну служби складного обладнання. Далі слід використовувати профіль деградації тестового компонента, для того щоб статистично обчислити час, що залишився поки діагностичний показник не досягне деякого рівня деградації узгодженого з нормативними документами на експлуатацію пристрою.

Експоненційна модель прогнозу деградації [122] на початковому етапі її використання передбачає, що функція інтенсивності відмов $\lambda(t)$ постійна під час експлуатації підшипника ковзання:

$$\lambda(t) = \text{const} > 0$$

Ймовірність його безвідмовної роботи

$$P(t, \lambda) = \exp(-\lambda t)$$

Відповідно ймовірність відмов підшипника

$$Q(t, \lambda) = 1 - P(t, \lambda) = 1 - \exp(-\lambda t)$$

Інтенсивність відмов при накопиченні пошкоджень описується розподілом Вейбулла

$$\lambda(t, \alpha) = \alpha(\lambda, t)^{\alpha-1}, t > 0, \alpha > 0, \lambda > 0$$

де α - показник інтенсивності.

Ймовірність безвідмовної роботи за час t рівна

$$Q(t) = 1 - \exp(-(\lambda t)^\alpha)$$

Якщо $\alpha > 1$ функція інтенсивності відмов монотонно зростає, що визначає процеси зносу та старіння устаткування.

Проведення технічного обслуговування судових підшипників кочення на основі інтерактивного моніторингу стану, виявлення несправностей та прогнозування ресурсу енергетичного обладнання потребує при реалізації цілого набору інформаційних характеристик: амплітудних, тимчасових, частотних тощо. Зменшити їх розмірність без істотної втрати вхідної інформації дозволяє метод головних компонент [123]. Метод головних компонент, що працює з безперервними потоками даних дозволяє уникнути багатомірності і виділяти тільки основні характеристики об'єктів. Він покликаний розділити матрицю вихідних даних на дві частини: змістовну та шум. Метод головних компонент апроксимує n -розмірну хмару спостережень до n -мірного еліпсоїда, піввісі якого будуть головними компонентами. Прогнозна експоненційна модель дозволяє здійснити ПЗР в реальному часі на основі статистичної обробки даних та їх об'єднання. У реалізації прогнозової моделі метод головних компонент застосовується до даних, записаних у вигляді матриці чисел розмірністю $n \times m$. При підготовці даних вибірку центрують, щоб середнє значення ознак, що дорівнює нулю,

замінивши кінцеву множину точок прямими і площинами. Для кінцевого набору безлічі векторів $x_1, x_2, \dots, x_n \in R^n$, де R^n – лінійні різноманіття, потрібно знайти такі значення множини лінійних комбінацій $S_k \subset R^n$, щоб сума квадратів відхилень x_i от S_k була б мінімальною.

Лінійні різноманіття є набором головних компонент. При описі випадкової величини використовується математичне очікування, що відображає центр тяжкості цієї величини та дисперсія, що відображає її розміри як розкид. Для опису багатовимірної спеціальної величини у разі виникнення вібраційних сигналів крім математичного очікування $E(x)$ та дисперсії її проєкцій на вісь використано поняття коваріаційної матриці, елементами якої є кореляції ознак x_i та x_j [122]:

$$\text{cov}(x_i, x_j) = E[(x_i - E[x_i]) \cdot (x_j - E[x_j])]$$

У коваріаційній матриці власні значення використовуються для оцінки вкладу головних компонент у загальну чутність процесу деградації структури та фізико-механічних властивостей матеріалів, що змінюються при експлуатації у складних умовах навантаження.

Реалізаційна структура прогновної експоненційної моделі передбачає обчислення головних компонент, стандартизацію даних, приведення їх нульовому середньому і одиничної дисперсії. Алгоритм методу головних компонент є ортогональне лінійне перетворення, що відображає дані з вихідного простору ознак в новий простір лінійної розмірності. При проєктуванні основних компонент формується новий базис, знижується розмірність і зберігається найбільше інформації. Цей метод включається до аналітичних платформ і використовується на основі передобробки даних. Відцентрувавши вибірку вхідних даних, необхідно зрушувати її лінійно так, щоб середні значення ознак дорівнювали нулю. Для опису форми випадкового вектора необхідна матриця коваріації, у якої i, j елементи є кореляцією ознак x_i и x_j . Коваріаційна матриця є узагальненням дисперсії багатовимірної випадкової величини.

Обчислення основних компонент зводиться до обчислення власних векторів і значень коваріаційної матриці. У матриці по діагоналі будуть дисперсії ознак, а в інших осередках – підступи пар цих ознак.

Моделювання розподілу експоненційної ймовірнісної динаміки параметрів діагностики та прогнозування для збереження масштабу слід виконувати за допомогою логарифмічної субгармонічної функції. Випадкова величина підпорядковується до логарифмічного нормального розподілу, якщо її логарифм має нормальний розподіл.

Щільність нормального логарифмічного розподілу випадкової величини описується виразом [122]:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x} + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - m}{\sigma}\right)^2\right]$$

σ, m – параметри розподілу.

Логарифмічний нормальний розподіл випадкової величини асиметричний, якщо порівнювати його з Гаусівським нормальним розподілом випадкової величини β .

З урахуванням цих пояснень та припущень можна запропонувати аналітичне подання прогностичної експоненційної моделі стану судових підшипників ковзання.

Тоді експоненціальна модель прогнозу деградації визначається як

$$h(t) = \phi + \theta \exp\left(\beta t + \varepsilon - \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

де $h(t)$ – показник поточного стану підшипника ковзання як функція часу;

ϕ – константа перетину;

θ і β - параметри, що визначають нахил моделі;

θ - логарифмічний нормальний розподіл;

β - розподіл за Гаусом.

На кожному кроці часу t розподіл θ і β оновлюється до апостеріорного на основі останнього спостереження за $h(t)$. Параметр ε є Гаусівським білим

шумом, σ^2 – дисперсія.

Член $-\sigma^2/2$ в експоненті має змусити очікування $h(t)$ задовольняти умову

$$E[h(t) | \theta, \beta] = \phi + \theta \exp(\beta t)$$

У експоненціальній моделі прогнозу стану суднових підшипників ковзання використовується таке поняття теорії інформації як гаусівський білий шум. Гаусівський білий шум - це абстрактна математична модель стаціонарного випадкового процесу з постійною на всіх частотах спектральною щільністю, що є сумішшю звуків, що відтворюються одночасно на всіх частотах. Гаусівський білий шум абсолютно некорельований, тобто будь-яке миттєве значення шуму ніяк не пов'язане з попереднім.

При постобробці прогнозованої інформації було визначено статистичні характеристики вібросигналів у часовій та частотній областях. У часовій області визначалися 11 статистичних характеристик прогнозованої інформації: середнє значення (Mean), стандартне відхилення (Std), асиметрія (Skewness), ексцес (Kurtosis), повний розмах коливань (Peak2Peak), середньоквадратичне значення (RMS), хрест-фактор (CrestFactor), форм-фактор (ShapeFactor), імпульсний фактор (ImpulseFactor), граничний фактор (MarginFactor), енергія (Energy). У частотній області визначалися 4 статистичні характеристики: середнє спектральне значення (SKMean), стандартне спектральне відхилення (SKStd), спектральна асиметрія (SKSkewness) та спектральний ексцес (SKKurtosis). Усі перелічені статистичні характеристики вібросигналів можуть бути потенційними індикаторами деградації та прогнозування стану підшипника.

Еволюція безрозмірних статистичних характеристик вібраційних сигналів у процесі експлуатації підшипника ковзання представлена на рис. 4.9.

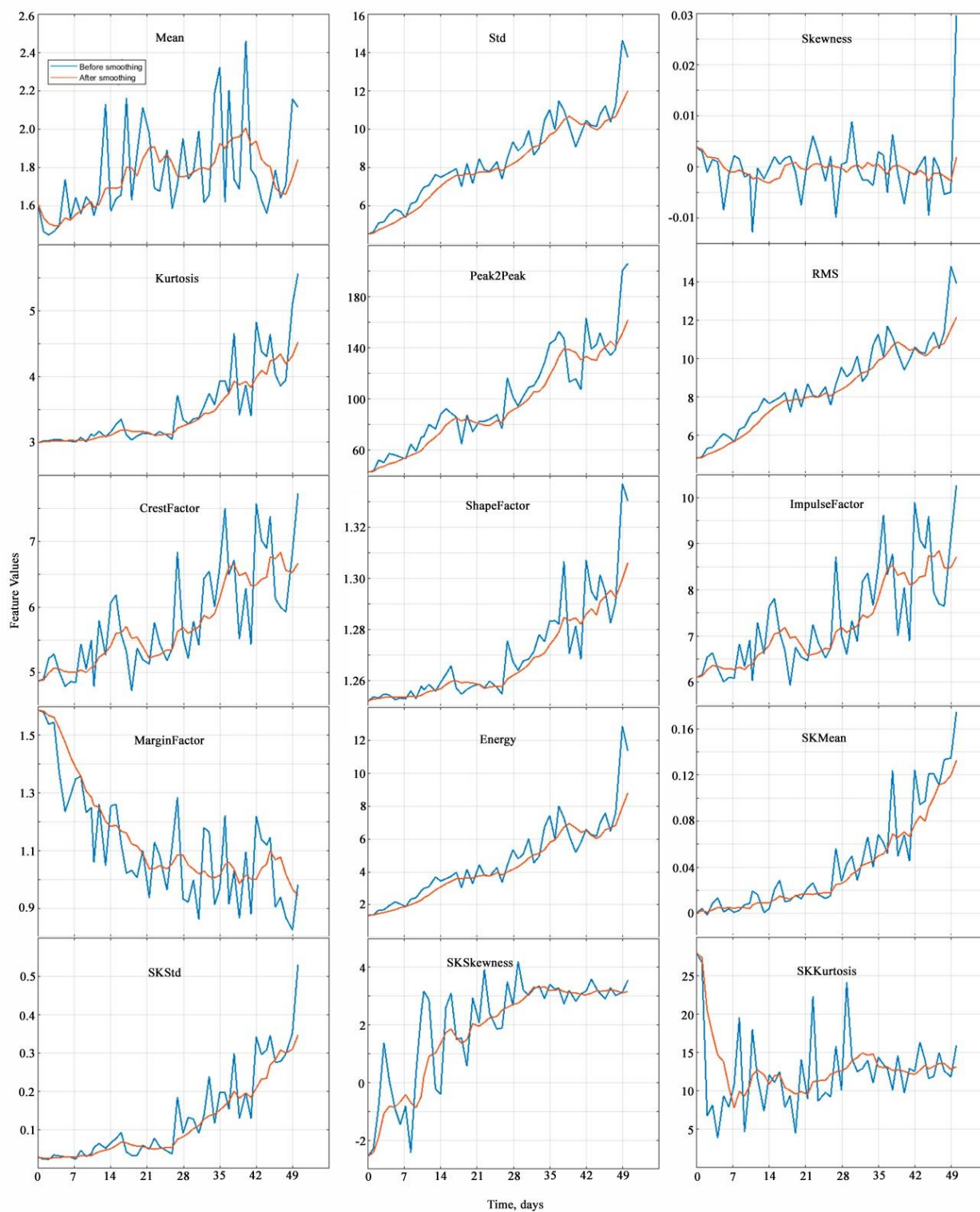


Рис. 4.9 – Еволюція безрозмірних статистичних характеристик вібраційних сигналів у процесі експлуатації підшипника ковзання (синя лінія – вихідні значення, червона – згладжені значення)

Статистичні показники вібросигналів на відміну методів математичної

статистики і імітаційного моделювання використовують у реалізації методи машинного навчання такі як нейронні мережі, методи глибокого навчання, методи непараметричної статистики. Такі методи добре себе зарекомендували при оцінці несправностей агрегатів, проте визначити з їх допомогою ступінь зношування, близькість до стану деградації та кількісних оцінок ЗР неможливо. Для розв'язання цього завдання потребуються великі експериментальні дослідження щодо еволюції цих характеристик в умовах експлуатації.

Вилучені статистичні характеристики вібросигналів пов'язані із шумом. Шум є шкідливим для ПЗР. Одна з найважливіших властивостей функції ПЗР – її монотонність. Вібраційний сигнал обов'язково має бути нестійким до шуму. Тому до вилучених статистичних характеристик застосована процедура фільтрації та згладжування. Порівняння вихідних та відфільтрованих характеристик прогнозування вібросигналів ПЗР наведено на рис. 4.6. Головним критерієм приналежності одержаних статистичних характеристик вібросигналів ПЗР в частотній та часовій області до їх подальшого аналізу є чисельне значення монотонності.

Монотонність функції однієї змінної, визначена на деякому підмножині дійсних чисел, вважається дійсною у разі коли область визначення не змінює знака. Дослідження функції зростання і зменшення показує, що монотонність це збереження порядку. Можливість монотонності за спаданням пов'язана з тим, що на безлічі значень зберігається дуальний порядок. Будь-яка монотонна послідовність обмежена принаймні з одного боку. Якщо монотонна послідовність, то це означає, що вона завжди збільшується або зменшується. І разом з тим, якщо послідовність іноді зменшується, а іноді збільшується і не має постійного напрямку, то така послідовність не монотонна.

У [123] для кількісної оцінки належності статистичних характеристик до подальшого аналізу запропоновано використовувати формулу

$$Monotonicity(x_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|number\ of\ positive\ diff\ (x_i^j) - number\ of\ negative\ diff\ (x_i^j)|}{n-1}$$

де n – кількість точок вимірювання, у нашому випадку $n = 50$;

m – кількість контрольованих об'єктів, у нашому випадку $m = 1$, x_i^j i -я характеристика, виміряна на j -м об'єкті, $diff(x_i^j) = x_i^j(t) - x_i^j(t-1)$.

Результати розрахунку монотонності статистичних характеристик вібросигналів ПЗР в частотній та часовій області наведено на рис. 4.10.

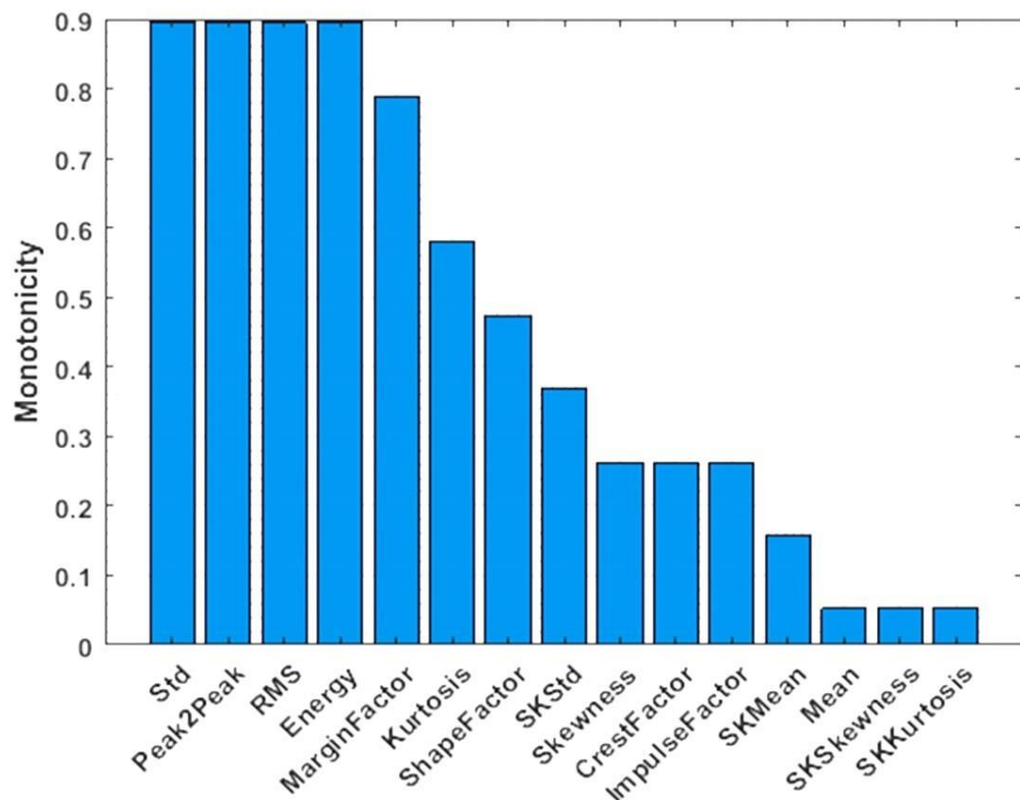


Рис. 4.10 - Монотонність статистичних характеристик вібросигналів, що виникають у процесі експлуатації підшипника ковзання

Статистичні показники прогнозу з оцінкою монотонності більше 0,3 вибираються для їх об'єднання у подальшому аналізі із застосуванням методу головних компонент. Як показали обчислення монотонності значення більше 0,3 набули: стандартне відхилення (Std), повний розмах коливань (Peak2Peak), середньоквадратичне значення (RMS), енергія (Energy), граничний фактор (MarginFactor), ексцес (Kurtosis), форм-фактор (ShapeF

стандартне спектральне відхилення (SKStd).

Для зменшення розмірності аналізованих величин прогнозних статистичних характеристик та об'єднання ознак вібросигналів застосовано метод головних компонент (PCA principal component analysis). Користуючись системою комп'ютерної математики Matlab 2018b при обробці статистичних характеристик вібросигналів з монотонністю більше 0,3 було обчислено перша головна компонента PCA1. Її розподіл залежно від дня вимірювання, який корелює з послідовним наближенням стану підшипника ковзання до відмови, показано на рис. 4.11.

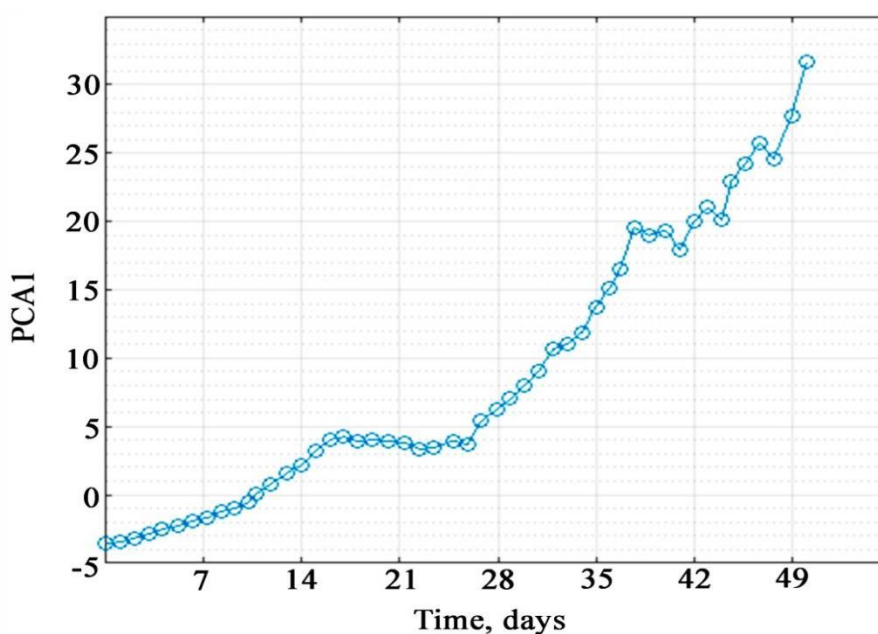


Рис. 4.11 - Перша головна компонента для послідовно зафіксованих вібросигналів при експлуатації підшипника ковзання та наближення його до стану відмови

Графік на рис. 4.11 показує, що перша головна компоненту прогнозу сигналу вібродіагностики збільшується в міру наближення підшипника до відмови. Таким чином, перша головна компонента прогнозу сигналу вібродіагностики - це перспективний комбінований індикатор стану підшипника ковзання.

На практиці даних всього життєвого циклу підшипника ковзання

виявляється недостатньо для розробки алгоритму прогнозу, проте вони можуть бути розглянуті як дані для навчання системи прогнозування стану підшипників суднових ковзань при їх експлуатації. Тому дані, зібрані у перші 20 днів (40% життєвого циклу), розглядаються як дані для отримання наступних прогнозів. У наступних операціях ранжування та поєднання важливості функцій прогнозування використовуються лише дані навчання.

У роботі використано алгоритм Exponential Degradation Model, реалізований у системі комп'ютерної математики Matlab 2018b, для моделювання та прогнозування процесу експоненційної деградації та оцінки терміну корисного використання (Remaining Useful Life (RUL)) підшипника. Моделі деградації оцінюють RUL, прогнозуючи, коли сигнал, що відстежується, перетне заздалегідь певне порогове значення.

Вибір порогового значення індикатора стану підшипника ковзання може ґрунтуватися на хронологічних записах стану підшипника або деяких предметних знаннях. Оскільки в досліджуваному наборі статистичних характеристик немає хронологічних даних, то за порогове значення вибирається останнє значення індикатора працездатності $h(t)$. Вибір порогового значення початку деградації проводиться з урахуванням хронологічних згладжених даних.

Як впливає з рис. 4.6 і 4.8 дослідження статистичних характеристик вібросигналів виявляє переважно висхідний тренд у разі зростання часу експлуатації підшипника ковзання. Апріорність параметрів нахилу варіюється в межах ($E(\theta) = 1$, $\text{Var}(\theta) = 10^6$, $E(\beta) = 1$, $\text{Var}(\beta) = 10^6$), де 10^6 – масштабний фактор розподілу. При цьому модель в основному покладається на дані, що спостерігаються. Виходячи із співвідношення $E[h(0)] = \phi + E(\theta)$, перетин ϕ встановлюється рівним -1 так, щоб модель починалася з 0.

Зв'язок між зміною показника стану та зміною шуму може бути отриманий наступним чином:

$$\Delta h(t) \approx (h(t) - \phi) \Delta \epsilon(t)$$

Тут передбачається, що стандартне відхилення шуму викликає 10% відхилення індикатора працездатності, коли він наближається до граничного значення.

Модель експоненційної деградації також надає функціональні можливості оцінки значимості нахилу. Як тільки буде виявлено значний нахил індикатора працездатності, модель забуде попередні спостереження та перезапустить оцінку на основі вихідних апріорних значень.

На рис. 4.12 показано роботу експоненційної моделі деградації стану підшипника ковзання на прикладі розглянутих вище вібросигналів.

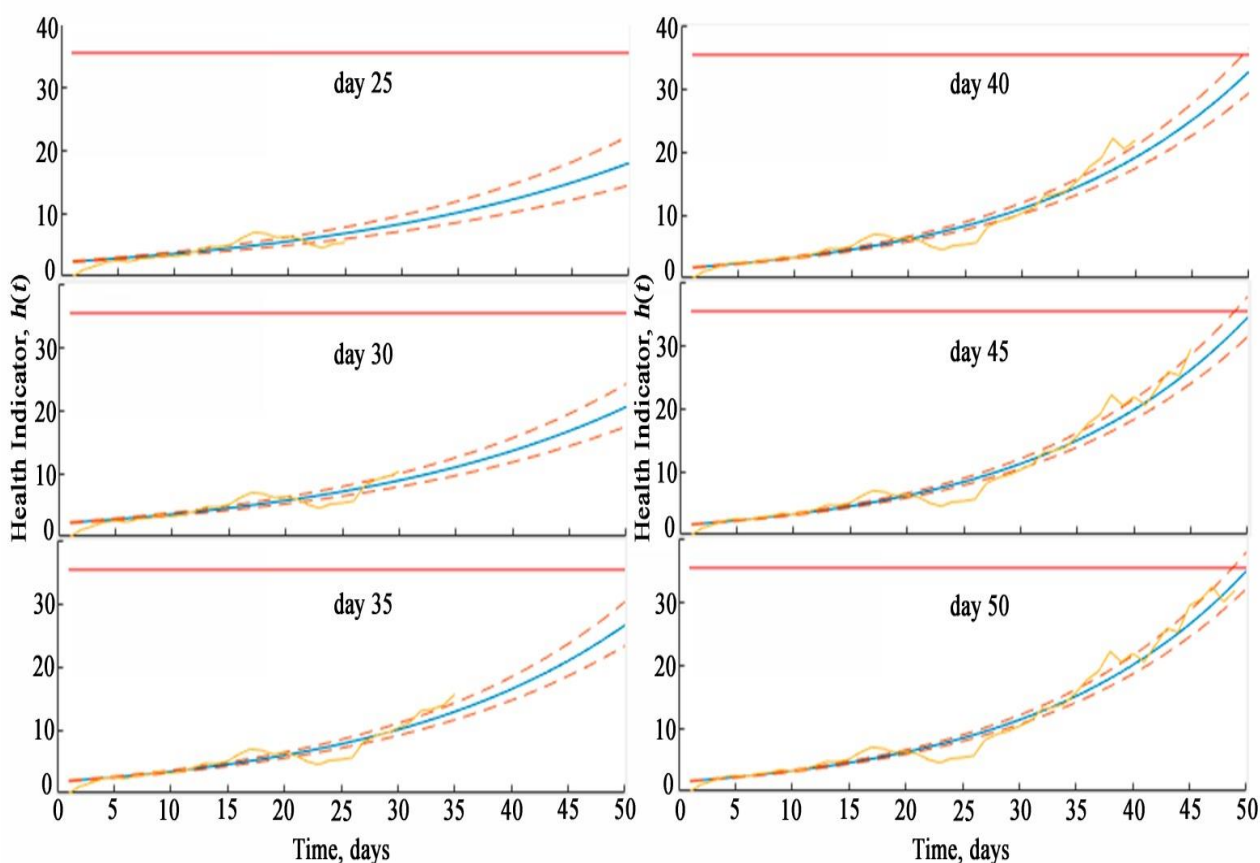


Рис. 4.12 – Оцінка залишкового ресурсу підшипника ковзання на основі експоненційної моделі деградації стану (червона лінія – граничне значення індикатора стану, синя лінія – експоненційна модель деградації, жовта лінія – поточне значення індикатора стану, пунктирна лінія – межі довірчого інтервалу)

Чітко видно, як змінюється прогноз залежно від нахилу кривої індикатора стану. Порогове значення індикатора стану вибрано рівним $h(t) = 36$ на 20 день моніторингу, оскільки перші двадцять днів використовувалися для навчання моделі.

Як бачимо на рис. 4.12 якщо для навчання прогнозової експоненційної моделі стану підшипників ковзання в процесі експлуатації використовуються дані за перші двадцять діб роботи підшипника ковзання, то експоненційна модель дає перевищення порогового значення на п'ятдесятій день. Проте, слід зазначити, що межа довірчого інтервалу, показана пунктирною лінією на рис. 4.12, перетинає поріг на сороковий день експлуатації підшипника. Тому можна стверджувати результат прогнозування, що після сорока днів роботи подальша експлуатація підшипника є небезпечною.

До хронологічних даних про технічний стан підшипника ковзання можуть бути віднесені структурні та функціональні схеми взаємодії підсистем, алгоритми управління, дані про режими, характеристики систем контролю, діагностування та прогнозування, методи експлуатації та технічної підтримки. Недоліком такої оцінки є відсутність невизначеності, що характеризується реальними результатами роботи пристрою діагностування прогнозування, а також оцінка впливу зовнішніх впливів.

Для аналізу прогнозу ефективності використовується α - λ графік, показаний на рис. 4.13, де межа встановлена на $\alpha=20\%$. Ймовірність того, що оцінене RUL знаходиться між межею істинного RUL, розраховується як показник продуктивності прогнозової моделі:

$$\Pr(r^*(t) - \alpha r^*(t) < r(t) < r^*(t) + \alpha r^*(t) \mid \Theta(t))$$

де $r(t)$ - оцінене RUL під час t ,

$r^*(t)$ - справжнє RUL під час t ,

$\Theta(t)$ - це оцінені параметри прогнозової моделі під час t .

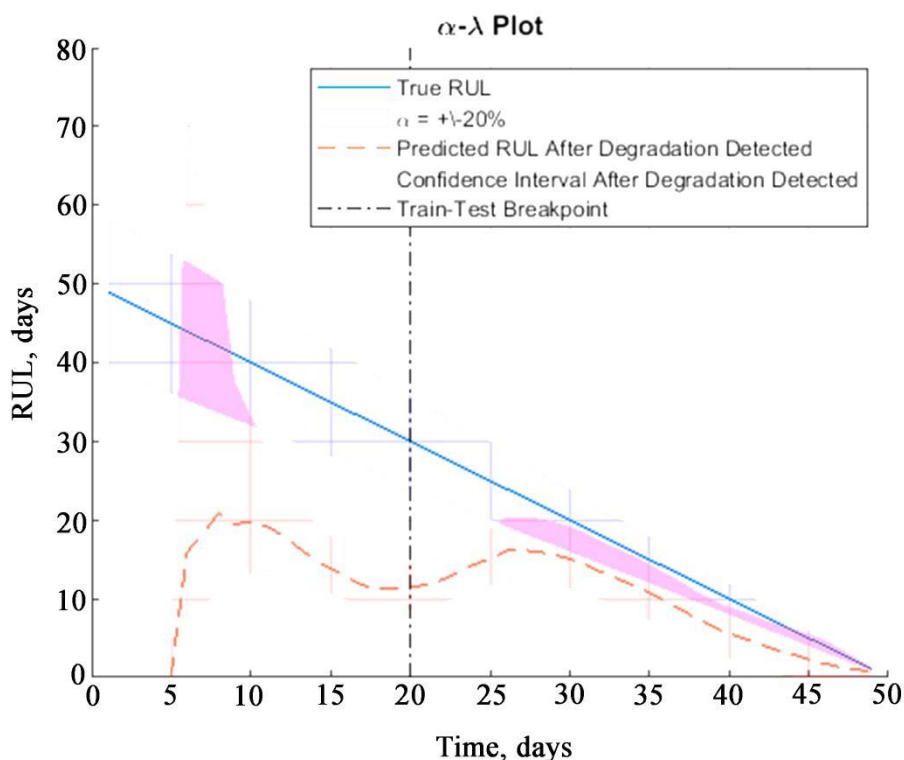


Рис. 4.13 – α - λ графік аналізу прогнозу ефективності роботи підшипника ковзання

Оскільки встановлені апіорі значення параметрів моделі прогнозу не відображають справжнього апіорного значення потрібно кілька тимчасових кроків, щоб пристосуватися до правильного розподілу параметрів. Поява, розпізнавання та розвиток є статистичними характеристиками прогнозування, що потребують великого обсягу вхідної інформації. У цих прогнозованих станах початкове становище невизначено і тому статистичні характеристики неможливо знайти точно розраховані. Для підвищення точності прогнозування необхідне постійне поповнення поточної інформації на кожному кроці прогнозування RUL, що оцінюється відповідними ймовірностями. Прогноз стає більш точним у міру того, як стає доступнішим більше точок даних статистичного аналізу.

Таким чином, можна зробити висновок, що на підставі виконаних розрахунків моніторингу прогнозу стану підшипників ковзання на основі вимірювань вібраційних сигналів з використанням методу головних

компонент встановлено новий прогностичний інформаційно-діагностичний параметр у вигляді першої головної компоненти, що дозволяє об'єднати набір статистичних характеристик вібраційних сигналів при зменшенні шумової складової.

Експоненційна модель прогнозу деградації з урахуванням ймовірнісних оцінок невизначеності та довірчої оцінки прогнозів показала, що для випадків, в яких використовується нормальний розподіл, достатньо використовувати довірчий інтервал у вигляді смуги, що розповсюджується, навколо прогнозованої точки і оцінити RUL на основі заздалегідь встановленого порогу відмов. Встановлено, що прогнози, зроблені на ранній стадії, мають доступ до меншої кількості інформації про динаміку розвитку пошкоджень і вимагають прогнозування на більш віддалені горизонти з урахуванням апостеріорної інформації.

Підвищення ефективності експлуатації суднових транспортних засобів з використанням методу діагностики та прогнозування стану деталей згідно з прогновною моделлю деградації матеріалу в процесі експлуатації полягає у ранньому виявленні несправностей, що дозволяє знизити витрати на ремонт роботи, скоригувати інтервали та програми технічного обслуговування та ремонту, шляхом виявлення слабких місць та спостереження над розвитком дефектів до безповоротного зносу деталей. При цьому скорочуються терміни міжремонтної експлуатації та підвищується надійність обладнання.

Висновки до IV розділу

1. Виконано експериментальне дослідження стосовно розробки інформаційно-діагностичного параметру суднових підшипників ковзання. Показано необхідність індивідуального підходу к об'єкту діагностування з урахуванням специфічних умов його функціонування. Визначено труднощі встановлення діагностичних параметрів, які пов'язані з різноманіттям статистичних характеристик вібросигналів та можливістю їх використання

для спостереження структурних змін матеріалів деталей в складних умовах експлуатації. Наведено особливості вібродіагностики роторних механізмів, які полягають у тому, що зокрема фізичних вимірювань потребується їх використання у математичних моделях діагностики. Виконані розрахунки статистичних характеристик вібросигналів в часовій та частотній областях. Відмічено їх принципова можливість використання як потенціальних індикаторів деградації стану матеріалів деталей СЕУ. Для практичного обґрунтування діагностичних параметрів потребується оптимізація результатів розрахунків по різним критеріям.

2. Запропоновано метод багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик суднових підшипників ковзання на основі аналізу еволюції пошкоджень турбонагнітачів. Як параметри оптимізації використовуються особливості основних характеристик траєкторії діагностичних сигналів: монотонність, швидкість змін, чутливість до визначення ЗР, відхилення від адитивності, енергія, витрачена на розвиток дефекту. Кожна дискретна характеристика вібросигналу апроксимується нелінійною функцією у вигляді кубічного сплайну на ділянці передруйнування.

Для остаточного висновку та встановлення оптимальної діагностичної характеристики необхідно враховувати збіги за всіма узагальнюючими функціями. Встановлено, що оптимальною характеристикою діагностики стану підшипника ковзання в процесі його експлуатації є пік-фактор. Використання цього параметра дозволяє здійснити моніторинг без зупинки обладнання. Складено матрицю ефективності діагностики, рядки якої представлені статистичними характеристиками вібраційних сигналів, стовпці критеріями статистичних рішень, а елементи практичними реалізаціями вібродіагностики.

3. Розроблено модель прогнозу зміни технічного стану підшипників ковзання турбіні за параметрами вібрації, що генерирується, в умовах експлуатації та діагностичних змін характеристик вібраційних сигналів.

Встановлено різке збільшення першої головної компоненти вібросигналу порівняно з рештою та монотонне його зростання при деградації властивостей матеріалів. Крім математичного очікування та дисперсії її проекцій на вісі, використано поняття коваріаційної матриці, елементи якої є кореляціями ознак. Реалізується навчання моделі та принцип спостереження за безперервним зносом матеріалу на протязі терміну експлуатації в автоматичному режимі. Підвищення ефективності моніторингу при використанні прогнозної моделі полягає у можливості інтеграції технологій штучного інтелекту та машинного навчання і проводиться за допомогою набору даних експериментальної вибірки. Експоненціальна модель для випадків, коли використовується нормальний розподіл, представляється у вигляді смуги, що розповсюджується, навколо прогнозованої точки, що дозволяє оцінити ЗР на основі заздалегідь встановленого порігового значення.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача – підвищення ефективності експлуатації судових транспортних засобів шляхом впровадження методу діагностики і прогнозування стану деталей, який дозволяє збільшити обсяг діагностичної інформації без додаткового втручання в їх конструкцію. Створені нові методи діагностування технічного стану та моніторингу судових транспортних засобів без додаткового втручання в їх конструкцію дозволили збільшити обсяг діагностичної інформації та підвищити ефективність експлуатації обладнання.

У результаті виконання роботи отримано такі основні результати:

1. Запропоновано нові параметри діагностики, які необхідно врахувати для підвищення якості оцінки та прогнозування стану технічного обладнання у реальному масштабі часу. Встановлено, що для судових підшипників кочення таким параметром є перша головна компонента характеристик вібраційного сигналу в часовій області та спектрального ексцесу в частотній області, для судових підшипників ковзання основним параметром діагностики є використання пік-фактору. Доведено, що для підшипників кочення виникнення сигналів спостерігали при частоті 2,46 кГц, причому зростають показники першої головної компоненти від 12,7 до 20,81 (у 1,76 разів) і спектрального ексцесу від 5,349 до 16,808 (у 3,12 разів). Визначено, що для судових підшипників ковзання пік-фактор в момент зародження дефекту зростає від 50 до 77 відносних одиниць, тобто на 54,2% (у 1,54 разів). Це дозволяє збільшити об'єм діагностичної інформації і підвищити надійність моніторингу в 1,3...1,5 разів.

2. Розроблено модель ймовірнісної динаміки процесів діагностики відмов елементів судових транспортних засобів при їх експлуатації на основі ланцюгів Маркова, яка включає формування апіорної інформації про експериментальні впливи зовнішнього середовища, встановлення простору станів, вивчення причин і ймовірностей відмов. Модель враховує

послідовність станів технічних об'єктів і дозволяє аналізувати ймовірнісну динаміку накопичення пошкоджень у часі. Завдяки використанню розробленої моделі підвищили ефективність діагностики елементів турбонагнітачів, внаслідок чого зменшились ймовірності відмов:

- для корпусу: від 0,090 до 0,076;
- для компресора: від 0,0060 до 0,0058;
- для турбіни: від 0,068 до 0,052;
- для ущільнення: від 0,167 до 0,150;
- для підшипників: від 0,438 до 0,398;
- для масляних насосів: від 0,101 до 0,091.

Ці показники забезпечують підвищення надійності діагностики турбонагнітачів у процесі їх експлуатації у 1,18 разів.

3. Створено систему інтелектуального забезпечення діагностики експлуатаційних властивостей деталей суднового обладнання, яка заснована на комплексному використанні експериментальної та інтелектуальної складових. Впровадження системи мінімізує суб'єктивізм прийняття рішень про продовження експлуатації обладнання. Внаслідок виключення необхідності зупинок роботи обладнання для проведення діагностики з урахуванням статистики відмов це збільшує термін міжремонтної експлуатації деталей у 1,5...2 разів.

4. Розроблено метод багатокритеріальної оптимізації діагностичних характеристик елементів СЕУ, в основі якого є формування матриці ефективності з використанням експериментальної інформації та її обробки згідно критеріїв статистичних рішень, адитивної, мультиплікативної і додаткової мультиплікативної згортки. При контролі режимів роботи підшипників ковзання розбіжність за різними узагальнювальними функціями складає:

- від 0,010 до 0,09 для критерію Вальда (0,11%);
- від 0,962 до 0,223 для критерію Лапласа (0,71%);
- від 0,579 до 0,063 для адитивної згортки (0,42%);

- від 0,201 до 0,022 для мультиплікативної згортки (0,79%);
- від 0,475 до 0,063 для додаткової мультиплікативної згортки (0,65%),

Це дозволяє підвищити точність діагностування на 2,68%.

5. Розроблено експоненціальну модель та технологію прогнозування залишкового ресурсу деталей СЕУ в умовах складного навантаження в реальному часі, яка враховує різке збільшення першої головної компоненти вібросигналу, порівняно з іншими, та її монотонне зростання при деградації властивостей матеріалів. Підвищення ефективності прогнозування при використанні моделі полягає у інтеграції технологій штучного інтелекту та машинного навчання і проводиться за допомогою даних експериментальної вибірки. Вхідну інформацію використовують для навчання моделі, об'єднання статистичних ознак та подальшого аналізу, а процес прогнозування відбувається коли відстежуваний сигнал перетинає пороговий рівень. Динаміка зміни залишкового ресурсу підшипника ковзання під час спостереження впродовж 50 діб дозволила встановити зміну показників першої головної компоненти: від 5 відносних одиниць (в момент зародження дефекту) до 37 відносних одиниць (в момент досягнення порогового значення). Таким чином, для вибраного підшипника ковзання визначено часовий горизонт прогнозування, який становить 32 доби.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Arhun, S., Borodenko, Y., Hnatov, A., Popova, A., Hnatova, H., Kunicina, N., Ziravecka, A., Zabasta, A., Ribickis, L.: Choice of Parameters for the Electrodrive Diagnostic System of Hybrid Vehicle Traction. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 57(4), 3-11 (2020). DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0017>.
2. Mygal, V., Arhun, S., Hnatov, A., Bagach, R., Kunicina, N.: Methods for Diagnosing Vehicles by an Operator-Diagnostician. In 2022 IEEE 63th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) IEEE, 1-6 (2022). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9978906>
3. Perederyi, V., Nuzhnyi, S., Lebedenko, Y.: Diagnostics of the state and prediction of the residual resource of parts in extreme operating conditions. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2(23), 18-26 (2024). DOI: 10.36910/automash.v2i23.1521, <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1521>
4. Бігун, С.В., Сіманенков, А.Л., Лебеденко, Ю.О.: Імітаційна модель системи керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів. *Прикладні питання математичного моделювання*, 5 (2), 9-18 (2022). <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2022-5-2-1>
5. Review of maritime for 2021 United Nation Organization Overview, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en_0.pdf, (2021)
6. Review of maritime for 2023 United Nation Organization Overview, <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>, (2023)
7. Шарко, О.В., Яненко, А. В.: Діагностика та вимірювальний контроль елементів суднового енергетичного обладнання в умовах невизначеності характеру навантажень Матеріали III Міжн. наук-практ.конф. «Дніпровські читання-2022» , Київ: вид-во КІВТ ДУІТ , 8 грудня 2022 р., 129-130 (2022). https://files.duit.edu.ua/uploads/%D0%A1%D0%B0%D0%B9%D1%82/3_%D0%

9D%D0%90%D0%A3%D0%9A%D0%90/conferences/international-scientific-and-practical-conferences/third-dnipro-reading-materials.pdf

8. Abuelo, A., Brester, J.L., Starken, K., Neuder, L.M.: Technical note Comparative evaluation of 3 methods for the quantification of non estenified fatty acids in bovine plasma samples. *Journal of Dairy Science*.9 (2020) DOI: 10.3168/jds.2019-17527
9. Surace, C., Bovsunovsky, A.: The use of frequence ratios of diagnose structural damage in varying environmental conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2020. 136, 106523 (2020)
10. Kelin, A., Larin, O., Naryzhna, R., Trubayev, O., Vodka, O., Shapovalova, M.: Estimation of residual life-time of pumping units of electric power stations . *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 1, 8929748, 153-159 (2019). DOI: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929748
11. Савчук, В.П., Зінченко, Д.О., Акімов, О.В.: Моделювання робочих параметрів мотилевих підшипників малообертового суднового дизельного двигуна Wartsila RT-Flex82С. *Розвиток транспорту*. 1(8), 91-102 (2021). DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.09>, <http://rep.ksma.ks.ua/jspui/handle/123456789/2300>
12. Шарко, О.В., Клевцов, К.М., Акімов, О.В., Степанчиков, Д.М., Шарко, А.О.: Ідентифікація стану залишкового ресурсу, механічних та термодинамічних процесів у турбонагнітачах з використанням методу акустичної емісії. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2 (25), 59-73 (2021). DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.059-073, <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/759>
13. Sharko, O., Buketov, A., Klevtsov, K., Sapronov, O., Akimov, O.: Entropy model for determining the necessary information in the diagnostics of maritime transportation. *Scientific Journal of TNTU*. 113(1), 58-70 (2024). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.01.058
<https://visnyk.tntu.edu.ua/?art=766>
14. Букетов, А.В., Шульга, Ю.М., Житник, Д.В., Негруца, Р.Ю.: Підвищення

експлуатаційно-ремонтних характеристик засобів водного транспорту шляхом застосування полімерних композитів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2 (21), 57-65 (2023).
<https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/issue/view/135>

15. Клевцов, К.М., Букетов, А.В., Сапронов, О.О., Шарко, О.В., Васильченко, Г.Ю., Соценко, В.В., Онишко, Д.М.: Аналітичний розрахунок оцінок ризику морських та мультимодальних еколого-орієнтованих перевезень з урахуванням надійності роботи технічних засобів та кермового управління судном у разі виникнення надзвичайних ситуацій в Україні. Прикладні питання математичного моделювання. 1 (7), 93-109 (2024).
<https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/ppmm/issue/view/67>
16. Клевцов, К.М., Букетов, А.В., Шарко, О.В., Сапронов, О.О.: Інтегральна оцінка ризиків виникнення надзвичайних ситуацій у морських вантажних перевезеннях // Проблеми тертя та зношування. 2 (99), 97-112 (2023).
[file:///D:/Downloads/PTZ_2023_2_\(99\)_097_112_KLEVTSOV_BUKETOV%20\(2\).pdf](file:///D:/Downloads/PTZ_2023_2_(99)_097_112_KLEVTSOV_BUKETOV%20(2).pdf)
17. Sharko, O., Yanenko, A.: Structuring the main directions of research to value the excess resource of transport structures and materials. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 1(22), 47-54 (2024).
 DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1344>,
<https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1344>
18. Li, S., Li, M., Liu, Z., Li, M.: A Data-Driven Residual Life Prediction Method for Rolling Bearings. Proceedings of 2023 IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS), 1629-1633 (2023). DOI: 10.1109/DDCLS58216.2023.10166951
19. Yang, N., Ren, G., Lin, R., Li, D., Zhang, G.: Research on Long Life Product Prognostics Technology Based on Deep Learning and Statistical Information Fusion . Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 14094 LNCS, 3-13 (2023). DOI: 10.1007/978-981-99-6222-8_1

20. Zhang, Y.-S., Wang, G.-Q., Wang, J.-X., Hou, X.-T., Zhang, E.-P., Huang, J.-B.: Load spectrum compiling and fatigue life prediction of wheel loader axle shaft, *Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban). Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*. 41 (6), 1646-1651 (2017)
21. Rudenko, A.L., Mishakin, V.V., Fomin, A.E., Sergeeva, O.A.: Fatigue Failure of Hydraulic Power Equipment during a Long Service Life, *Steel in Translation*, 53 (3), pp. 243-247 (2023). DOI: 10.3103/S0967091223030142
22. Xie, L., Lin, W., Zhang, M., Yan, S.: Series system failure rate modeling and the mechanism to yield bathtub curve. *Applied Mechanics and Materials*, 121-126, 4858-4862. Cited 4 times (2012). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.4858
23. Trebuňa, F., Pástor, M., Šarga, P.: Assessment and increasing of lifetime and time of safe operation of machines and equipment by the experimental methods of mechanics. *Experimental Stress Analysis - 56th International Scientific Conference, EAN 2018 – Conference Proceedings*, 421-434 (2018)
24. Nikiforov, A.S., Prihodko, E.V., Kinjibekova, A.K., Karmanov, A.E.: Comprehensive Assessment of the Residual Life of Refractory Materials of High-Temperature Units. *Refractories and Industrial Ceramics*. 63 (1), 105-109 (2022). DOI: 10.1007/s11148-022-00688-8
25. Thang, V.V., Trung, N.H.: Evaluating efficiency of renewable energy sources in planning micro-grids considering uncertainties. *Journal of Energy Systems*. 3 (1), 14-25 (2019). DOI: 10.30521/jes.507434
26. Baranenko, V.I., Gulina, O.M., Salnikov, N.L., Murzina, O.E.: Substantiation of FAC rate and service life estimation under operation control data. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika*. (2), 55-65 (2016). DOI: 10.26583/npe.2016.2.06
27. Lin, J., Yang, Y., Liao, X.: Research on thermal aging life of cable based on second-order dynamics modification equation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 585 (1), 012115 (2020). DOI: 10.1088/1755-1315/585/1/012115

28. Shen, G.: Development Status of Nondestructive Testing and Evaluation Technique for Pressure Equipment. *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*. 53 (12), 1-12 (2017). DOI: 10.3901/JME.2017.12.001
29. Louda, P., Sharko, A., Stepanchikov, D.: An acoustic emission method for assessing the degree of degradation of mechanical properties and residual life of metal structures under complex dynamic deformation stresses. *Materials*. 14 (9), 2090 (2021). DOI: 10.3390/ma14092090
30. Nakomcic, B., Basic, D., Ciupinski, L., Manaj, W., Kurzydowski, K.J.: Non-destructive testing applied for risk reduction in petrochemical installations. *ECOS 2006 - Proceedings of the 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 767-774, (2006)
31. Andreikiv ,O.E., Skal's'kyi, V.R., Dolins'ka, I.Y., Dzyubyk, A.R.: Influence of Corrosive Hydrogenating Media on the Residual Service Life of Structural Elements in the Maneuvering Mode of Operation . *Materials Science*. 54 (1), 61-68 (2018). DOI: 10.1007/s11003-018-0158-3
32. Dolins'ka, I.Y.: Evaluation of the Residual Service Life of a Disk of the Rotor of Steam Turbine with Regard for the Number of Shutdowns of the Equipment. *Materials Science*. 53 (5), 637-644 (2018). DOI: 10.1007/s11003- 018-0118-y
33. Mi, G.-S., Zhang, F.-X., Wei, L.: Research on method of modulation maintenance in railway track circuit based on residual life. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*. 37 (4), 69-74 (2015). DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2015.04.010
34. Silin, N.V., Korovkin, N.V., Hayakawa, M.: High-voltage equipment electromagnetic spectrum study for estimation of its technical state and prediction of the residual life . 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory, EMTS 2013 - Proceedings, 6565792, 522-524 (2013).
35. Gitzel, R., Klopper, B., Ouertani, Z.M., Turrin, S., Lange, I.: Utilizing residual life information for improved maintenance services. *Proceedings - 2013 IEEE*

- International Conference on Business Informatics, IEEE CBI 2013, 6642893, 312-315 (2013). DOI: 10.1109/CBI.2013.51
36. Li, C., Sanchez, R.V., Zurita, G., Cerrada, M., Cabrera, D., Vasques, R.E.: Gearbox fault diagnosis based on deep random forest of acoustic and vibratory signals. *Mechanical System and Signal Processing* 2016. 76/77, 283 – 293, (2016)
 37. Pakhalovich N., Kucher S., Levutzky Y., Malyshko S., Giry M.: Classification of regulatory support for extension of life of mechanical equipment of nuclear power plants . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1 (8), 21-28 (2016). DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59441
 38. Makarenko, V., Manhura, S., Kharchenko, M., Melnikov, O., Manhura, A.: Study of corrosion and mechanical resistance of structural pipe steels of long-term operation in hydrogen sulfur containing environments. *Materials Science Forum*. 1045 MSF, 203-211 (2021). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.203
 39. Protalinskiy, O., Shvedov, A., Khanova, A.: Life Cycle Management of Power Grid Companies' Equipment. *Studies in Systems, Decision and Control*. 342, 265-274 (2021). DOI: 10.1007/978-3-030-66081-9_21
 40. Chen, W., Zhang, Y., Qing, C., Geng, J.: Fatigue life analysis of key equipment for high temperature reactor under variable working conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. 1633 (1), 012009 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1633/1/012009
 41. Thang, V.V., Ha, T.: Optimal siting and sizing of renewable sources in distribution system planning based on life cycle cost and considering uncertainties . *AIMS Energy*, 7 (2), pp. 211-226 (2019) DOI: 10.3934/ENERGY.2019.2.211
 42. Kjeld, A., Bjarnadottir, H.J., Olafsdottir, R.: Life cycle assessment of the Theistareykir geothermal power plant in Iceland. *Geothermics*. 105, 102530 (2022). DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102530
 43. Kulakov, P.A., Rubtsov, A.V., Afanasenko, V.G., Zubkova, O.E., Sharipova, R.R., Gudnikova, A.A.: Influence of technical condition parameters on the residual resource of capacitive equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 1399 (5), 055052 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055052

44. Vališ, D., Gajewski, J., Žák, L.: Potential for using the ANN-FIS meta-model approach to assess levels of particulate contamination in oil used in mechanical systems. *Tribology International*, 135, 324-334 (2019). DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.012
45. Liu, W., Jiao, S., Wen, T., Zhu, J.: Remaining Life Prediction Method of Relay Protection Equipment Based on Digital Twin. 2023 4th International Conference on Computer Engineering and Application, ICCEA 2023, 243-247 (2023). DOI: 10.1109/ICCEA58433.2023.10135436
46. Wu, M., Wang, X., Liu, X.: On Condition Maintenance Model for Complex Electromechanical Equipments Based on Remaining Useful Life and Wiener Process . *Journal of Physics: Conference Series*. 1678 (1), 012014 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1678/1/012014
47. Jia Q., Zhang X., Yuan Y., Fu T., Wei L., Zhao B.: Fault-tolerant adaptive sliding mode control method of tractor automatic steering system. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 34 (10), 76-84 (2018). DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.009
48. Liu, Y., Cai, H., Ma, P., Xu, Y., Han, Y.: Design of Network Information System Equipment Health Management Software based on Combat Readiness . *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 1304, 771-777 (2021). DOI: 10.1007/978-3-030-63784-2_95
49. Zhao, L., Zhang, S., Zhang, X., Li,Y.: Locating and sizing method for energy interconnection oriented active distribution networks based on stochastic chance constrained programming . *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control*. 48 (14), 121-129 (2020). DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191118
50. Kelin, A., Larin, O., Naryzhna, R., Trubayev, O., Vodka, O., Shapovalova, M.: Mathematical Modelling of Residual Lifetime of Pumping Units of Electric Power Stations. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 1113 AISC, 271-288 (2020). DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_24
51. Nikiforov, A.S., Prihodko, E.V., Kinzhibekova, A.K., Karmanov, A.E.: The

procedure for determining the residual life of high-temperature aggregates. Journal of Physics: Conference Series. 944 (1), 012083 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012083

52. Fong, J.T., Alan Heckert, N., Filliben, J.J., Doctor, S.R.: Three approaches to quantification of NDE uncertainty and a detailed exposition of the expert panel approach using the Sheffield elicitation framework. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 1A-2018 (2018). DOI: 10.1115/PVP201884771
53. Марасанов, В.В., Шарко, О.В., Шарко, А.О.: Граничные задачи определения энергетического спектра сигналов акустической эмиссии в сопряженных сплошных средах. Кибернетика и системный анализ. 5, 170-179 (2019)
54. Шарко, О.В., Яненко, А.В.: Сучасні технології діагностування і визначення залишкового ресурсу елементів СЕУ в процесі експлуатації. Матеріали 14-й Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», м. Херсон, 2023 р., 75-77 (2023). <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2023.pdf>
55. Шарко, О.В., Яненко, А.В., Мовчан, П.В.: Система технічної діагностики визначення поточного стану транспортних пристроїв. Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»-(СЕУТТО-2024) 13-15 березня 2024 року Херсон, Україна, 39-41 (2024). https://ksma.ks.ua/?page_id=2110
56. Sharko, M., Gonchar, O., Tkach, M., Polishchuk, A., Vasylenko, N., Mosin, M., Petrushenko, N.: Intellectual Information Technologies of the Resources Management in Conditions of Unstable External Environment. Book Chapter. Lecture Notes on Data Engineering and Communication Technologies. 77, 1158, 519-533 (2022). doi: 10.1007/978-3-030-82014-5_35

<https://doi.org/10.1007/978-3-030-82014-5>

57. Marasanov, V.V., Sharko, A.A.: Discrete models Characteristics of the Acoustic Emission Signal Origin Forunners 2017 IEEE First Ukrcon Coference of Electrical and Computer Engineering (UKRCON) Kyiv, 680 – 684, (2017)
58. Sharko, O., Yanenko, A.: Synthesis of mathematical models for monitoring the technical condition of vehicles during their operation. *Наукоемні технології*. 1(61), 44-50 (2024). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.61.18514>, <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/18514>
59. Kozulya, T. V., Sharonova, N. V., Kozulya, M. M., Svyatkin, Y. V.: Knowledge-oriented database formation for determination of complex method for quality identification of compound systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1(2)(79), 13–21 (2016). doi:10.15587/ 1729-4061.2016.60590.
60. Louda, P., Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A.: Features of the Application of the Principal Component Method to the Study of Acoustic Emission Signals Under Loading of Multilayer Structures. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making. ISDMCI 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 149, 462–487 (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_27
61. Sharko, O., Yanenko, A.: Modeling intelligent software for the diagnostic and monitoring of ship power plant components using Markov chain. *Наукоемні технології*. №3(59), 251-261 (2023). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946>, <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/SBT/issue/view/938>
62. Sharko, M., Petrushenko, N., Gonchar, O., Vasylenko, N., Vorobyova, K., Zakryzhevskaya, I.: Information Support of Intelligent Decision Support Systems for Managing Complex Organizational and Technical Objects Based on Markov Chains *CEUR Workshop Proceedings*. 3171, 986-998 (2022). <https://ceur-ws.org/Vol-3171/> URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper71.pdf>
63. Momenzadeh, M., Sehhati, M., Rabbani, H.: A novel feature selection method for microarray data classification based on hidden Markov model. *Journal of*

Biomedical Informatics, 95(2019), 103213, (2019)

64. Pesch, T., Schröders, S., Allelein, H. J., Hake, J. F.: A new Markov-chain-related statistical approach for modelling synthetic wind power time series. *New Journal of Physics*, 17(2015), 055001, (2015)
65. Liu, J., Feng, S.: Intelligent forecasting model for hydrological and water resources system. *Proceedings – 2019 11th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2019*, 8858710, 657–661, (2019)
66. Hu, Z., Smith, R. C., Burch, N., Hays, M., Oates, W. S.: Homogenized energy model and Markov chain Monte Carlo simulations for macro fiber composites operating in broadband regimes *ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2012*, 1, 321–327, (2012)
67. Pedretsch, B., Kaltenbacher, B., Pfeiler, O.: Parameter identification and uncertainty quantification in stochastic state space models and its application to texture analysis. *Applied Numerical Mathematics*, 146, 38–54, (2019)
68. Ozdemir, B., Kumral, M.: Stochastic Assessment of the Material Haulage Efficiency in the Earthmoving Industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143 (8), (2017)
69. Wang, Z., Jochem, P., Fichtner, W.: A Scenariobased stochastic optimization model for charging scheduling of electric vehicles under uncertainties of vehicle availability and charging demand. *Journal of Cleaner Production*, 254, (2020)
70. Sharko, M., Gusarina, N., Petrushenko, N.: Information-entropy model of making management decisions in the economic development of the enterprises. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 304–314, (2019)
71. Zhu, M., Zhu, H., Wang, X., Ju, J.W., Wu, W.: Quantitative Analysis of Seasonal Uncertainty of Metro Tunnel's Long-Term Longitudinal Settlement via Hierarchy Bayesian Network. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 279–291, (2020)
72. Hasani M. A., Regan M.: *Understanding Risk and Uncertainty Management Practice in Complex Projects*, European Scientific Institute, edition. 4, 24–38

(2017). doi:10.19044/elp.v4no4a3.

73. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., Kyrychenko, K.: Pivot Point position determination and its use for manoeuvring a vessel, *Ships and Offshore Structures* (2022). DOI: 10.1080/17445302.2022.2052480
74. Narciso, B.C.A., Kurihari, M.: History matching and quantification of uncertainty of production forecasts using hamiltonian monte carlo algorithm. In: 23rd Formation Evaluation Symposium of Japan 2017, (2017)
75. Salah B., Slimane Z., Zoheir M., Jurgan B.: (2015) Uncertainty estimation of mechanical testing properties using sensitivity analysis and stochastic modelling. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 62, 149–154, (2015)
76. Park, E. S., Rilett, L. R., Spiegelman, C. H.: A Markov Chain Monte Carlo-based origin destination matrix estimator that is robust to imperfect intelligent transportation systems data. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*. 12 (3), 139–155 (2008). DOI: 10.1080/15472450802262364
77. Vayá, M.G., Andersson, G.: Smart charging of plug-in electric vehicles under driving behavior uncertainty. *Reliability Modeling and Analysis of Smart Power Systems*, 85–99, (2014)
78. Bidyuk, P., Matsuki, Y., Gozhyj, A., Beglytsia, V., Kalinina, I.: Features of application of monte carlo method with Markov chain algorithms in bayesian data analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1080 AISC, 361–376, (2020)
79. Ficco, M.: Detecting IoT malware by Markov chain behavioral models. *Proceedings – 2019 IEEE International Conference on Cloud Engineering, IC2E 2019*, 8790169, pp. 229–234, (2019)
80. Шарко, О.В., Клевцов, К.М., Степанчиков, Д.М., Яненко, А.В.: Організація моніторингу прогнозування технічного стану вузлів турбокомпресорів із використанням ланцюгів Маркова. Матеріали 14-й Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті,

технології та обладнання для їх обслуговування», м. Херсон, 2023 р., Р.148-150,
<https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2023.pdf>,
 (2023)

81. Шарко, О.В., Яненко, А.В., Мовчан, П.В.: Система технічної діагностики визначення поточного стану транспортних пристроїв. Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» - (СЕУТТО-2024), 13-15 березня 2024 року Херсон, Україна, 39-41,
<https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2024/03/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2024.pdf>,
 (2024)
82. Marasanov, V.V., Sharko, A.O.: Determination of force constants of acoustic emission signals in the equations of motion of a model of a complex structure of a continuous medium. Журнал нано- та електронної фізики. 10, № 1, 01019-1-01019-6 (2018). DOI: 10.21272/jnep.10(1).01019
83. Свиридов, В.І., Андрєєв, А.А., Шалапко Д.О.: Діагностування суднового устаткування під час його роботи. Матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 16-18 березня 2023 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. 41- 44, (2023)
84. Варбанець, Р.А., Мінчев, Д.С., Псарюк, С.П., Братченко, П.В.: Передбачення впливу нерегулярності паливоподачі на параметри роботи головного суднового двигуна з використанням цифрового двійника. Матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування»,

- 16-18 березня 2023 р. Херсон: Херсонська державна морська академія. 45-48, (2023)
85. Неруйнівний контроль та технічна діагностика. За ред.. З.Т. Назарчука. Львів, 1134, (2001)
 86. Wang, Y., Yang, H., Zhao, S., Fan, Y., Dong, R.: Vibration characterization of rolling bearings with compound fault features under multiple interference factors. PLoS ONE, 19 (2 February), e0297935, (2024)
 87. Zhou, Q., Yi, C., Yan, L., Huang, C., Lin, J.: A Blind Deconvolution Approach Based on Spectral Harmonics-to-Noise Ratio for Rotating Machinery Condition Monitoring. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 20 (2), 1092-1107, (2023)
 88. Li, N., Wang, X., Yang, T., Han, Q.: Research on Micro-Turbine Operating State Characterization Based on Bearing Vibration Signals Analysis . International Journal of Acoustics and Vibrations. 28 (4), 435-450, (2023)
 89. Wang, H., Ni, G., Chen, J., Qu, J.: Research on rolling bearing state health monitoring and life prediction based on PCA and Internet of things with multi-sensor . Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 157, art. no. 107657, (2020)
 90. Huang, D., Yu, G., Zhang, J., Tang, J., Su, J.^ An Accurate Prediction Algorithm of RUL for Bearings: Time-Frequency Analysis Based on MRCNN. Wireless Communications and Mobile Computing. 2222802 (2022). DOI:10.1155/2022/2222802
 91. Liangxing, Lin, Guozheng, Ma, Jianfang, Sun, Cuihong, Han, Qingsong, Yong, Fenghua, Su, Haidou, Wang: Remaining Useful Life Prediction Method of Coated Spherical Plain Bearing Based on VMD-EEMD-LSTM. Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering. 59(9), 125-136 (2023). DOI: 10.3901/JME.2023.09.125
 92. Шарко, О.В., Яненко, А.В., Мовчан, П.В.: Система технічної діагностики визначення поточного стану транспортних пристроїв. Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні

установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»- (СЕУТТО-2024) 13-15 березня 2024 року Херсон, Україна. 39-41, https://ksma.ks.ua/?page_id=2110, (2024)

93. Yanenko, A.: Intelligent system for monitoring the operational properties of ship power equipment. Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т». 48, 205-219 (2024) DOI: https://journals.urau.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/310713/302141
94. Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A., Yanenko, A.: Computer diagnostics of the condition of ship rolling bearings during their operation Наукоємні технології. 48, 409-418 (2024). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.18952> URL: <https://jrnlnau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/18952>
95. Ma Y., Si J., Yan Q., Wang J.: Research on fault feature extraction and early warning of rolling bearing vibration signal of generator set. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. 9 (1), (2024)
96. Song, R.-W., Yang, L., Chen, L.-Y., Dong, Z.-S.: Research on frequency band sparse optimization algorithm in health index of rolling bearing. Concurrency and Computation: Practice and Experience. 35 (4), e7544, (2023)
97. Han, R., Mao, Z., Zhang, Z., Zhang, J.: Time-frequency enhanced characterization method based on asymmetric image reconstruction autoencoder. Measurement Science and Technology. 35 (3), 035107, (2024)
98. Liu, Y., Yan, R., Gao, R.X.: A nonlinear time series analysis method for health monitoring of rolling bearings. ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, DSCC2010. 2, 277-283, (2010)
99. Xu, C., Li, B., Wu, T.: Wear characterization under sliding–rolling contact using friction-induced vibration features. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 236 (4), 634-647 (2022)
100. Liu, L., Chen, H., Li, Z., Li, W.-P., Liang, Y., Feng, H.-T., Zhou, C.-G.: A New Prediction Method for the Preload Drag Force of Linear Motion Rolling Bearing. Metals. 12 (12), 2139, (2022)

101. Duan, Y., Cao, X., Zhao, J., Li, M., Yang, X. A.: Spatiotemporal Fusion Autoencoder-Based Health Indicator Automatic Construction Method for Rotating Machinery Considering Vibration Signal Expression. *IEEE Sensors Journal*. 23 (20), 24822-24838 (2023)
102. Jin, Y., Xin, G., Antoni, J.: Towards automated, integrated and unsupervised diagnosis of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 203, 110691 (2023)
103. Sha, Y.-D., Zhao, Y., Luan, X.-C., Guo, X.-P., Ge, X.-D., Li, Z., Xu, S.: Feature Extraction and Characterization of Rolling Bearing Vibration Signal Based on Multi Parameter Information Fusion and Screening. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*. 44 (7), 2205050 (2023)
104. Liu, R., Wang, X., Kumar, A., Sun, B., Zhou, Y.: WPD-Enhanced Deep Graph Contrastive Learning Data Fusion for Fault Diagnosis of Rolling Bearing. *Micromachines*. 14 (7), 1467 (2023)
105. Li, N., Wang, X., Yang, T., Han, Q.: Research on Micro-Turbine Operating State Characterization Based on Bearing Vibration Signals Analysis. *International Journal of Acoustics and Vibrations*, 28 (4), 435-450 (2023)
106. Martin-Del-Campo, S., Sandin, F., Schnabel, S.: Kinematic frequencies of rotating equipment identified with sparse coding and dictionary learning. *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHM*, 11 (1) (2019)
107. Noman, K., Li, Y., Wen, G., Patwari, A.U., Wang, S.: Continuous monitoring of rolling element bearing health by nonlinear weighted squared envelope-based fuzzy entropy. *Structural Health Monitoring*. 23 (1), 40-56 (2024)
108. Rostaghi, M., Ashory, M.R., Azami, H.: Application of dispersion entropy to status characterization of rotary machines. *Journal of Sound and Vibration*. 438, 291-308 (2019)
109. Yan R., Liu Y., Gao R.X.: Permutation entropy: A nonlinear statistical measure for status characterization of rotary machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 29, 474-484 (2012)

110. Song, H., Yuan, R., Lv, Y., Pan, H., Yang, X.: Improved 2-D Multiscale Fractional Dispersion Entropy: A Novel Health Condition Indicator for Fault Diagnosis of Rolling Bearings . *IEEE Sensors Journal*. 24 (3), 3431-3444 (2024)
111. Yang, T., Zhao, S., Zhang, J., Han, Q., Li, X.: The TSM-net: a new strategy for insulated bearings intelligent faults diagnosis. *Physica Scripta*, 98 (12), 126008. (2023)
112. De Almeida, R.G.T., Da Silva Vicente S.A., Padovese L.R.: New technique for evaluation of global vibration levels in rolling bearings. *Shock and Vibration*, 9, pp. 225-234 (2002)
113. Шарко, О., Степанчиков, Д., Шарко, А., Яненко, А., Мовчан, П.: Застосування багатокритеріального аналізу при дослідженні термодинамічних процесів у судноремонті та транспортній інфраструктурі. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. № 1(28), 117-133 (2024). DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.117-132> URL: <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/issue/view/34>.
114. Cui, L.-L., Jin, O., Wang, X.: Rolling bearing life prediction method based on improved similarity theory. *Zhendong Gongcheng Xuebao/Journal of Vibration Engineering*. 36(3), 854-860 (2023). DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.03.028
115. Abass, B.A., Ahmed, S.Y., Kadhim, Z.H.: Analysis and Optimization of Nanolubricated Journal Bearing under Thermoelasto-Hydrodynamic Lubrication Considering Cavitation Effect. *Tribology in Industry*. 45(4), 618-633 (2023). DOI: 10.24874/ti.1441.01.23.04
116. Qiu, M., Niu, K., Li, J., Li, Y., Xu, Y.: Residual life prediction of rolling bearing under multiple stresses. *Hangkong Dongli Xuebao/Journal of Aerospace Power*. 37(5), c. 980-988 (2022). DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20210246
117. Zhang, C., Li, S., Wen, J., Fu, S.: Remaining Useful Life Prediction Method Based on the Improved Holt Double Exponential Model. 2022 5th International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence, PRAI 2022. 47-52 (2022). DOI: 10.1109/PRAI55851.2022.9904057

118. Xu, Y., Qiu, M., Li, J., Liu, L., Niu, K.: Remaining useful life prediction method of rolling bearing based on SKF-KF-Bayes. *Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*. 40(19), 26-31 (2021). DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2021.19.004
119. Zhang, M., Hu, G., Liu, X., Yang, X.: An improved strength degradation model for fatigue life prediction considering material characteristics . *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 43(5), 275 (2021). DOI:10.1007/s40430-021-02997-4
120. Hao, X., Wang, S., Chen, M., Pan, D.: Remaining Useful Life Prediction of High-Frequency Swing Self-Lubricating Liner. *Shock and Vibration*. 8843374 (2021). DOI:10.1155/2021/8843374
121. Wang, Y., Fang, X., Zhang, C., Chen, X., Lu, J.: Lifetime prediction of self-lubricating spherical plain bearings based on physics-of-failure model and accelerated degradation test | [Prognozowanie czasu pracy samosmarujących łożysk ślizgowych w oparciu o model fizyki uszkodzeń oraz przyspieszone badania degradacji]. *Eksploatacja i Niezawodnosc*. 18(4), 528-538 (2016). DOI:10.17531/ein.2016.4.7
122. Sharko, A., Sharko, O., Stepanchikov, D., Yanenko, A.: Monitoring State of Marine Plain Bearings Based on Exponential Degradation Model. *Proceedings of the 8th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*. Volume I: Machine Learning Workshop, Lviv, Ukraine, April 12-13, 48-58 (2024). <https://ceur-ws.org/Vol-3664/paper5.pdf>
123. В.П. Бабак та ін.: Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: монографія. Київський інститут теплофізики НАН України, 512 (2015)
124. Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A., Yanenko, A. Multicriteria Approach to the Selection of Optimal Diagnostic Characteristics of Ship Bearings Monitoring. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 219, 242–257 (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-70959-3_12

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

APPROVED
Fleet Group
Senior Technical Superintendent
for «UHL FRONTIER»
Mr. Ionut David Stefan
27.06.2024 p.



APPROVED
Prorector for scientific-pedagogical work
Kherson State Maritime
Academy

27



THE ACT OF IMPLEMENTATION

This act of compilation is that during 2023-2024, as a result of the joint work of the UHL FRONTIER ship's employees and researchers of the Kherson State Maritime Academy (Kherson, Ukraine), a study was conducted to verify the intelligent system for monitoring the properties of the ship's power equipment. The developed new methods of diagnosing marine vehicles during operation allow to increase the amount of diagnostic information without additional intervention in their construction and contribute to the improvement of the efficiency of vehicles.

New informational parameters for state diagnostics have been identified and experimentally confirmed:

- amplitude changes in time of the first main component and spectral excess of turbochargers of ship rolling bearings;
- the first main component and peak factor in the degradation of materials and estimation of the residual resource of ship's sliding bearings.
- Development data on early diagnostics of marine vehicles during operation allow:
 - reduce repair costs;
 - adjust maintenance programs and reduce cases of equipment emergency shutdown;
 - increase the reliability of diagnostic work by 1.3...1.5 times;
 - increase the period of maintenance between repairs by 1.5...2.0 times.

By the ship «UHL FRONTIER»

Mr. Ionut David Stefan



From Kherson State Maritime Academy:

A.V. Yanenko

O.V. Sharko

ЗАТВЕРДЖУЮ
Fleet Group
Senior Technical Superintendent
«UHL FRONTIER»
Mr. Ionut David Stefan
27.06.2024 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з науково-педагогічної роботи
Херсонської державної морської
академії

27 06



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт складання у тому, що протягом 2023-2024 рр. співробітниками судна UHL FRONTIER та дослідниками Херсонської державної морської академії (Херсон, Україна) провели дослідження перевірки інтелектуальної системи моніторингу властивостей суднового енергетичного обладнання. Розроблені нові методи діагностування суднових транспортних засобів під час експлуатації дозволяють збільшити обсяг діагностичної інформації без додаткового втручання в їх конструкції та сприяти підвищенню ефективності транспортних засобів.

Виявлено та експериментально підтверджено нові інформаційні параметри діагностики стану:

- зміни амплітуди в часі першої головної компоненти та спектрального ексцесу турбонагнітачів суднових підшипників кочення;
- першої головної компоненти та пік-фактору при деградації матеріалів для оцінки залишкового ресурсу суднових підшипників ковзання.

Розробки щодо раннього діагностування суднових транспортних засобів під час експлуатації дозволяють:

- знизити витрати на ремонтні роботи;
- скоригувати програми технічного обслуговування та зменшити випадки аварійної зупинки обладнання;
- підвищити надійність проведення діагностичних робіт у 1,3 ...1,5 разів;
- збільшити терміни міжремонтної експлуатації в 1,5...2,0 разів.

Від м/в «UHL FRONTIER»

Mr. Ionut David Stefan



Від Херсонської державної морської академії:

А.В. Яненко

О.В. Шарко

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Херсонської державної морської академії

Андрій БЕНЬ

2024 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи у навчальний процес

Даним актом підтверджується, що наукові розробки аспіранта Яненка Артема Валерійовича наведені у його дисертаційній роботі, впроваджено при складанні навчально-методичного комплексу дисципліни «Методи діагностики, контролю надійності транспортних систем та засобів», яка викладається для аспірантів II року, денної і заочної форми навчання на кафедрі транспортних технологій і судноремонту Херсонської державної морської академії. Зокрема, методи діагностування технічного стану елементів суднових транспортних засобів під час їх експлуатації та обслуговування використано при підготовці лекційного і практичного курсів. Це дозволило аспірантам 2 року, денної і заочної форми навчання отримати необхідні знання, вміння і навички при розробці нових діагностичних параметрів та технологій технічної експлуатації елементів судового енергетичного обладнання.

Декан факультету суднової енергетики,
к.т.н., доцент

Олександр АКИМОВ

Завідувач кафедри транспортних
технологій і судноремонту,
д.т.н., професор

Андрій БУКЕТОВ

ДОДАТОК В

Моніторинг аварійної ситуації пов'язаний с руйнуванням підшипника кочення VTR304P11/021 турбокомпресора NR34/S102 головного двигуна MAN B&W 32/40

STATEMENT OF FACT

30.12.2021 00:30 - BOSP after p.Genoa with ME 88 rpm.

At 11:20 ME rpm increased to 95 due to changed vessel ETA to Barcelona. All parameters, LO temperature inlet and outlet from all cylinders and LO pressure value are normal.

12:46 oil mist alarm activated on cyl 2, rpm reduced to 66 rpm, LO outlet temperature checked- all cylinders with normal value 48-50 deg. Engine checked around, including by electronic thermometer, no any abnormality found. At 13:09 alarm returned to normal.

ME rpm increased to 86, all parameters, LO temperature inlet and outlet from all cylinders and LO pressure value are normal.

At 14:01 LO pressure start jumping between alarm and normal value.

14:01 TC 1 LO low pressure alarm (1.3 bar)

14:02 ME LO inlet low pressure alarm (1.7 bar)

Start stand by LO pump, but LO pressure still low with both pumps running.

14:05 Start ME stop. Appear knocking noise.

14:09 ME rpm 0

At 14:30 stop LO pumps and open doors to crankcase for inspection. All cylinders look same, without visible overheating. On the bottom of Cyl.1 pieces of white metal were found. All parts of Cyl.1 was not overheated (possible to keep hand). Wear of Cyl.1 crosshead bearing shells was discovered.

Sump tank sounding done- 113 cm (8-13 m3) after pumps stop.

ДОДАТОК Г

Розрахунок ефективності діагностики підшипника кочення

VTR304P11/021 турбокомпресора NR34/S102 головного

двигуна MAN B&W 32/40

Ефективність моніторингу експлуатаційних властивостей визначається можливістю переходу проведення діагностичних робіт за регламентом із зупинкою обладнання до їх проведення за поточним станом (рис. 1).

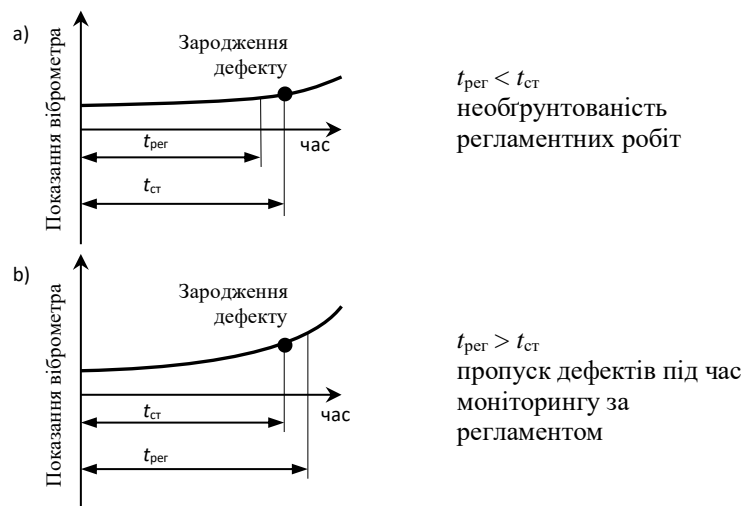


Рис. 1 Порівняльна оцінка ефективності моніторингу за регламентом та станом

Якщо стан об'єкта діагностування характеризується відсутністю дефекту, слід проводити діагностику із зупинкою устаткування, згідно вимогам регламенту (рис. 1, а). У разі виявлення дефекту слід перейти до моніторингу за станом та проводити діагностику залежно від прогнозованого наближення до стану відмови (рис. 1, б).

Ефективність моніторингу може бути визначена через співвідношення періодичності виконання регламентних робіт $t_{\text{рег}}$ до визначення їхньої потреби за станом $t_{\text{ст}}$ за формулою

$$E = \frac{t_{pez} - t_{cm}}{t_{pez}} \quad (1)$$

Ці методи вимагають апріорних знань про минулі ситуації та параметри експлуатації.

Для кількісного визначення кількості відмов обладнання та їх виявлення за допомогою запропонованого способу отримання й обробки діагностичної інформації при вібромоніторингу підшипників кочення турбокомпресорів, що характеризує підвищення ефективності діагностики, розглянута статистика відмов турбокомпресорів NR34/S102, головного двигуна MAN B&W 32/04, а також причин появи відмов, наведених у таблицях 3.2 та у 3.3 (рис. 2).

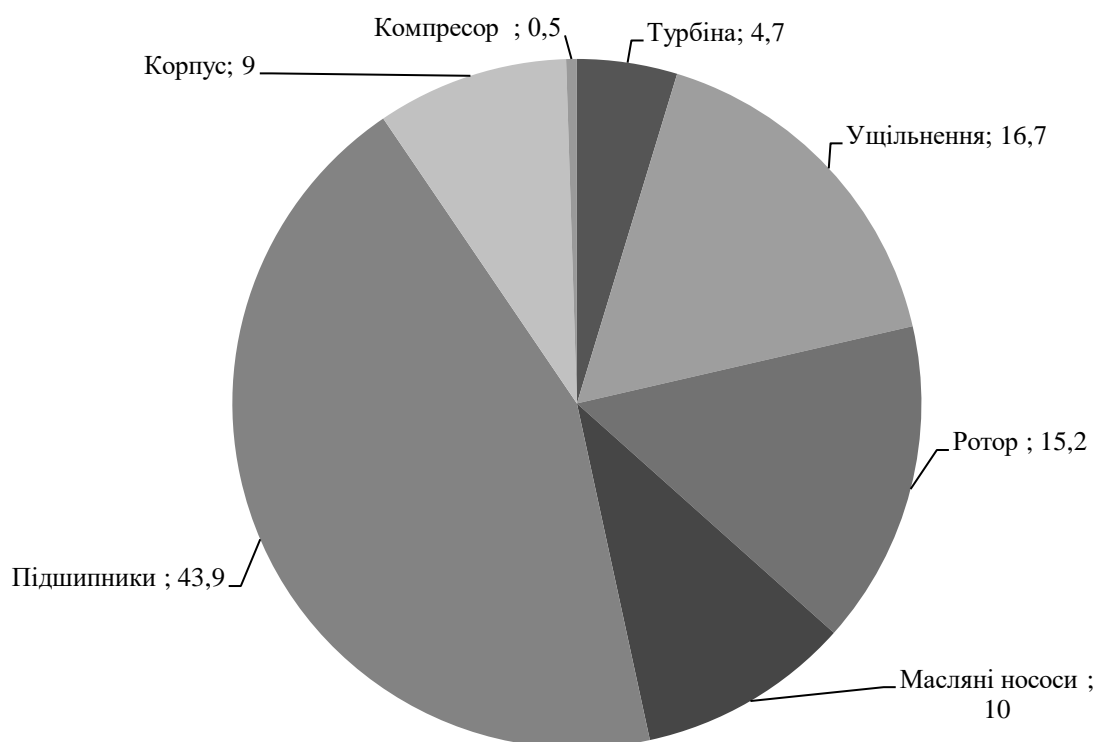


Рис. 2. Статистика відмов турбоагнітативів

Згідно зі статистичними даними таблиці 3.2 найбільше відмов 43,2% припадає на підшипники кочення. У структурі відмов підшипників кочення (табл. 3.3) відмови через знос становлять 44,7%. Цей вид відмов вимагає

зупинення обладнання та заміни пошкоджених елементів. Стосовно загальної кількості відмов головного двигуна ця частина становить 19,2%, що показує технічну сутність діагностики підшипників кочення.

На ресурс підшипників кочення впливають такі етапи його використання: монтаж, змащування, вивіряння, базовий моніторинг стану, демонтаж. Базовий моніторинг підшипників кочення включає вимірювання температури, частоти обертання, регулярні перевірки стану, шуму. Це дозволяє виявляти потенційні проблеми та допомагає запобігти зупинкам.

Практичний приклад технології заміни підшипників турбокомпресора VTR304P11/021 з деталізацією елементів технологій наведено на рис. 2.

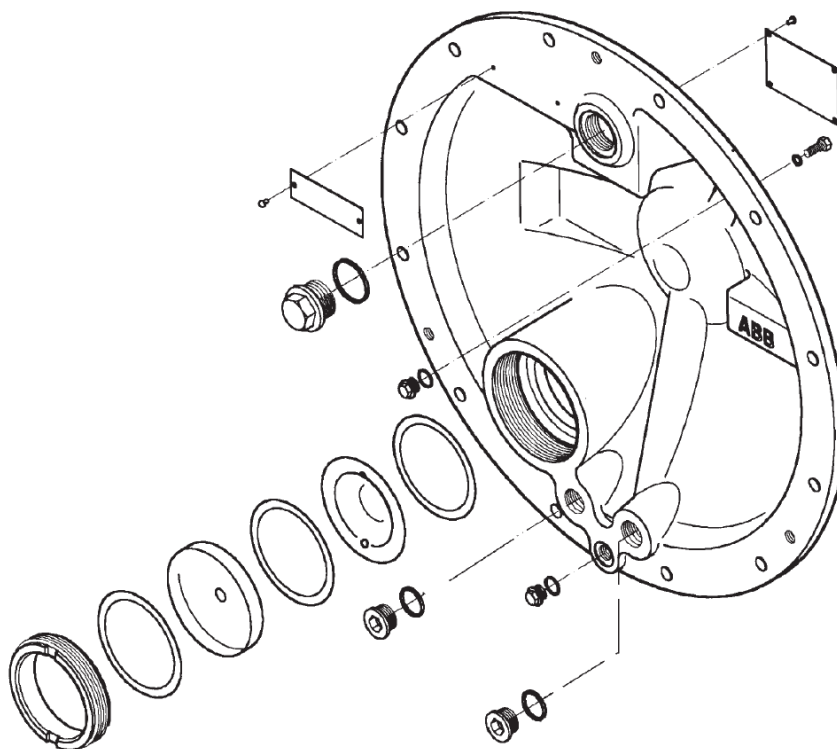


Рис. 2. Заміна підшипників кочення турбоагнітача VTR304P11/021

Статистика відмов після заміни підшипників кочення виглядає так:

- неправильний монтаж (16%);
- неправильне змащування (36%);
- забруднення (14%);
- втомне ушкодження (34%).

Наведена статистика виявляє деяку розбіжність показів із даними табл. 3.3. Проте підкреслює загальну тенденцію впливу зносу на експлуатаційні властивості підшипників кочення.

Усереднення результатів обчислень (19,2%) та наведених значень базового моніторингу, внаслідок втомних ушкоджень (34%), дозволяє виявити загальну ефективність моніторингу впровадження вібродіагностики підшипників кочення, яка становить 21,6%.

Математична обробка статистичних характеристик вібраційних сигналів підшипників кочення турбокомпресора з використанням нового діагностичного параметра – першої головної компоненти у часовій області та спектрального ексцесу з частотою 2,46 кГц дозволило визначити стан початку деградації матеріалу при його експлуатації та прогнозувати стадію початку руйнування.

Як випливає з аналізу транспортних перевезень у світі загальна тенденція експлуатації старих суден їх загальний ресурс становить 11,7 років. Порахувати ефективність моніторингу у розрахунку на світовий парк суден неможливо. Переходячи від процентних співвідношень до цілих чисел всього парку суден можна перейти від відсоткових до цілих оцінок. Таким чином, виконані обчислення на основі відмов підшипників кочення показують, що ефективність прогнозування залишкового ресурсу підшипників кочення за рахунок використання запропонованого методу зросла у 2,16 разів.

ДОДАТОК Д

ОПУБЛІКОВАНІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Публікації у фахових виданнях категорії «Б»:

7. Sharko, O., Yanenko, A.: Modeling intelligent software for the diagnostic and monitoring of ship power plant components using Markov chain. Наукоємні технології. 3(59), 251-261 (2023). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946> <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/SBT/issue/view/938> База даних – Google Scholar (Внесок автора: розроблено методичне забезпечення ланцюгів Маркова до діагностики зі заміною часових інтервалів послідовності станів системи).

8. Sharko O., Yanenko, A.: Synthesis of mathematical models for monitoring the technical condition of vehicles during their operation. Наукоємні технології. 1(61), 44-50 (2024). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.61.18514>, <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/18514> База даних – Google Scholar (Внесок автора: конкретизація математичних моделей інтелектуального забезпечення до різних видів моніторингу транспортних засобів).

9. Sharko, O., Yanenko, A.: Structuring the main directions of research to value the excess resource of transport structures and materials. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорту. 1(22), 47-54 (2024). DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1344> <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1344> База даних – Google Scholar (Внесок автора: аналіз сучасного стану розробок щодо визначення залишкового ресурсу).

10. Yanenko, A.: Intelligent system for monitoring the operational properties of ship power equipment. Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. 48, 205-219 (2024). DOI: https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/310713/302141

11. Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A., Yanenko, A.: Computer

diagnostics of the condition of ship rolling bearings during their operation Наукоємні технології. 48, 409-418 (2024). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.18952> , <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/18952> (Внесок автора: статистична обробка результатів обчислення параметрів вібраційних сигналів підшипників кочення при їх експлуатації)

12. Шарко, О., Степанчиков, Д., Шарко, А., Яненко, А., Мовчан, П.: Застосування багатокритеріального аналізу при дослідженні термодинамічних процесів у судноремонті та транспортній інфраструктурі. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 1(28), 117-133 (2024). DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.117-132>, <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/issue/view/34> (Внесок автора: вибір та обґрунтування критеріїв оптимізації фізико-механічних властивостей матеріалів для ремонту та експлуатації транспортних споруд)

Публікації, що проіндексовані у базі даних SCOPUS:

1. Sharko, A., Sharko, O., Stepanchikov, D., Yanenko, A.: Monitoring State of Marine Plain Bearings Based on Exponential Degradation Model. Proceedings of the 8th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems. Volume I: Machine Learning Workshop, Lviv, Ukraine, April 12-13, 48-58 (2024). <https://ceur-ws.org/Vol-3664/paper5.pdf> Database - Scopus (Внесок автора: побудова моделі прогнозування залишкового ресурсу транспортних засобів у процесі їх експлуатації).

2. Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A., Yanenko, A.: Multicriteria Approach to the Selection of Optimal Diagnostic Characteristics of Ship Bearings Monitoring. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 219, 242–257 (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-70959-3_12 Database - Scopus (Внесок автора: виконання експериментальних робіт, обробка результатів).

Тези доповідей:

6. Шарко, О.В., Яненко, А. В.: Діагностика та вимірjувальний контроль

елементів суднового енергетичного обладнання в умовах невизначеності характеру навантажень. Матеріали III Міжн. наук-практ. конф. «Дніпровські читання-2022». Київ: вид-во КІВТ ДУІТ, 8 грудня 2022 р., 129-130, https://files.duit.edu.ua/uploads/%D0%A1%D0%B0%D0%B9%D1%82/3_%D0%9D%D0%90%D0%A3%D0%9A%D0%90/conferences/international-scientific-and-practical-conferences/third-dnipro-reading-materials.pdf, (2022). (Внесок автора: опис проблеми діагностики елементів суднового енергетичного обладнання та напрямів її реалізації).

7. Шарко, О.В., Яненко, А.В.: Сучасні технології діагностування і визначення залишкового ресурсу елементів СЕУ в процесі експлуатації. Матеріали 14-й Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», м. Херсон, 2023 р., 75-77, <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2023.pdf>, (2023). (Внесок автора: аналіз сучасних технологій діагностики суднового обладнання)

8. Шарко, О.В., Клевцов, К.М., Степанчиков, Д.М., Яненко, А.В.: Організація моніторингу прогнозування технічного стану вузлів турбокомпресорів із використанням ланцюгів Маркова. Матеріали 14-й Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», м. Херсон, 2023 р., 148-150, <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2023.pdf>, (2023). (Внесок автора: побудова ймовірнісних моделей Марковських процесів).

9. Sharko, O.V., Yanenko, A.V.: Modeling of Intelligent Security

Diagnostics and Monitoring of Elements in Ship Installations by Lantsyugiv Markov. Materials of the XI international scientific-practical conference «Information Control Systems and Technologies» (ICST- ODESSA – 2023) 21th – 23th September 2023, Odessa, Ukraine, 216-220, <https://icst-conf.com/2023.pdf>, (2023). (Внесок автора: розробка інтелектуальних систем діагностики елементів суднових транспортних засобів).

10. Шарко, О.В., Яненко, А.В., Мовчан, П.В.: Система технічної діагностики визначення поточного стану транспортних пристроїв. Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (СЕУТТО-2024), 13-15 березня 2024 року, Херсон, Україна, 39-41 <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2024/03/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2024.pdf>, (2024). (Внесок автора: класифікація інструментальних методів та засобів спостереження за станом обладнання в процесі його експлуатації).