

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СОРОКА ВЯЧЕСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 629.5.064+681.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ
УСТАНОВКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ
ВІБРАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ**

Спеціальність: 271 Морський та внутрішній водний транспорт
Галузь знань: 27 Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

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

Науковий керівник: Мельник Ольга Володимирівна
кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Сорока В.В. Розробка методів діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт. Державний університет інфраструктури та технологій. Київ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню та подальшому розвитку методів автоматичного виділення та обробки вібраційних параметрів для встановлення стану головної енергетичної установки в складних умовах експлуатації засобів водного транспорту.

Основними методами підвищення надійності і безпеки функціонування суднових енергетичних систем (СЕУ) при їх проектуванні та експлуатації є:

- удосконалення їх конструкції;
- технології виробництва та обслуговування;
- резервування;
- збільшення коефіцієнта запасу;
- контроль працездатності.

Для великих агрегатів у складі СЕУ резервування та підвищення коефіцієнта запасу недоцільне економічно та неможливо через необхідність збільшення маси та габаритів. Отже найважливішим напрямом підвищення надійності та безпеки функціонування таких агрегатів стає оцінка та прогноз їх працездатності під час експлуатації.

Для оцінки поточної працездатності СЕУ на суднах традиційно використовуються автоматичні системи централізованого контролю та управління. Їх основним призначенням є оцінка якості виконання СЕУ заданих експлуатаційних режимів. Але дані системи не дозволяють вирішити завдання завчасного прогнозування втрати працездатності найбільш

навантажених і схильних до відмови елементів СЕУ – роторних машин, оскільки контрольовані параметри технологічних процесів є або інерційними і не змінюються синхронно з розвитком несправностей, або не реагують на розвиток ряду небезпечних дефектів аж до наступу незворотних наслідків.

Як свідчить світова практика промислового виробництва та експлуатації енергоємних транспортних засобів, паралельно автоматичним системам контролю, управління та захисту багатьох нерезервованих судових роторних машин все частіше використовуються переносні і стаціонарні системи моніторингу стану, діагностики та оцінки залишкового ресурсу за сигналом вібрації.

Такі системи функціонують, як правило, за участю експерта, а глибина діагностування та час прогнозу дозволяють не лише запобігти аварійним ситуаціям, а й заздалегідь запланувати обслуговування та ремонт, що у багатьох випадках дає суттєвий економічний ефект. Аналіз відомих методів автоматичної обробки вібраційного сигналу та виділених з нього параметрів виявив проблеми їх застосування в судових умовах, що обмежують ефективність діагностування роторних машин СЕУ через властиві їм флуктуації частоти обертання та віброактивності.

Дані методи можуть використовуватись як в інформаційних системах для підтримки прийняття рішень оператором, організації обслуговування за фактичним станом та збору об'єктивної інформації про зміну вібраційної картини в реальних умовах експлуатації, так і в автоматичних системах керування технічними засобами за фактичним станом. Тому розвиток методів автоматичного виділення та обробки вібраційних параметрів з метою підвищення ефективності встановлення діагнозу головної енергетичної установки в складних умовах експлуатації є **актуальною** темою наукового дослідження.

Отже, **науковим завданням** в дисертаційній роботі визначено розробка методів діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дослідження спрямоване на реалізацію Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України №430-р від 30 травня 2018 року) і виконане відповідно до положень Морської доктрини України на період до 2035 року (Постанова №1307 Верховної Ради України від 07.10.2009 року, зі змінами від 18.12.2018 року, №1108). Дисертаційна робота виконана у рамках планових наукових досліджень Державного університету інфраструктури і технологій.

Результати дослідження використані:

– метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів, що дозволяє підвищити точність визначення параметрів слабких гармонійних компонентів, які можуть характеризувати вид та ступінь розвитку небезпечних дефектів використовуються в навчальному процесу факультету експлуатації технічних система на водному транспорті на кафедрі суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації при викладанні дисципліни «Теорія автоматичного управління та автоматизація суднових енергетичних установок» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт впровадження № 187/01-18 від 28.02.2024 р.).

– метод автоматичної адаптації порогових значень для вирішення завдання своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів, що дозволяє виявляти та прогнозувати небезпечну зміну технічного стану без необхідності стандартного завищення порогів при нестабільній віброактивності, у ході апробації результатів дисертаційної роботи Сороки В.В. у ПАТ «Дунайсудноремонт», було підтверджено практичну значущість та доцільність подальшого впровадження (акт № 51 від 22.03.2024 р.);

– метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій використовуються в

навчальному процесу факультету експлуатації технічних система на водному транспорті на кафедрі суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації при викладанні дисциплін «Суднові двигуни внутрішнього згорання» та «Технічне обслуговування та ремонт суднових технічних засобів» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт впровадження № 187/01-11 від 28.02.2024 р.

Мета і завдання досліджень. *Метою* дисертаційної роботи є підвищення ефективності діагностування елементів головної енергетичної установки водного транспорту з застосуванням методів вібродіагностики.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення таких *часткових завдань дослідження*:

1. Провести аналітичний огляд методів та засобів моніторингу та діагностики, що використовують сигнал вібрації, аналіз їх особливостей та проблем застосування в суднових умовах.

2. Розробка методу автоматичного виділення діагностичних параметрів різної природи із сигналу вібрації роторних машин за нестабільної частоти обертання їх валів.

3. Розробка методу автоматичної оцінки діагностичної значущості та прогнозу змін параметрів вібрації при нестабільній віброактивності.

4. Розробка методу автоматичного прийняття діагностичних рішень, інваріантного до виду об'єкта контролю та що дозволяє враховувати просторові ознаки дефектів.

5. Апробація запропонованих рішень та розроблення рекомендацій щодо їх впровадження.

Об'єктом дослідження є процеси експлуатації головної енергетичної установки засобів водного транспорту.

Предметом дослідження є методи діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів обумовлена новим рішенням

наукового завдання розроблення методів діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу.

Отримані такі наукові результати:

1) *вперше* розроблено метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій, який є інваріантним до типу об'єкта діагностування з прив'язкою до конкретного агрегату за допомогою складання конфігураційної матриці;

2) *удосконалено* метод автоматичної адаптації порогових значень для вирішення завдання своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів, який, на відміну від існуючих, заснований на організації накопичення усереднених вібродіагностичних параметрів та величин їх зміни у буферах різної часової тривалості, що дозволяє виявляти та прогнозувати небезпечну зміну технічного стану без необхідності стандартного завищення порогів при нестабільній віброактивності;

3) *одержав подальший розвиток* метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів, який, на відміну від існуючих, використовує одночасно виміряні в одній точці спектри з різною частотною роздільною здатністю для мінімізації спотворень форми гармонійних складових при нестабільності їх параметрів та дозволяє підвищити точність визначення параметрів слабких гармонійних компонентів, які можуть характеризувати вид та ступінь розвитку небезпечних дефектів, в умовах характерної для суднових умов нестабільності частоти обертання без необхідності використання синхронної з положенням валу вибірки, неефективною або недоступною для багатьох суднових машин.

Методи дослідження. У ході виконання роботи використані:

– методи теоретичного та емпіричного дослідження сигналів вібрації різних роторних машин – для розроблення комплексного методу вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту;

– методи та математичний апарат кореляційної теорії випадкових процесів – для визначення параметрів гармонійних та випадкових компонентів вузькосмугових спектрів;

– методи цифрової обробки сигналів (перетворення Фур'є, перетворення Гілберта, метод Уелша) – для зменшення похибки при обчисленні окремих близько розташованих складових спектрів гармонійних і полігармонійних сигналів;

– методи статистики (регресійний аналіз, критерій найменших квадратів) – для оцінки типових змін для виявлення нетипового зростання діагностичних параметрів процесі контролю технічного стану головної енергетичної установки;

– методи комп'ютерного моделювання – для апробації комплексного методу вібродіагностики, а саме методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів і методу автоматичної адаптації порогових значень;

– математичний апарат теорії матриць – для опису дефектів і формування діагностичної матриці при побудові конфігурації діагностичного модуля.

Обґрунтованість і достовірність одержаних у роботі наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується базуванням роботи на доведених положеннях фундаментальних та прикладних наук, комплексним використанням відомих, загальноприйнятих, перевірених практикою теоретичних та емпіричних методів дослідження; узгодженістю з відомими теоретичними положеннями науки; несуперечливістю і збіжністю отриманих результатів офіційній статистиці експлуатації енергетичних установок морських суден, емпіричним даним, результатам експериментальних досліджень та моделювання; публікаціями основних результатів дослідження в рецензованих виданнях; обговоренням проміжних та остаточних результатів дослідження на конференціях різних рівнів; впровадженням результатів дисертаційного дослідження у виробничу діяльність ПАТ «Дунайсудноремонт»; впровадженням результатів дисертаційного дослідження у навчальний процес Державного університету інфраструктури і

технологій факультету експлуатації технічних система на водному транспорті на кафедрі суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації при викладанні дисциплін «Суднові двигуни внутрішнього згорання», «Теорія автоматичного управління та автоматизація суднових енергетичних установок» та «Технічне обслуговування та ремонт суднових технічних засобів».

Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні методів діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу, а саме:

- розробці методів автоматичного виділення та обробки вібродіагностичних параметрів, що дозволяють виявляти та прогнозувати зміну технічного стану роторних машин у складних суднових умовах та можуть використовуватись в інформаційних системах діагностики для забезпечення безпеки функціонування та організації обслуговування СЕУ та їх елементів, а також в автоматичних системах управління ними за станом;

- розробці методу адаптації порогових значень вирішує завдання своєчасного виявлення та прогнозу зміни технічного стану за наявності природних монотонних різноспрямованих змін контрольованих параметрів вібрації суднових енергетичних установок.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, засіб водного транспорту, експлуатація, точність, двигун, безпека судноводіння, паровий котел, вагові коефіцієнти, експлуатація суден, суднова енергетична установка, технічний стан, діагностування, судновий дизель, система мащення, змащення, морський дизельний двигун, моніторинг, режим роботи. тверде паливо, запобіжний клапан, фільтр вібродіагностика

ABSTRACT

Soroka V.V. Development of diagnostic methods for a water transport power plant via vibration analysis. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 271 Maritime and Inland Water Transport. – The State University of Infrastructure and Technologies. Kyiv, 2024.

This thesis is devoted to the study and further development of methods for the automatic extraction and processing of vibration parameters to establish the state of the main power plant in difficult operating conditions of water transport.

The main methods of improving the reliability and safety of ship power systems (SPS) during their design and operation are as follows:

- improvement of their design;
- production and maintenance technologies;
- redundancy;
- increase of the safety factor;
- performance monitoring.

For large units in the SPS, redundancy and increase of the safety factor are economically impractical and impossible due to the need to increase the weight and dimensions. Therefore, the most important area for improving the reliability and safety of such units is the assessment and forecasting of their performance during operation.

Automatic centralised monitoring and control systems are traditionally used on ships to assess the current performance of SPS. Their main purpose is to assess the quality of the SPS performance in the specified operating modes. However, these systems do not allow solving the problem of early prediction of the loss of efficiency of the most loaded and failure-prone elements of the SPS – rotary machines, since the controlled parameters of technological processes are either

inertial and do not change synchronously with the development of faults, or do not respond to the development of several dangerous defects until the onset of irreversible consequences.

According to the global practice of industrial production and operation of energy-intensive vehicles, portable and stationary systems for monitoring, controlling and protecting many unredundant ship rotary machines are increasingly used in parallel with automatic systems for monitoring, controlling and protecting them, as well as for diagnosing and assessing their remaining service life based on vibration signals.

Such systems usually operate with the participation of an expert, and the depth of diagnosis and forecast time allow not only to prevent emergencies but also to plan maintenance and repairs in advance, which in many cases has a significant economic effect. An analysis of the known methods of automatic processing of the vibration signal and the parameters extracted from it has revealed problems with their application in shipboard conditions, which limit the efficiency of diagnosing rotary machinery of the ESP due to their inherent fluctuations in rotational speed and vibration activity.

These methods can be used both in information systems to support operator decision-making, organise maintenance based on the actual state and collect objective information on changes in the vibration pattern under real operating conditions, and in automatic control systems for controlling technical means based on the actual state. Therefore, the development of methods for the automatic extraction and processing of vibration parameters to increase the efficiency of diagnosing the main power plant under difficult operating conditions is an **urgent** topic of scientific research.

Thus, the **scientific task** of the dissertation is to develop methods for diagnosing the main power plant of water transport vehicles based on vibration analysis.

Relationship of the work with scientific programmes, plans, topics, grants.

The research is aimed at implementing the National Transport Strategy of

Ukraine for the period up to 2030 (Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 430-r of May 30, 2018) and was carried out in accordance with the provisions of the Maritime Doctrine of Ukraine for the period up to 2035 (Resolution No. 1307 of the Verkhovna Rada of Ukraine of 07.10.2009, as amended on 18.12.2018, No. 1108). The dissertation was completed as part of the planned scientific research of the State University of Infrastructure and Technology, in which the applicant is the author of certain sections.

The results of the study were used:

- the method of automatic processing of narrowband spectra, which allows to increase the accuracy of determining the parameters of weak harmonic components that can characterize the type and degree of development of dangerous defects are used in the educational process of the Faculty of Operation of Technical Systems on Water Transport at the Department of Ship Power Plants, Auxiliary Mechanisms of Ships and Their Operation in teaching the discipline "Theory of Automatic Control and Automation of Ship Power Plants" for applicants for the first (bachelor's) degree of higher education in the specialty 271 Maritime and Inland Water Transport (implementation act № 187/01-11 of 28.02.2024);

- a method of automatic adaptation of threshold values to solve the problem of timely detection of changes in technical condition against the background of natural monotonic changes in vibration parameters characteristic of ship conditions, which allows to detect and predict a dangerous change in technical condition without the need for standard overestimation of thresholds in case of unstable vibration activity, during the testing of the results of the dissertation work of Soroka V.V. at PJSC «Dunai Ship Repair», the practical significance and effectiveness of further implementation was confirmed implementation act № 51 of 22.03.2024);

- the method of automatic diagnostics based on the results of monitoring of vibration parameters of different nature and assessment of the diagnostic significance of their changes against the background of natural monotonic fluctuations was used in the educational process of the Faculty of Navigation at the

Department of Ship Power Plants, Auxiliary Mechanisms of Ships and Their Operation in teaching the disciplines "Marine Internal Combustion Engines" and «Maintenance and Repair of Shipboard Equipment» for applicants for the first (bachelor's) level of higher education in the specialty 271 Maritime and Inland Water Transport (implementation act No. 187/01-11 of 28.02.2024).

Purpose and objectives of the research. The *aim* of the dissertation is to improve the efficiency of diagnosing the elements of the main power plant of water transport using vibration diagnostics methods.

Achieving this goal requires solving the following *partial research tasks*:

1. To carry out an analytical review of methods and means of monitoring and diagnostics that use the vibration signal, analyse their features and problems of application in shipboard conditions.
2. To develop a method for automatic extraction of diagnostic parameters of different nature from the vibration signal of rotary machines at unstable shaft rotation frequency.
3. Development of a method for automatic estimation of diagnostic significance and forecasting changes in vibration parameters under unstable vibration activity.
4. Development of a method for automatic diagnostic decision-making, invariant to the type of control object and allowing to take into account the spatial features of defects.
5. Testing of the proposed solutions and development of recommendations for their implementation.

The object of *research* is the processes of operation of the main power plant of water transport means.

The *subject of the study* is the methods of diagnostics of the main power plant of water transport vehicles based on vibration analysis.

The *scientific novelty of the results obtained* is due to a new solution to the scientific task of developing methods for diagnosing the main power plant of water transport vehicles based on vibration analysis.

The following scientific results were obtained:

1) *for the first time*, a method of automatic diagnostics based on the results of monitoring vibration parameters of different nature and assessing the diagnostic significance of their changes against the background of natural monotonic fluctuations, which is invariant to the type of diagnostic object with reference to a specific unit by drawing up a configuration matrix.

2) the method of automatic processing of narrow-band spectra was further developed, which, unlike the existing ones, uses simultaneously measured spectra with different frequency resolutions at the same point to minimize distortions of the shape of harmonic components in case of instability of their parameters and allows to increase the accuracy of determining the parameters of weak harmonic components that can characterize the type and degree of development of dangerous defects, under conditions of instability of rotation frequency characteristic of ship conditions without the need for correction

2) the method of automatic adaptation of threshold values for solving the problem of timely detection of changes in the technical condition against the background of natural monotonous changes in vibration parameters characteristic of ship conditions, which, unlike the existing ones, is based on the organization of accumulation of averaged vibration diagnostic parameters and their change values in buffers of different time duration, which allows detecting and predicting a dangerous change in the technical condition without the need for standard overestimation of thresholds in case of unstable vibration activity.

Research methods. In the course of the work, the following methods were used:

- methods of theoretical and empirical study of vibration signals of various rotary machines – for the development of a comprehensive method of vibration diagnostics of the main power plant of water transport means;

- methods and mathematical apparatus of the correlation theory of random processes – to determine the parameters of harmonic and random components of narrowband spectra;

- methods of digital signal processing (Fourier transform, Gilbert transform, Welch method) – to reduce the error in calculating individual closely spaced components of spectra of harmonic and polyharmonic signals;
- statistical methods (regression analysis, least squares criterion) – to assess typical changes to detect atypical growth of diagnostic parameters in the process of monitoring the technical condition of the main power unit;
- computer modelling methods – for testing the complex method of vibration diagnostics, namely the method of automatic processing of narrowband spectra and the method of automatic adaptation of threshold values;
- mathematical apparatus of matrix theory – for describing defects and forming a diagnostic matrix when building a diagnostic module configuration.

The *validity and reliability* of the scientific results, conclusions and recommendations obtained in the work are confirmed by basing the work on the proven provisions of fundamental and applied sciences, the integrated use of well-known, generally accepted, practice-tested theoretical and empirical research methods; consistency with the known theoretical positions of science; consistency and convergence of the results obtained with the official statistics of operation of power plants of ships, empirical data, results of experimental studies and modelling; publications of the main research results in peer-reviewed journals; discussion of intermediate and final research results at conferences of various levels; implementation of the results of the dissertation research in the production activities of the PJSC «Dunai Ship Repair», which is the owner and operator of large-tonnage transport vessels; implementation of the results of the dissertation research in the educational process of the State University of Infrastructure and Technology, Faculty of Technical Systems Operation on Water Transport, Department of Ship Power Plants, Auxiliary Mechanisms of Ships and Their Operation in teaching the disciplines "Marine Internal Combustion Engines", "Theory of Automatic Control and Automation of Ship Power Plants" and "Maintenance and Repair of Ship Equipment".

The *practical significance of the work* is to substantiate the methods of diagnostics of the main power plant of water transport means based on vibration analysis, namely:

- development of methods for automatic selection and processing of vibration diagnostic parameters that allow detecting and predicting changes in the technical condition of rotary machines in difficult ship conditions and can be used in diagnostic information systems to ensure the safety of operation and organisation of maintenance of the main power plant and their elements, as well as in automatic control systems for their condition;
- the development of the method of adaptation of threshold values solves the problem of timely detection and forecasting of changes in the technical condition in the presence of natural monotonous multidirectional changes in the controlled vibration parameters of ship power plants.

Keywords: internal combustion engine, water transport, operation, accuracy, engine, navigation safety, steam boiler, weight coefficients steam boiler, ship operation, ship power plant, technical condition, diagnostics, marine diesel, lubrication system, lubrication, marine diesel engine, monitoring , operating mode. solid fuel, safety valve, filter, vibration diagnostics.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Сорока В. В., Гаталяк М. Я., Мельник О. В. Методи зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів судових дизелів. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. «Водний транспорт». 2021. № 1(32). С. 64–74. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2021.1.32.08>.
2. Сорока В. В. Контроль та оцінювання стану підшипників судового валопроводу. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. «Водний транспорт». 2021. № 3(34). С. 31–38. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2021.3.34.04>.
3. Сорока В. В., Мельник О. В., Довгаль І. І. Математична модель оцінювання змащувальної здатності судових дистильтних палив. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. «Водний транспорт». 2023. № 2(36). С. 120–134. URL <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.10>.
4. Сорока В., Мельник О. Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів. Вісник Приазовського Державного технічного університету. 2023. № 47. С. 349-359. doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300121
https://journals.urau.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/300121/292598
5. Сорока В., Гороховська О. Практичне застосування методу автоматичної адаптації сигналів вібродіагностики до порогових значень. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій «Водний транспорт». 2024. №. 39 (1). С. 83–92. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.08
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/321/278>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Soroka V., Herasymov S., Milevskyi S., Pohasii S., Yevseiev S. Phase-Modulated signals synthesis method to control information transmission channels . 2023 *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2–6 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312859>. (*Scopus*)
2. Soroka V., Herasimov S., Tkachov A., Milevska T., Dunaiev S. Method for assessing meter error characteristics of random signals. 2023 *7th International symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkiye, 26–28 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ismsit58785.2023.10304988> (*Scopus*).
3. Soroka V., Herasimov S., Yevseiev S., Tkachov A., Milevska T., Dunaiev S Development of a method for digital synthesis of electrical signals with a normalized harmonic coefficient. 2023 *5th International congress on human-computer interaction, optimization and robotic applications (HORA)*, Istanbul, Turkiye, 8–10 June 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/hora58378.2023.10156678> (*Scopus*).
4. Viacheslav S., Herasimov S., Yevseiev S., Milevskyi S., Bondarenko K. Development of a method for measuring small nonlinear distortions of periodic electrical signals. 2022 *International symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkey, 20–22 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/ismsit56059.2022.9932685> (*Scopus*).
5. Сорока В.В., Кукалець Л.М., Гусєв В.С., Далаков О.І. Аналіз резерву протизносних властивостей низькосірчистих суднових дистилатних палив. *Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські Читання-2022»*, : матеріали III Міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 8 груд. 2022 р.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ, ТЕРМІНІВ ...	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ	28
1.1 Суднова енергетична установка засобів водного транспорту як складна технічна система.....	28
1.2 Завдання оцінювання працездатності суднових енергетичних установок..	34
1.3 Завдання оцінювання вібропараметрів суднових енергетичних установок..	36
1.4 Дослідження методів вібродіагностики суднової енергетичної установки та постановка наукового завдання.....	45
1.4.1 Аналіз наукового завдання виділення діагностичних параметрів із сигналу вібрації.....	45
1.4.2 Методи виділення компонентів вібросигналів різної природи	49
1.4.3 Методи спектрального аналізу вібросигналів	56
Висновки до розділу 1	66
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ТА КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТИКИ, ЛАБОРАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	68
2.1 Обґрунтування показників та критеріїв оцінювання ефективності головної енергетичних установок та аналіз існуючих наукових розробок .	68
2.1.1 Критерій енергозбереження головної енергетичної установки	68
2.1.2 Критерій екологічної ефективності головної енергетичної установки	71
2.1.3 Паливозбереження та управління режимами роботи пропульсивного комплексу.....	73
2.1.4 Показники діагностики головної енергетичної установки.....	76
2.2 Аналіз методів та моделей інтелектуального управління складними	

об'єктами.....	79
2.3 Структура системи автоматизованого діагностування.....	82
Висновки до розділу 2	86
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДУ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ	87
3.1 Розроблення методу автоматичного оброблення вузькосмугових спектрів	87
3.1.1 Структура методу автоматичного оброблення вузькосмугових спектрів	87
3.1.2 Алгоритм побудови лінії фону для поділу спектральних відліків ...	93
3.1.3 Визначення параметрів гармонійних та випадкових компонентів...	96
3.2 Розроблення методу автоматичної адаптації порогових значень вібродіагностики	108
3.2.1 Обґрунтування структури методу	108
3.2.2 Алгоритм накопичення діагностичних параметрів.....	113
3.2.3 Визначення порогових значень та прогноз моменту їх досягнення ..	116
3.2.4 Апроксимація часових рядів та оцінка тенденції до зростання.....	122
3.3 Розроблення методу автоматичної діагностики	129
3.3.1 Сутність методу автоматичної діагностики.....	129
3.3.2 Схема методу автоматичної діагностики	132
Висновки до розділу 3	136
РОЗДІЛ 4 . ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДУ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ	137
4.1 Апробація та рекомендації щодо застосування методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів.....	137
4.1.1 Апробація методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів.	137
4.1.2 Апробація удосконаленого методу на сигналах з фоном	143
4.1.3 Апробація удосконаленого методу для реальних сигналів	146

4.2 Апробація та рекомендації що застосування методу автоматичної адаптації порогових значень	155
4.2.1 Порядок апробації розробленого методу	155
4.2.2 Апробація методу на типових сигналів	159
4.2.3 Оцінювання ефективності прогнозу із застосуванням розробленого методу.....	164
4.3 Апробація комплексного методу вібродіагностики та обґрунтування конфігурації діагностичного модуля	169
4.3.1 Опис дефектів та формування діагностичної матриці.....	169
4.3.2 Рекомендації щодо впровадження розроблених рішень.....	174
Висновки до розділу 4	181
ВИСНОВКИ.....	184
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	189
ДОДАТКИ.....	202

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ, ТЕРМІНІВ

АЦП	— аналогово-цифровий перетворювач;
АЧХ	— амплітудно-частотна характеристика;
БОС	— блок обробки сигналів;
БП	— блок підсилювачів;
ГЕУ	— головна енергетична установка;
ГТД	— газотурбінний двигун;
ДВ	— датчик вібрації;
ДВЗ	— двигун внутрішнього згоряння;
ЕНП	— електронезалежна пам'ять;
ІД	— індукційний датчик;
ЛМУ	— локальна мережа управління;
ЛСК	— локальна система управління;
МНК	— метод найменших квадратів;
МУІ	— метод ударних імпульсів;
ПЗ	— програмне забезпечення;
ПМ	— програмний модуль;
СЕУ	— суднова енергетична установка;
СКВ	— середньо квадратичне значення;
СКЗ	— середньоквадратичне значення;
СН	— схема нормалізації;
СНУК та Ж	— схема нормалізації, управління, контролю та живлення;
СП	— сигнальний процесор;
СПЗ	— спеціальне програмне забезпечення;
СЦК	— система централізованого контролю;
ЦО	— центральний обчислювач;
ШПФ	— швидке перетворення Фур'є.

ВСТУП

Актуальність теми роботи.

Основними методами підвищення надійності і безпеки функціонування суднових енергетичних систем (СЕУ) при їх проектуванні та експлуатації є:

- удосконалення їх конструкції;
- технології виробництва та обслуговування;
- резервування;
- збільшення коефіцієнта запасу;
- контроль працездатності [2, 26, 30].

Для великих агрегатів у складі СЕУ резервування та підвищення коефіцієнта запасу недоцільне економічно та неможливо через необхідність збільшення маси та габаритів. Отже найважливішим напрямом підвищення надійності та безпеки функціонування таких агрегатів стає оцінка та прогноз їх працездатності під час експлуатації.

Для оцінки поточної працездатності СЕУ на судах традиційно використовуються автоматичні системи централізованого контролю та управління. Їх основним призначенням є оцінка якості виконання СЕУ заданих експлуатаційних режимів. Але дані системи не дозволяють вирішити завдання завчасного прогнозування втрати працездатності найбільш навантажених і схильних до відмови елементів СЕУ – роторних машин, оскільки контрольовані параметри технологічних процесів є або інерційними і не змінюються синхронно з розвитком несправностей, або не реагують на розвиток ряду небезпечних дефектів аж до наступу незворотних наслідків.

Як свідчить світова практика промислового виробництва та експлуатації енергоємних транспортних засобів [32, 54], паралельно автоматичним системам контролю, управління та захисту багатьох нерезервованих суднових роторних машин все частіше використовуються переносні та стаціонарні системи моніторингу стану, діагностики та оцінки залишкового ресурсу за сигналом вібрації.

Такі системи функціонують, як правило, за участю експерта, а глибина діагностування та час прогнозу дозволяють не лише запобігти аварійним ситуаціям, а й заздалегідь запланувати обслуговування та ремонт, що у багатьох випадках дає суттєвий економічний ефект. Аналіз відомих методів автоматичної обробки вібраційного сигналу та виділених з нього параметрів виявив проблеми їх застосування в суднових умовах, що обмежують ефективність діагностування роторних машин СЕУ через властиві їм флуктуації частоти обертання та віброактивності.

Дані методи можуть використовуватись як в інформаційних системах для підтримки прийняття рішень оператором, організації обслуговування за фактичним станом та збору об'єктивної інформації про зміну вібраційної картини в реальних умовах експлуатації, так і в автоматичних системах керування технічними засобами за фактичним станом. Тому розвиток методів автоматичного виділення та обробки вібраційних параметрів з метою підвищення ефективності встановлення діагнозу головної енергетичної установки в складних умовах експлуатації є **актуальною** темою наукового дослідження.

Об'єктом дослідження є процеси експлуатації головної енергетичної установки засобів водного транспорту.

Предметом дослідження є методи діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу.

Науковим завданням в дисертаційній роботі визначено розробка методів діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності діагностування елементів головної енергетичної установки водного транспорту з застосуванням методів вібродіагностики.

Часткові наукові завдання дослідження.

1. Провести аналітичний огляд методів та засобів моніторингу та діагностики, що використовують сигнал вібрації, аналіз їх особливостей та проблем застосування в суднових умовах.

2. Розробка методу автоматичного виділення діагностичних параметрів різної природи із сигналу вібрації роторних машин за нестабільної частоти обертання їх валів.

3. Розробка методу автоматичної оцінки діагностичної значущості та прогнозу змін параметрів вібрації при нестабільній віброактивності.

4. Розробка методу автоматичного прийняття діагностичних рішень, інваріантного до виду об'єкта контролю та що дозволяє враховувати просторові ознаки дефектів.

5. Апробація запропонованих рішень та розроблення рекомендацій щодо їх впровадження.

Нові наукові результати.

1. *Вперше* розроблено метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій, який є інваріантним до типу об'єкта діагностування з прив'язкою до конкретного агрегату за допомогою складання конфігураційної матриці.

2. *Удосконалено* метод автоматичної адаптації порогових значень для вирішення завдання своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів, який, на відміну від існуючих, заснований на організації накопичення усереднених вібродіагностичних параметрів та величин їх зміни у буферах різної часової тривалості, що дозволяє виявляти та прогнозувати небезпечну зміну технічного стану без необхідності стандартного завищення порогів при нестабільній віброактивності.

3. *Одержав подальший розвиток* метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів, який, на відміну від існуючих, використовує одночасно виміряні в одній точці спектри з різною частотною роздільною здатністю для мінімізації спотворень форми гармонійних складових при нестабільності їх параметрів та дозволяє підвищити точність визначення параметрів слабких гармонійних компонентів, які можуть характеризувати

вид та ступінь розвитку небезпечних дефектів, в умовах характерної для суднових умов нестабільності частоти обертання без необхідності використання синхронної з положенням валу вибірки, неефективною або недоступною для багатьох суднових машин.

Практична значимість розроблених методів полягає у подальшому удосконаленні системи діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на базі розроблених моделей і методів вібраційного аналізу, що дозволяють підвищити ефективність діагностування елементів із застосуванням методів вібродіагностики та обробки сигналів вібрації, а саме:

1. Розроблені методи автоматичного виділення та обробки вібродіагностичних параметрів дозволяють виявляти та прогнозувати зміну технічного стану роторних машин у складних суднових умовах та можуть використовуватись в інформаційних системах діагностики для забезпечення безпеки функціонування та організації обслуговування СЕУ та їх елементів, а також в автоматичних системах управління ними за станом.

2. Метод адаптації порогових значень вирішує завдання своєчасного виявлення та прогнозу зміни технічного стану за наявності природних монотонних різноспрямованих змін контрольованих параметрів вібрації суднових енергетичних установок.

Методи дослідження.

В галузі вібраційної діагностики можна виділити праці таких фахівців як: Чепурний Ю.В., Войтов В.В., Четвержук Т.І., Бабак С.В. [8, 12, 45, 56] та зарубіжних фахівців Bently D.E., Harris C.M., Mitchell J.S. [65, 76, 78, 90]. За останні роки в цій галузі були виконані дослідження щодо діагностування конкретних типів обладнання, розвитку окремих вібродіагностичних методів та способів обробки сигналів вібрації.

При вирішенні поставлених завдань використовувалися:

– методи теоретичного та емпіричного дослідження сигналів вібрації різних роторних машин – для розроблення комплексного методу вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту;

– методи та математичний апарат кореляційної теорії випадкових процесів – для визначення параметрів гармонійних та випадкових компонентів вузькосмугових спектрів;

– методи цифрової обробки сигналів (перетворення Фур'є, перетворення Гілберта, метод Уелша) – для зменшення похибки при обчисленні окремих близько розташованих складових спектрів гармонійних і полігармонійних сигналів;

– методи статистики (регресійний аналіз, критерій найменших квадратів) – для оцінки типових змін для виявлення нетипового зростання діагностичних параметрів процесі контролю технічного стану головної енергетичної установки;

– методи комп'ютерного моделювання – для апробації комплексного методу вібродіагностики, а саме методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів і методу автоматичної адаптації порогових значень;

– математичний апарат теорії матриць – для опису дефектів та формування діагностичної матриці при побудові конфігурації діагностичного модуля.

Особистий внесок здобувача. Нові наукові результати дисертації отримані автором особисто. В основних наукових роботах, які написані в співавторстві, здобувачеві належать: [97] – аналіз основних методів зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів суднових дизелів та їх вплив на діагностичні параметри у процесі контролю технічного стану головної енергетичної установки; [99] – розробка математичної моделі оцінювання змащувальної здатності суднових дистилатних палив; [100] – вдосконалення та інтеграція методів вібродіагностики головної енергетичної установки суден; [101] – питання практичного застосування методу автоматичної адаптації сигналів вібродіагностики до порогових значень. Стаття [98] виконана одноосібно.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідалися та були схвалені на 5 міжнародних наукових, науково-

технічних і науково-практичних конференціях і симпозіумах, у тому числі: міжнародній науково-технічній конференції *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, м. Харків (2-6 жовтня 2023 року); *7th International symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkiye (26–28 October 2023); *5th International congress on human-computer interaction, optimization and robotic applications (HORA)*, Istanbul, Turkiye (8–10 June 2023); *International symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkey (20–22 October 2022); *III Міжнародній науково-практичній конференції «Дніпровські Читання-2022»*, м. Київ (8 грудня 2022 року).

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації містить 205 сторінки друкованого комп'ютерного тексту. Основний зміст дисертаційної роботи викладено на 182 сторінках. Робота містить 4 таблиць, 51 рисунок, список використаних джерел із 106 найменувань, що розміщено на сторінках 189-202, 2 додатки на 4 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

У розділі розкрита сутність і контури управління головною енергетичною установкою (ГЕУ) як складною технічною системою. Проведений аналіз існуючих методів діагностики складної системи та їх вплив на енергетичні та екологічні показники роботи. Доведено, що віброаналіз є перспективним методом діагностики, який дозволяє охопити найбільшу кількість параметрів, що діагностуються. Наведені математичні моделі віброаналізу та приводяться відомі пристрої. Виконано постановку наукового завдання.

У розділі доведено актуальність теми дослідження, визначені методи та моделі проведення дослідження та постановлено наукове завдання.

1.1 Суднова енергетична установка засобів водного транспорту як складна технічна система

До складу судна зазвичай входять корпус, СЕУ, загальносуднові системи, суднові пристрої, тощо. Елементи, з яких складається СЕУ, не залежать від її структурної схеми та виконують однакові функції на судах різних типів і призначень. До складу СЕУ можуть входити: головні двигуни (двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), парові машини); головні електрогенератори; головні передачі, які передають енергію від головного двигуна (ГД) до суднових рушіїв; суднові технічні засоби допоміжного призначення, теплообмінні апарати й інше обладнання систем, що обслуговує ГД й передачі; системи дистанційного автоматизованого управління (ДАУ), аварійно-попереджувальної сигналізації та захисту ГД й електрогенераторів; системи автоматизованого контролю параметрів. Таким чином, СЕУ представляє собою складний комплекс функціонально

взаємозалежних елементів [46], серед яких традиційно виділяють головні (ГЕ СЕУ) і допоміжні елементи енергетичної установки (ДЕ СЕУ), а також елементи електроенергетичної установки (ЕЕУ).

При проведенні аналізу літературних джерел [46, 47, 52] може бути складена загальна технологічна структурна схема з такими базовими елементами СЕУ: котлову установку, дизельну установку, турбіну, систему паливopідготовки (ПП), систему генерації електроенергії і т. п. У схему також увійшли всі можливі технологічні способи вироблення і регенерації теплової, механічної та електричної енергії при роботі судна (рис. 1.1).

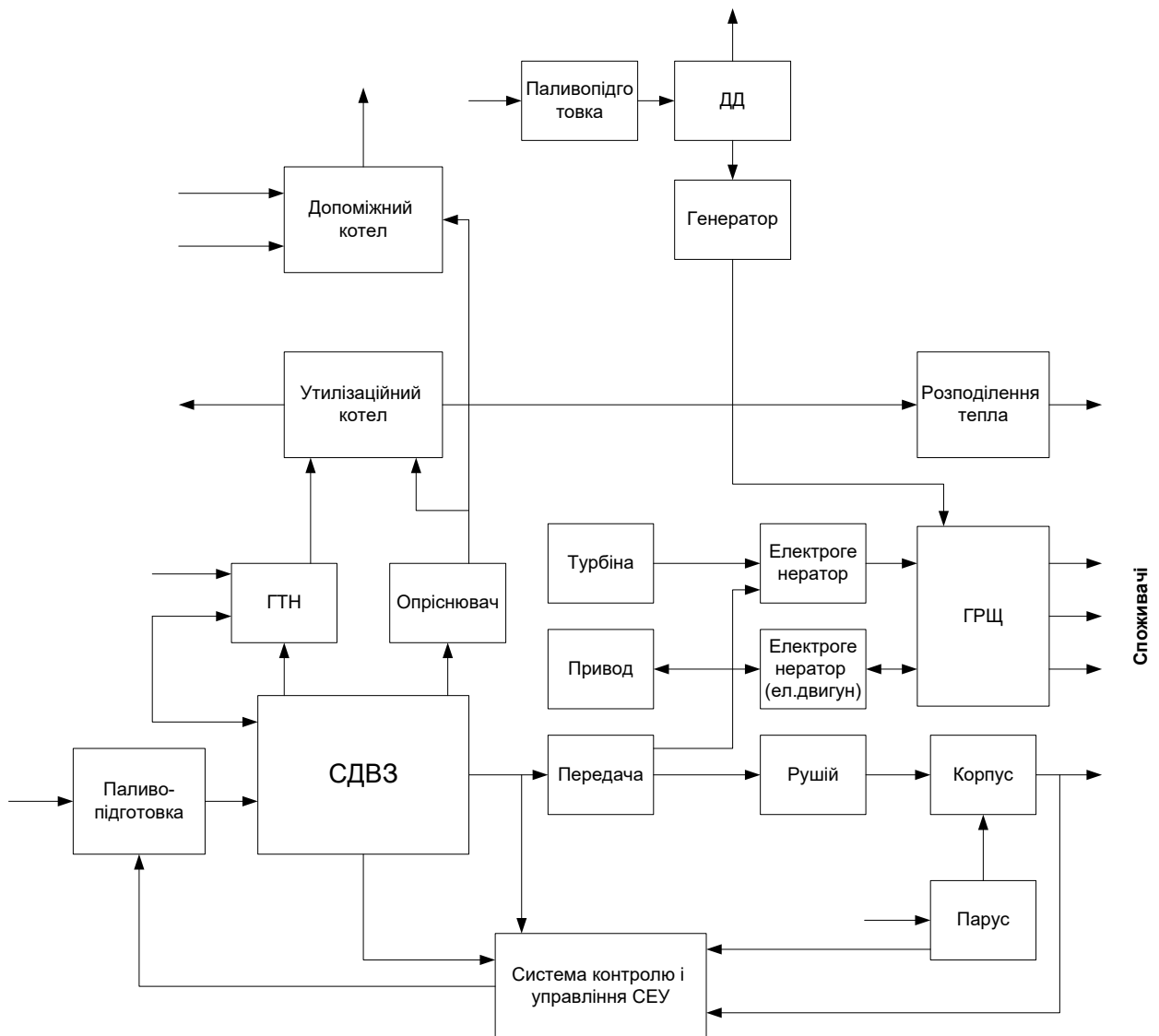


Рисунок 1.1 – Типова схема суднової технології регенерації тепла
(Джерело: розроблено автором за матеріалами [46])

На рис. 1.1 позначено: ГТН – газотурбонагнітач; СДВЗ – судновий двигун внутрішнього згоряння; ГРЩ – головний розподільний щит; ДГ – дизель-генератор; ДД – допоміжний дизель.

При розробці структурної технологічної схеми був використаний принцип функціонування всіх можливих зв'язків при використанні шести технологічних контурів. П'ять з описаних контурів є взаємозалежними і при деяких режимах експлуатації судна можуть розглядатися як взаємозамінні.

Перший технологічний контур (рис. 1.2) призначений для вироблення в судових умовах механічної енергії за рахунок процесу згоряння палива, яке пройшло процес підготовки подається на судновий ДВЗ або на судновий ДГ. Попередній процес підготовки палива має на увазі його розігрів до технологічно встановленого діапазону робочих температур та збільшення тиску до величини, яка відповідає тиску подачі на ГД або СЕУ.

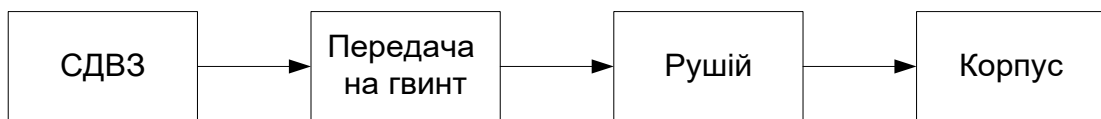


Рисунок 1.2 – Перший технологічний контур СЕУ

(Джерело: розроблено автором за матеріалами [46])

У першому технологічному контурі при роботі СЕУ енергії згоряння палива перетворюється в механічну енергію, яка передається на рушій судна. Рушій за допомогою валопроводу (ВП) приводить корпус судна в рух.

Другий технологічний контур (рис. 1.3) описує процес використання в умовах роботи судна тепла вихлопних газів. Продукти згоряння надходять від ГД в утилізаційний котел (УК), в якому виробляється водяна насичена пара, звідки вона спрямовується на утилізаційний турбогенератор, де турбіна за рахунок енергії пари обертає генератор, який виробляє електричну енергію, яка в подальшому розподіляється між усіма судовими споживачами через ГРЩ.

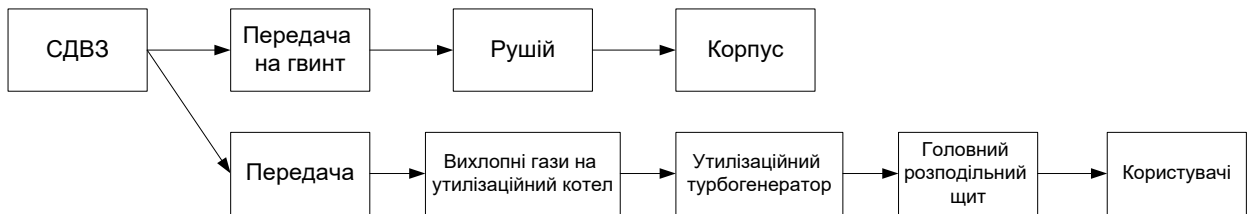


Рисунок 1.3 – Другий технологічний контур СЕУ
(Джерело: розроблено автором за матеріалами [46])

Третій технологічний контур (рис. 1.4) призначений для виробництва електричної енергії для суднових споживачів. При його введенні в робочий процес використовується обертання валу ГД. За рахунок використання редукторного зв'язку обертальний момент (ОМ) від валу двигуна передається на валогенератор електродвигуна. При обертанні ротора електродвигун починає виробляти електроенергію з її подальшою передачею на ГРЩ, після якого вона надходить до споживачів.

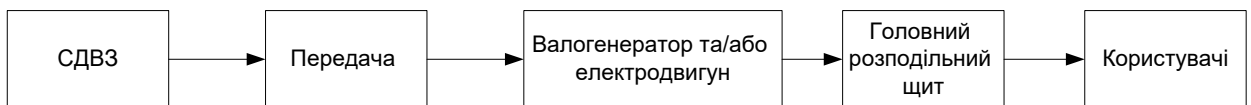


Рисунок 1.4 – Третій технологічний контур СЕУ
(Джерело: розроблено автором за матеріалами [46])

Четвертий контур (рис. 1.5) використовується як контур регенерації тепла відпрацьованих газів (ВГ). Уся теплова енергія ВГ із ДВЗ використовується в утилізаційному котлі, де за рахунок теплообмінних процесів виробляється водяна насичена пара.



Рисунок 1.5 – Четвертий технологічний контур
(Джерело: розроблено автором за матеріалами [46])

Перегріта водяна пара далі подається на допоміжну турбіну. За рахунок обертання окремого приводу турбіни уся вироблена енергія у вигляді ОМ через систему редукторів передається на рушії судна – його гвинти.

П'ятий технологічний контур (рис. 1.6) також працює в режимі регенерації тепла ВГ. Уся теплова енергія, що виробляється СДВЗ з відпрацьованих газів, передається в УК, в якому відбувається її перетворення в енергію водяної насиченої пари. Пара під тиском, залежно від конструктивного виконання СЕУ судна, може в подальшому подаватися на турбіну або, у випадку її наявності на судні, на утилізаційний турбогенератор. При своєму обертанні турбіна і/або турбогенератор виробляють електричну енергію, що передається через ГРЩ на електродвигун. Електродвигун після початку своєї роботи практично відразу починає передавати енергію на обертання валу рушії судна за допомогою приводу і редукторної передачі.

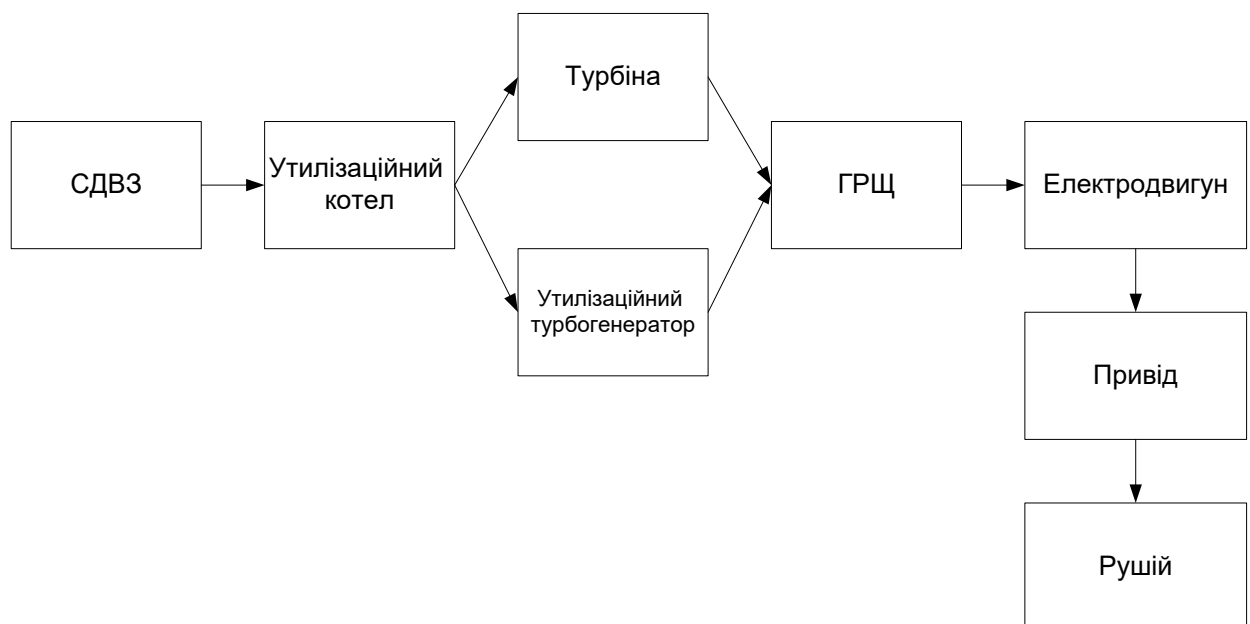


Рисунок 1.6 – П'ятий технологічний контур
(Джерело: розроблено автором за матеріалами [46])

Останній, шостий, технологічний контур (рис. 1.7) призначений для безпосередньої роботи у складі СЕУ і може розглядатися як незалежний від загальної системи пропульсивного комплексу (ПК) судна. Він працює в

такий спосіб. Суднова допоміжна дизельна установка при спалюванні палива обертає генератор електричної енергії. Уся вироблена енергія передається на ГРЩ, з якого вона в подальшому подається до кінцевих споживачів. Також енергія може подаватися на електродвигун, що при своїй роботі через муфтовий привід приводить в обертання редукторну передачу, пов'язану з гвинтовим рушієм судна.

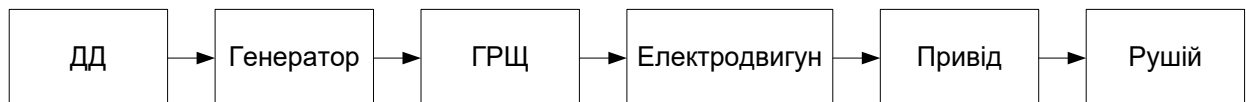


Рисунок 1.7 – Шостий технологічний контур
(Джерело: розроблено автором за матеріалами [3])

Загальним для всіх шести розглянутих технологічних контурів є правило виконання енергетичного балансу між СДВЗ, ГТН та УК. При їх експлуатації завжди повинна виконуватися рівність між затрачуваною і споживаною енергією у всіх елементах СЕУ з урахуванням можливих сумарних механічних та гідравлічних втрат.

Невиконання цієї рівності завжди свідчить про наявність:

- а) витоків ВГ, що приводять до необоротних втрат енергії в контурі регенерації тепла;
- б) різкої зміни умов плавання судна (кліматичних умов, підвищеної короткочасного вітрового навантаження, хвилювання, тощо);
- в) обростання корпусу;
- г) зміни частоти обертання валу двигуна при використанні комбінованої системи генерування електричної енергії;
- д) паразитного зворотного зв'язку між виконавчими механізмами (нерівномірність обертання гвинта, одночасне включення великої кількості потужних споживачів енергії і т. п.) та СДВЗ;
- е) теплових втрат у контурах масляної та водяної системи охолодження і змащення СДВЗ.

1.2 Завдання оцінювання працездатності суднових енергетичних установок

Паралельно з розвитком та впровадженням складних та енергоємних СЕУ постало питання щодо оцінювання їх працездатності під час експлуатації, яка історично розпочалася з оцінки якості виконання елементами СЕУ заданих експлуатаційних режимів.

На початковому етапі таку оцінку вимірювання виконував обслуговуючий персонал шляхом зняття показань безпосередньо з контрольно-вимірювальних приладів на місці їх встановлення. З розвитком електричних засобів вимірювання параметрів робочих процесів було здійснено перехід на безвахтове обслуговування з допомогою впровадження автоматизованих систем централізованого контролю (СЦК), заснованих на методах автоматичного виміру та обробки інформації. У таких системах відбувається виявлення перевищень параметрами порогових значень, сигналізація про факт перевищення, автоматичне документування результатів контролю. При цьому візуальний контроль ведеться за декількома індикаторами шляхом виведенням оператором параметрів на цифрове табло індикації [47].

Однак, контроль режимних та технологічних параметрів, що застосовуються в СЦК для оцінки поточної працездатності та управління, не дозволяє вирішити завдання достовірної оцінки та прогнозування втрати працездатності роторного обладнання СЕУ. Це безпосередньо пов'язано з оцінкою та прогнозом технічного стану, оскільки контрольовані параметри технологічних процесів, які використовуються в СЦК, є або інерційними і змінюються синхронно з недостатнім розвитком несправностей, або реагують в розвитку низки небезпечних дефектів [46, 47].

При цьому несвоєчасне виявлення небезпечних дефектів роторного обладнання СЕУ може призвести до аварії, і, відповідно, втрати ходкості та інших негативних наслідків. Подібні аварії можуть виникнути до досягнення гарантованого терміну безвідмовної роботи і тим більше терміну експлуатації, закладених під час проектування. Тому впровадження та

розвиток методів та засобів контролю технічного стану з можливістю його прогнозу для забезпечення безвідмовної роботи роторного обладнання СЕУ є важливим та актуальним завданням.

Область знань, що охоплює теорію, методи та засоби визначення технічного стану об'єктів, є технічна діагностика, при цьому основними методами діагностики механізмів з рухомими елементами під час експлуатації є [66, 81]: контроль параметрів робочих процесів (температура, тиск, струм, витрата та ін.) та методи вібраційної діагностики. З точки зору технічної діагностики роторне обладнання СЕУ можна поділити на дві групи:

- 1) механізми з вузлами зворотно-поступальної дії, до яких належать ДВЗ;
- 2) механізми без вузлів зворотно-поступальної дії, до яких належить більшість видів роторного обладнання – парові та газові турбіни, електродвигуни, редуктори, вентилятори, насоси та ін.

Функціонування ДВЗ характеризується сильними ударними взаємодіями, які визначають специфіку підходу до їх функціонального діагностування. Сильні природні ударні складові у вібраційному сигналі обумовлені рухом поршня, процесами згоряння, закриття клапанів і не дозволяють виділити набагато менші за рівнем інформативні компоненти. Діагностика подібних об'єктів принципово відрізняється від агрегатів другої групи та заснована на оцінці параметрів робочих процесів у різний спосіб.

Основною відмінністю систем моніторингу стану діагностики ДВЗ від розглянутих вище СЦК є оснащення об'єкта діагностики та його систем великою кількістю датчиків різного роду процесів та аналіз різних часових та індикаторних залежностей (діаграм), що вимагає більш складної обробки даних. Сигнал вібрації в подібних системах може бути допоміжним для визначення моментів закриття клапанів, моментів відкриття та закриття форсунки та ін. Діагностика такого обладнання у дисертаційній роботі не розглядається.

1.3 Завдання оцінювання вібропараметрів суднових енергетичних установок

Функціонування СЕУ також характеризуються сильними ударними взаємодіями. Їхнє фізичне походження обумовлено тими ж самими причинами, як і у ДВЗ, і тому для їх діагностики можна застосовувати аналогічні принципи.

Для контролю технічного стану роторного обладнання без вузлів зворотно-поступальної дії застосовуються засоби, які використовують вібраційний метод як основне джерело інформації [36, 51]. Як додаткові методи часто використовуються параметри робочих процесів, в першу чергу температури підшипника та струму приводного двигуна. Так, у правилах класифікації морських суден морського реєстру судноплавства зазначена необхідність використання робочих параметрів у системах моніторингу технічного стану [5, 34, 37]. При цьому вібрація може збуджуватися в результаті тестових впливів, оскільки є природним процесом, що супроводжує працюючий механізм, який містить рухомі частини.

Тестові чи активні методи використовують штучно сформовані дії з певними, відомими характеристиками. Перевагою таких методів є можливість дослідження, у тому числі непрацюючих об'єктів. Однак, подібні методи дають обмежений обсяг інформації й найчастіше використовуються під час виготовлення та ремонту об'єктів для дослідження їх властивостей, наприклад, знаходження власних частот деталей, вузлів.

Під час експлуатації в основному використовують аналіз вібрації, що виникає в обладнанні під час нормальної роботи, яка визначається характером взаємодії різних елементів та середовищ і несе інформацію про властивості даних взаємодій.

У промисловій сфері поширені як переносні, так і стаціонарні засоби технічної діагностики вібрації, на виході яких міститься інформація про технічний стан. Подібні системи останнім часом обмежено запроваджуються й на вітчизняних судах. Зважаючи на відсутність серед екіпажу експертів з

діагностики та необхідність безперервного контролю технічного стану суднового обладнання, на борту доцільно застосування повністю автоматичних стаціонарних систем та відповідних методів виділення з вихідного сигналу вібродіагностичних параметрів з їх подальшою обробкою.

Використання таких методів дозволяє не тільки контролювати поточний стан роторних машин СЕУ з метою управління станом із запобіганням аварійним ситуаціям, викликаним раптовими відмовами через помилки управління, а й здійснювати прогнозування технічного стану з виявленням дефектів конкретних вузлів, що дозволяє перейти від концепції планово-попереджувальних ремонтів до більш ефективного обслуговування за фактичним станом. Недоліком таких систем є помітна ймовірність видачі помилкових діагнозів, що особливо критично при автоматизації управління технічними засобами. Отже розвиток технологій автоматичного діагностування з метою підвищення достовірності діагнозу є актуальним завданням.

Розглянемо методи та засоби вібродіагностики, як основні для визначення стану більшості найбільш відповідальних роторних механізмів СЕУ.

Незважаючи на те, що поточні досягнення та світовий досвід підтверджують перевагу вібраційних методів контролю стану роторних машин, ці методи практично не розвивалися до 1970-х років [9, 26, 47, 86], а обслуговування використовувалася технологія планово-попереджувальних ремонтів (ППР). У промисловій сфері в західних країнах вже з кінця 1930-х років проводилися вимірювання вібрації з метою контролю технічного стану. При цьому першими об'єктами такого контролю стали парові турбогенератори. Так, Т.С. Расбону, будучи на той час головним інженером відділу турбін та обладнання компанії “Fidelity and Casualty Company of New York”, створив перший довідник з метою оцінки стану машин за вимірами вібрації.

Пізніше, в 1939 році, була опублікована стаття “Допустимі межі вібрації” (оригінальна назва Vibration Tolerance), в якій були наведені довідкові матеріали для оцінювання технічного стану машин із частотою обертання від 1 до 120 Гц. Ця стаття ввела низку важливих понять,

включаючи сімейство кривих залежності амплітуди вібрації від частоти обертання для типових парових турбогенераторів, які були отримані дослідним шляхом та пов'язували амплітуду вібрації з технічним станом [34].

У той час оцінка вібрації здійснювалася за допомогою механічних пристроїв, таких як ретельно відкалібрований щуп. Тому важливим етапом розвитку вібродіагностики стала розробка датчика віброшвидкості (велосиметра) на основі котушки – Model 544 фірми IRD в 1950-х роках. Датчик був досить функціональним, генераторного типу та з низьким вихідним опором, що дозволило використовувати його у складі з вольтметром. З середини 1960-х років для вимірювання вібропереміщення валу Дон Бентлі та Дон Вільгельм винайшли безконтактні вихрострумові датчики відстані (проксиметри). У 1970-х роках технології безконтактного моніторингу положення валу досягли світового визнання як спосіб моніторингу технічного стану великих турбінних агрегатів з підшипниками ковзання, а побудова орбіт за показанням двох взаємно перпендикулярних датчиків (рис. 1.8) дозволила зрозуміти і вирішити (шляхом удосконалення конструкції підшипників й роторів) найбільшу проблему, пов'язану з експлуатацією турбін з 1965 по 1975 роки – наявність автоколивань (субсинхронна нестабільність) валу в підшипниках ковзання, що раптово призводило до сильного агрегату [85].

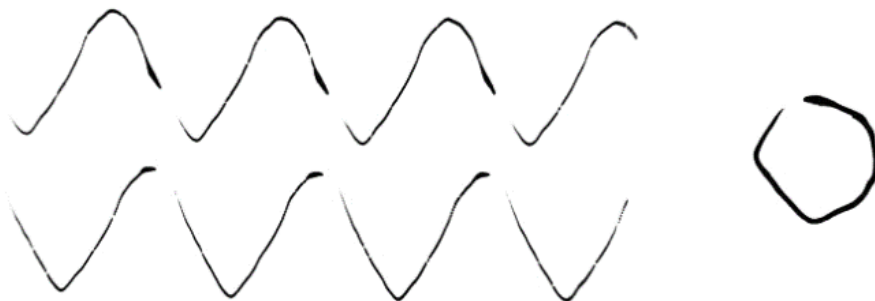


Рисунок 1.8 – Форма часового сигналу та орбіта руху валу (Джерело: [85])

Приблизно в той самий час у рамках програми випробування ракет були розроблені п'єзоелектричні датчики прискорення, які мали набагато

ширшу частотну характеристику, ніж велосиметри та проксиметри, що дозволило аналізувати вібрацію на середніх й високих частотах.

Після накопичення значних обсягів статистичних даних стало зрозуміло, що різні частотні області відповідають за різний характер несправностей. І хоча ранні спроби виявлення дефектів не повністю відповідали можливостям аналізу, але вони призвели до створення різних схем виділення частотних компонент й стали основою оцінки технічного стану. Так, з другої половини 60-х років на флоті США розпочалася розробка методів моніторингу стану обладнання, наслідком чого стало оснащення найсучасніших на той момент підводних човнів системами, що використовують октавний та дольоктавний частотний аналіз вібрації [66]. При цьому фахівці ВМС США стали використовувати логарифмічні рівні вібрації, виражені у децибелах прискорення, швидкості та переміщення. Розроблені на той час на флоті підходи були настільки вдалим з погляду інформативності, оптимальності та простоти інтерпретації, що використовуються й нині.

При експлуатації систем, заснованих на вимірюванні переміщення валу (тобто низькочастотної вібрації) виникали випадки, коли відбувалася явна зміна середньочастотної та високочастотної вібрації, наприклад, через зламаний зуб зубчастого зачеплення, проте переміщення валу істотно не змінювалося, агрегат не виводився вчасно з експлуатації, що призводило до аварійних ситуацій [69]. Отже, для визначення технічного стану обладнання стало необхідно використовувати всі частотні області вібрації з допомогою різних методів. Багато компаній стали застосовувати аналіз частотного представлення вібраційних сигналів прискорення та швидкості для періодичної діагностики за допомогою апаратури, яка здатна переміщуватися, доповнюючи традиційний захист за допомогою стаціонарних систем безперервного вимірювання низькочастотної вібрації.

Під час створення акселерометрів використовувалися аналогові прилади з фільтрами, які налаштовуються вручну, що робило процес виділення окремих частотних компонент досить трудомістким.

Розробка та впровадження цифрових частотних аналізаторів стало проривом у вібраційній діагностиці та дозволило детально виявляти та розділяти різні дефекти, пов'язані з тими чи іншими частотними компонентами. Такі аналізатори використовували алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), описаний у 1965 році Джеймсом Кулі (James Cooley) та Джоном Тукі (John Tukey) [64, 69].

Каліфорнійська компанія Time Data у 1967 році розробили першу комерційно доступну систему на базі алгоритму ШПФ, яка дозволила обчислювати спектр на 1 024 точки за 1 с, що було в 100 разів швидше за необхідний раніше час. Дані прилади також мали значні габарити, як і побудовані на старих методах аналізатори. У 1975 році компанія Nicolet випустила перший по-справжньому портативний одноканальний ШПФ аналізатор на 400 спектральних ліній 440A Mini Ubiquitous [73, 74] (рис. 1.9).



OF-400 Omniferous (1974 рік) 440A Mini Ubiquitous (1975 рік)

Рисунок 1.9 – ШПФ аналізатори спектру фірми Nicolet [73, 74]

Впровадження аналізаторів дозволило використати частотний аналіз для інтерпретації стану різного обладнання. З 1970-х років з'явився термін “predictive maintenance” (“обслуговування за станом”), який означав планування обслуговування, виходячи з прогнозу зміни технічного стану, що визначається за зовнішніми характеристиками без впливу на працююче

обладнання. Цей термін й сам підхід, що широко використовується і на теперішній час, є основою ефективної організації обслуговування різного обладнання за регламентом, лише за необхідністю, виходячи з оцінки технічного стану, як у промисловості, так і на транспорті.

Використання віброакселерометрів, що дозволили аналізувати високочастотну вібрацію, також дало поштовх розвитку методів оцінки дефектів, пов'язаних з появою мікроударних взаємодій, які, як правило, є наслідком дефектів взаємодіючих поверхонь.

Одним із найпоширеніших методів аналізу мікроударів є метод ударних імпульсів (МУІ), який виявився ефективним методом діагностування підшипників кочення і був розроблений і запатентований у 1969 р. шведським винахідником Ейвіндом Сохо (Eivind Sohoel) [64, 73]. Сутність методу полягала у порівнянні величин високочастотних ударних імпульсів із рівнем фону.

Створення ШПФ-аналізаторів та розвитку цифрових технологій створило основу для автоматизації діагностики, результатом чого стала розробка керованої комп'ютером багатоканальної системи моніторингу, заснованої на аналізі спектрів. Так, розроблена компанією Zonic Corporation система автоматично опитувала встановлені датчики в заданому порядку, проводила детальний аналіз та порівняння спектрів у кожній точці. Однак існуючі на початок 80-х років комп'ютери були занадто повільними для вчасної адаптації системи до умов, які швидко змінюються. Проте ідея була правильна, потрібно було лише створити швидку обчислювальну платформу.

Мікропроцесори з власною пам'яттю у вимірювальній та обчислювальній техніці дозволили розробити повноцінні компактні ШПФ-аналізатори, які дозволяли усереднювати дані та аналізувати гармонійні ряди. Спеціальне програмне забезпечення (СПЗ) персональних комп'ютерів дозволило аналізувати маршрути виміру й автоматизувати процеси встановлення діагнозу.

Ця базова концепція розвитку засобів діагностики стала предметом постійного розвитку й удосконалення Computational Systems. Inc. (CSI), SKF Condition Monitoring, Entek IRD, DLI Engineering Corp. та іншими фірмами.

Історично засоби та відповідні методи вібродіагностики за метою застосування були розділені на системи захисного моніторингу для своєчасної реакції на швидке погіршення стану (як правило, через помилки управління) та системи прогнозуючого моніторингу та діагностики для довгострокового прогнозування та підготовки до обслуговування (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Класифікація засобів та методів вібродіагностики
(Джерело: розроблено автором)

Системи захисного моніторингу були стаціонарними і проводили вимірювання обмеженого числа параметрів (часто одного-двох по кожному каналу) з високою частотою. Системи прогнозуючого моніторингу та діагностики були мобільними та допускали вимірювання великої кількості параметрів через значні інтервали часу (понад місяць).

При цьому стало очевидним, що періодичний збір необхідних даних для діагностики деяких видів працюючого обладнання є небезпечним та незручним для людини. Тому виробники вирішили поєднати обидва напрями в одному продукті. Однією з перших подібних стаціонарних систем стала система Compass, випущена фірмою Брюль і К'єр (Briel & Kjaer) у 1992 році. Відмінність між захисним та прогнозуючим моніторингом у цій системі визначалася інтервалом часу, через який аналізувалися сигнали вібрації.

Глибока діагностика технічного стану від встановлених і постійно підключених датчиків надалі довела свою цінність і у теперішній час

доступна як додаткова опція в більшості систем захисного моніторингу. Такий підхід є загальновизнаним як основний метод моніторингу однорежимного обладнання, в якому несправності розвиваються повільно та заздалегідь виявляються через добре відомі симптоми [73]. Однак для багаторежимного обладнання різкі зміни стану можуть бути наслідком помилок управління або порушення технологічного процесу. Тому для своєчасної реакції на подібні зміни часто потрібні безперервні вимірювання всіх діагностичних параметрів.

Недоліком стаціонарних систем є їх висока вартість через прив'язку до конкретного об'єкта. У той самий час навіть один переносний комплекс може обслужити значну кількість обладнання, що може дати відчутний економічний ефект. З іншого боку, перевагою стаціонарних систем є можливість організації безперервних паралельних чи циклічних вимірів та відсутність необхідності їх обслуговування під час експлуатації. Такі системи через високу вартість застосовуються для найбільш відповідального обладнання, для якого необхідний постійний контроль або можливі складності контролю переносними засобами різного роду [78].

На борту судна є обмежений доступ до точок контролю та відсутність персоналу з діагностичною підготовкою. Тому для контролю технічного стану найбільш відповідального керованого динамічного обладнання СЕУ необхідні повністю автоматичні стаціонарні необслуговувані системи контролю.

Також існують проміжні рішення, які мають ознаки як переносних, так стаціонарних систем, що будуються на базі стаціонарних, розміщених у корпусах, придатних для перенесення (рис. 1.11). Подібні системи можуть застосовуватися для вирішення спеціальних завдань – постійний моніторинг технічного стану агрегатів за станом, що погіршується, для оптимізації часу їх виведення в ремонт; безпечний пуск агрегату в умовах невизначеності технічного стану; різні вібраційні обстеження, в ході яких потрібно не тільки виконувати запис вихідних сигналів, але й безперервно аналізувати різні вібраційні параметри, у тому числі й взаємні, кількома каналами.



Рисунок 1.11 – Напівстаціонарна (ліворуч) та стаціонарна (праворуч) система вібродіагностики СМД4 (Джерело: [78])

В останні два десятиліття в Україні почали активно впроваджуватися технології обслуговування та захисту обладнання за фактичним станом. І у теперішній час використання вібродіагностики стало нормою для багатьох сфер промислового виробництва і транспорту (насамперед, залізничного).

Основними зарубіжними виробниками систем вібродіагностики на теперішній час є Бентлі Невада (США), Брюль і К'єр (Данія), Прюфтехнік (ФРН), Vibro-Meter (Швейцарія), SPM Instrument (Швеція), АСОЕМ (Франція).

Незважаючи на те, що системи вібраційної діагностики широко впроваджені у різних сферах промисловості та транспорту та довели свою ефективність [6, 32], на сьогоднішній день в основному використовується традиційний підхід до обслуговування з використанням технології ППР. А під час переходу ведеться контроль робочих технологічних параметрів СЕУ, що не забезпечує надійного довгострокового прогнозу втрати працездатності.

Вібраційний аналіз є важливим засобом швидкого та точного визначення несправностей, у тому числі й нових, та дозволяє забезпечити безпечну та безаварійну експлуатацію роторного обладнання СЕУ [17, 78].

Впровадження систем вібраційного моніторингу та діагностики на судах є скоріше винятком із правил. Ймовірно, одна із проблем полягає у відсутності достатньої обґрунтованості необхідності впровадження технологій управління та обслуговування за станом.

1.4 Дослідження методів вібродіагностики суднової енергетичної установки та постановка наукового завдання

1.4.1 Аналіз наукового завдання виділення діагностичних параметрів із сигналу вібрації

У п.п. 1.3 дисертаційної роботи було доведено, що розвиток засобів контролю технічного стану роторного обладнання під час експлуатації [78, 87] вказує на переваги вібраційного методу. Вібрація, що розповсюджується від місця виникнення до точки вимірювання, містить значний обсяг діагностичної інформації і змінюється без затримки при зміні властивостей об'єкта. Такі зміни можуть розглядатися як причина (приклад – сильна вібрація призводить до прискореної деградації), так й індикатор появи дефектів (приклад – зростання високочастотної вібрації не впливає на швидкість деградації, але свідчить про появу несправності). Тому можна виділити три типи оцінки таких змін з різною глибиною діагнозу (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Типи оцінки змін вібросигналів

(Джерело: розроблено автором, за матеріалами [78, 87])

Віброконтроль – це визначення вібраційного стану, що розглядає вібрацію як фактор, який підвищує швидкість деградації елементів машини у процесі роботи.

Вібромоніторинг – це визначення узагальненого технічного стану, що

вирішує завдання оцінки технічного стану за сукупністю параметрів без виділення причин такої зміни.

Вібродіагностика – це визначення причин зміни стану, що ґрунтується на відомому зв'язку діагностичних параметрів вібрації з конкретними дефектами різних вузлів машини.

Для наведених вище типів оцінки, зазвичай, застосовуються різні методи аналізу, складність реалізації та інтерпретації яких зростає по мірі ускладнення об'єкта діагностики та зростання глибини діагнозу, а для кожного типу оцінки існують стандарти [28].

Процес глибокого діагностування може виконуватися періодично або за подією, після виявлення відхилень під час проведення процедур віброконтролю та/або вібромоніторингу [45, 66]. Часто віброконтроль сприймається як складова частина вібромоніторингу, що не є цілком коректним, оскільки у першому випадку оцінюється руйнівна дія вібрації, тоді як у другому вібрація сприймається як наслідок (інформаційний відгук) появи дефекту.

В останні роки проведено низку досліджень у галузі вібраційного діагностування, багато з яких присвячено питанням оцінки стану обладнання певного виду або використовуваного у досить вузькій сфері.

У ряді робіт приділено увагу застосуванню видів аналізу, що рідко використовуються на практиці, таких як вейвлет-перетворення, оцінка коефіцієнта ексцесу [90]. Варто відзначити роботи, в яких запропоновано конкретні методи автоматичного оброблення вузькосмугових спектрів вібрації [7, 8] та методи прогнозування технічного стану обладнання [64].

Важливим критерієм оцінки зміни технічного стану є суттєве відхилення вібраційної активності від нормальної, що відповідає бездефектному стану [93]. Для оцінки таких відхилень необхідно вирішити завдання підвищення якості та обсягу діагностичної інформації, що потребує удосконалення основних методів аналізу вібраційного сигналу, розгляду особливості використання та автоматичної обробки вібраційних сигналів.

Найбільш простим для інтерпретації є аналіз загальних рівнів

стандартних частотних смуг [70], які в основному використовуються для визначення вібраційного стану. З цією метою вони порівнюються з пороговими значеннями, які встановлюються в залежності від типу машин, спираючись на значення меж, наведених у додатках стандартів для відповідних типів обладнання, та досвіду експлуатації.

За результатами порівняння виміряного рівня вібрації із заданими межами зон станів, машини відносять до однієї з чотирьох зон стану: нові, придатні для експлуатації без обмежень, непридатні для тривалої експлуатації та аварійні (рис. 1.13).

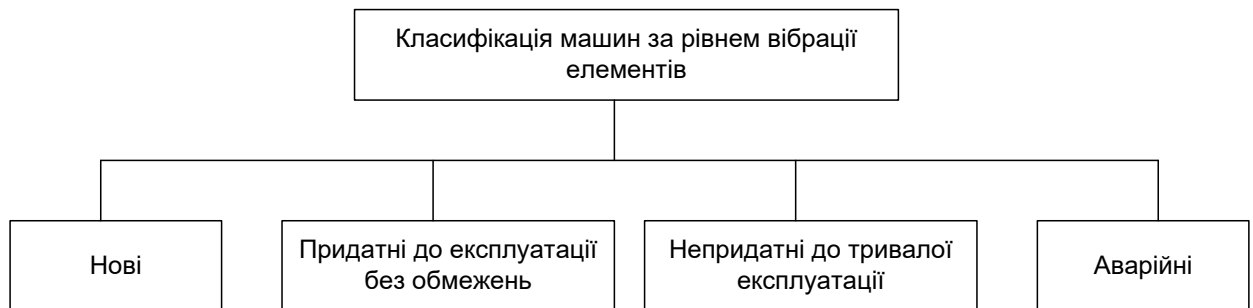


Рисунок 1.13 – Класифікація машин за рівнем вібрації

(Джерело: розроблено автором)

Досвід експлуатації систем оцінки вібраційного стану показує, що зростання загального рівня низькочастотної вібрації, особливо низькооборотних машин, є наслідком розвинених дефектів обертальних вузлів ротора, дефектів окремих вузлів кріплення, зміни характеристик резонансів корпусу агрегату та фундаментних конструкцій.

Однак існує ряд дефектів, таких як дефекти зубчастого зачеплення, потікоутворювальних частин, тріщини валу та інших середньочастотних складових, які взагалі не потрапляють у частотну область контролюваного параметра [78]. Відомо, що загальний рівень низькочастотної вібрації є грубою і недостатньою оцінкою щодо технічного стану [9, 27, 78, 79, 92, 95]. При цьому рекомендується використовувати інші методи аналізу: частотний

аналіз, аналіз ударних імпульсів та ін. в різних частотних діапазонах.

Одним із способів підвищення якості діагностичної інформації є її деталізація в частотній ділянці. Поділ сигналу на частотні компоненти може здійснюватися за допомогою фільтрів із різними характеристиками.

Для моніторингу загального технічного стану найчастіше використовують октавні та третьоктавні фільтри з постійною відносною шириною. Для охоплення широкої частотної області використовують набір таких фільтрів, який перекриває необхідний частотний діапазон, формуючи широкосмуговий спектр. Вимоги до характеристик фільтрів вказані у низці стандартів [79].

Дольоктавні діапазони є комфортним інструментом аналізу, оскільки флуктуації частоти обертання агрегату призводять саме до відносної зміни складових спектру, що дозволяє порівнювати результати послідовних вимірів. Аналіз таких спектрів полягає у порівнянні рівня кожної смуги з пороговими значеннями, що також досить легко, так як контролюється обмежений набір параметрів, який вимагає додаткових обробок [79]. Зазначені особливості дольоктавних спектрів роблять їх одним з основних інструментів для більш детальної, ніж аналіз загальних рівнів, оцінки технічного стану. Цим й визначається широке використання, зокрема, третьоктавного аналізу, який застосовується як на флоті, так і в різних галузях промисловості та транспорту. Дольоктавні спектри, як і стандартні загальні рівні, обчислюються відомими способами смугової фільтрації, які можуть здійснюватися як у часовій області за допомогою згортки, так і в частотній області за допомогою накладання на спектри потужності вагових вікон.

Однак широкосмугові види аналізу не дозволяють визначити природу компонентів, що викликають зміну віброактивності, хоча така інформація є найціннішою при діагностуванні [83]. Вібрація обертального обладнання містить у собі множину компонентів різного походження, обумовлених наявністю джерел коливальних сил різної природи з різними властивостями, що несуть у собі діагностичну інформацію про стан вузлів обладнання.

Періодичні компоненти вібрації найчастіше визначаються

відцентровими силами, взаємодією механічних елементів й електромагнітних полів у машинах на стабільних частотах обертання. Джерелом випадкових складових вібрації найчастіше є сили тертя та пульсації тиску в потоці рідини (газу), а імпульсної вібрації – ударна взаємодія елементів машини як з їх механічним контактом, так і через рідке або газове середовище [60]. Виділення та аналіз різних за фізичною природою компонентів сигналу дозволяє не тільки ефективно контролювати загальний технічний стан, але й використовувати дані параметри для ідентифікації дефектів. Далі розглядаються різні методи виділення компонентів різної природи.

1.4.2 Методи виділення компонентів вібросигналів різної природи

Для аналізу імпульсних (ударних) компонент найбільш ефективним є МУІ. Метод ґрунтується на виявленні та відносній оцінці імпульсних компонентів у деякій частотній області, при цьому найчастіше оцінюється відношення сумарної потужності високочастотних сильних ударних компонентів до повної потужності або рівня стаціонарних компонентів (фону).

Існує досить значна кількість варіантів реалізації методу. Одні виробники використовують спеціальні датчики, що включають механічний резонатор, інші – загальнопромислові високочастотні віброакселерометри. При цьому істотно відрізняються й способи виділення та обробки сигналів: може бути визначений пік-фактор або зроблено складніший аналіз, наприклад, визначено відношення енергії ударів до енергії фону і зроблено підрахунок кількості імпульсів різного рівня. Така велика кількість підходів полягає у певній суб'єктивності та звичкою використання того чи іншого перевіреного підходу конкретним виробником.

Також поширеним методом дослідження наявності імпульсних компонентів сигналу є аналіз відхилення форми закону розподілу від номінального, в якості якого, як правило, використовується нормальний

закон. Тут можуть бути використані такі показники як куртозис або ексцес куртозис (друге слово часто опускається). Куртозис визначається як відношення четвертого центрального моменту випадкової величини до дисперсії в квадраті, ексцес визначає відхилення куртозису поточного розподілу від нормального, в якого куртозис дорівнює 3 й відображає товщину “хвостів” розподілу [74]. Такі “хвости” утворюються через появу викидів у сигналі внаслідок ударних компонентів. У деяких випадках ексцес може бути інформативнішим за пік-фактор та інші аналогічні оцінки.

Для аналізу полігармонічного сигналу доцільно використовувати спектральний аналіз, що дозволяє виявити періодичність низькочастотних ударних взаємодій [70].

Перевагою наведених видів аналізу є простота їх оцінювання, оскільки обчислений параметр порівнюється з пороговими значеннями. Методи обчислення зазначених параметрів загальновідомі і не потребують удосконалення.

Набагато складнішими для подальшої обробки є вузькосмугові спектри, оскільки вони несуть інформацію в неявному вигляді, і для її автоматичного отримання необхідно використовувати спеціальні методи. Оскільки спектри вібрації є основним видом аналізу, застосованими у вібродіагностиці обертового обладнання [11; 32], і розглядаються як основний вид аналізу у більшості наукових праць [26], питання дослідження та застосування різних методів його обробки є найбільш важливими та докладно розглянуті далі.

У сучасних засобах спектрального аналізу використовується ШПФ в дискретній формі, яке є традиційним математичним апаратом для аналізу стаціонарних вібраційних процесів і використовується для подання часового сигналу частотної області [70, 74]. Спектр є набором елементарних складових – гармонійних коливань з різними частотами. Базисні функціями для розкладання є синус та косинус або комплексна експонента прямого та зворотного перетворення Фур'є:

$$\begin{aligned} S^*(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt; \\ x(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S^*(\omega)e^{-j\omega t} d\omega, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де $x(t)$ – вихідний сигнал;

$S^*(\omega)$ – комплексний спектр.

На виході перетворення Фур'є у комплексному вигляді маємо набір комплексних чисел, реальна частина яких характеризує кореляцію з косинусною компонентою, а уявна – із синусною на частоті конкретного відліку. Для отримання спектра амплітуд і спектра фазових зрушень необхідно обчислити відповідно модуль й аргумент відліків даного комплексного спектру.

Насправді найчастіше використовується спектр амплітуд, кожна складова якого нормована на середньоквадратичному значенні (СКЗ), що характеризує спектральну щільність потужності сигналу. Даний вид аналізу далі називається спектром без зазначення виду. Такий спектр часто називається “автоспектром” або “прямим спектром”.

Оскільки інтервал сигналу для побудови спектру вибирається без урахування періоду основних компонентів сигналу, вибірка може не містити ціле число періодів. Коли у спектрі сигналу, виміряного без віконного перетворення (тобто використовуючи прямокутне вікно), відбувається зростання розташованих поблизу даних компонент частотних ліній, що призводить до погіршення діапазону аналізу.

При вимірюванні вибіркового спектра може виникати суттєва помилка через дисперсію гармонійних і випадкових компонентів сигналу. Для вирішення зазначених проблем використовується метод Уелша [66, 69], сутність якого полягає в розбитті сигналу на сегменти, які перетинаються, з множенням кожного такого сегмента на вагову функцію з подальшим обчисленням за такими зваженими сегментами миттєвих спектрів та їх усереднення.

Метою перекриття є збільшення кількості сегментів, що усереднюються, при заданій довжині вихідного запису і, тим самим,

зменшення дисперсії оцінки. Метою застосування вікна є послаблення впливу бічних пелюстків за рахунок прийнятного погіршення розподілу оцінок (ширини смуги). Даний метод успішно застосовується в галузі вібродіагностики та докладно розглянутий у [69]. При цьому збільшення кількості усереднень, з одного боку, призводить до зменшення дисперсії випадкових компонентів та можливості більш точної оцінки слабких гармонійних складових. Але, з іншого боку, висуває більш жорсткі вимоги до стабільності частоти через значне зростання (у рази) часу вимірювання.

До найбільш використовуваних у вібродіагностиці [83, 86] та оптимальним з погляду подальшого аналізу є вікно Хана:

$$H(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad (1.2)$$

де $H(n)$ – ваговий коефіцієнт точки з індексом n ;

N – кількість точок.

Так, у роботі [82] докладно розглядається використання різних віконних функцій для аналізу сигналів та робиться висновок, що з вікон з малою шириною основного пелюстка (прямокутне, синусоїдальне, Хана та Хемінга) вікно Хана – це найкраща функція, що має мінімальну похибку оцінки СКЗ як гармонійного, так і полігармонійного сигналу. У свою чергу, мала ширина основної пелюстки амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), на відміну від вікон Блекмана або Натала, дозволяє аналізувати окремі складові, що близько розташовані. У зв'язку з цим у даній роботі розглядається обчислення спектрів методом Уелша з використанням вікна Хана.

На рис. 1.14 наведено спектри вібрації агрегату в одній із стандартних точок контролю на підшипниковому вузлі суднової роторної машини.

Спектр віброшвидкості використовується для контролю найпотужніших складових в обмеженій частотній області (на рис. 1.14 до 1 000 Гц), спектр віброприскорення – для отримання діагностичної

інформації, яка міститься у високочастотних складових вібрації. Наведене зображення спектра віброприскорення у лінійних одиницях ускладнює аналіз порівняно слабких компонентів.

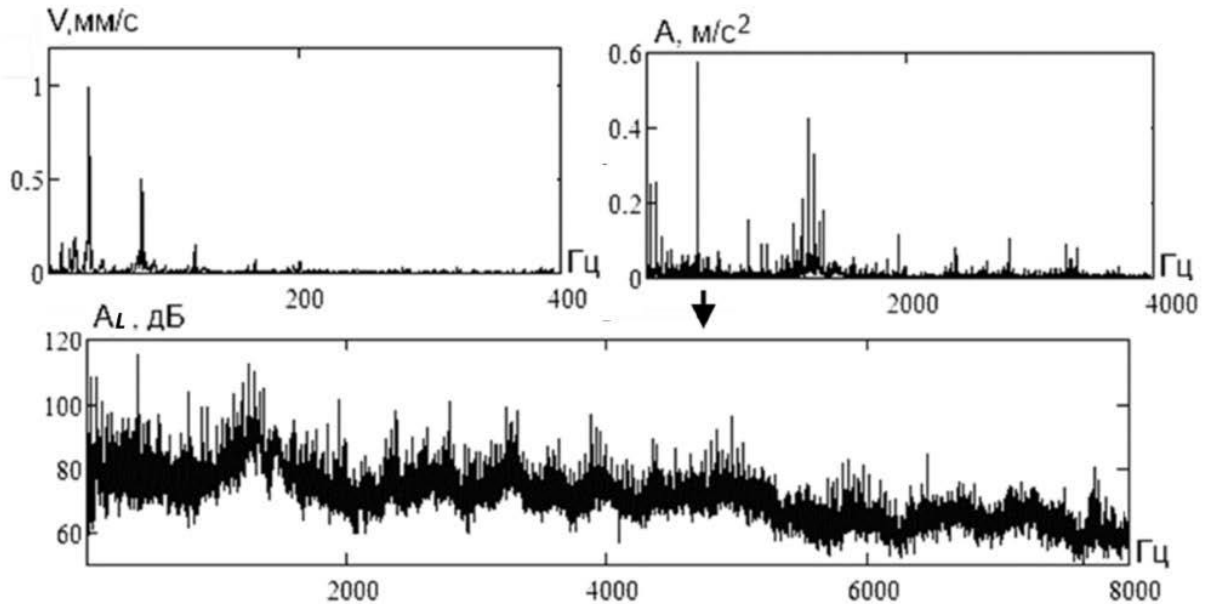


Рисунок 1.14 – Спектри вібрації суднової роторної машини (Джерело: [55])

Отже, спектри віброприскорення частіше переводяться в логарифмічні одиниці по осі амплітуд децибели (дБ), як це показано на третьому графіку. Децибели є одиницями виміру енергетичних величин (потужності), тому у лінійних одиницях вібрації у формулі для обчислення дБ логарифм множиться на число 20, а не на 10, відповідно до приставкою “деци”:

$$X_L = 10 \lg \frac{X^2}{X_0^2} = 20 \lg \frac{X}{X_0}, \quad (1.3)$$

де X_L – рівень дБ;

X – виміряне значення;

X_0 – опорне значення, рівні якого наведені у стандарті.

Найважливішою характеристикою спектрального аналізу є його частотна роздільна здатність, яка далі позначена df , що дозволяє розділити в

спектрі гармонійні складові, які наближені одна до одної за частотою. Частотна роздільна здатність визначається шириною смуги спектру, яка пов'язана з тривалістю сигналу для побудови спектра (часовим вікном), оберненим пропорційно.

Верхня гранична частота спектра визначається частотою Найквіста. Висока частотна роздільна здатність використовується не тільки для роздільної здатності близько розташованих гармонік, але і для зниження рівня фону для можливості ідентифікації слабких гармонійних складових. Тому його збільшення (тобто зменшення df) використовується в сукупності з накопиченням і усередненням спектрів.

Висока частотна роздільна здатність, як і збільшення числа усереднень, висуває високі вимоги до стабільності частоти обертання. За суттєвою щодо часу вимірювання нестабільності, характерної для суднового обладнання, лінії в такому спектрі починають “розвалюватися”. Цю проблему можна вирішити за допомогою побудови спектру синхронної вибірки значень сигналу (синхронні та порядкові спектри), при якій відліки беруться в моменти часу рівного кутового кроку валу, що визначається датчиком його положення (синхронізуючий сигнал). При такому підході гармонійні складові, пов'язані лінійно з частотою обертання валу, залишаються у спектрі на своїх місцях, а їх енергія не розподіляється за сусідніми відліками спектру.

Однак при обчисленні такого спектру спотворюються (пригнічуються) частотні складові, не пов'язані лінійно з частотою обертання валу (несинхронні складові), які можуть мати важливе діагностичне значення [65].

Такі складові присутні, наприклад, за наявності незв'язаних жорстко валів (газова турбіна, гідравлічна муфта) або наявності магнітного поля статора, що несинхронно обертається з ротором (в асинхронному двигуні). При таких спотвореннях не тільки втрачається інформація про параметри даних компонентів, а й спотворюється фон спектру, оцінка якого інформативна.

Також часто виникає проблема отримання синхронізуючого сигналу для обладнання без вбудованих датчиків обертів та відкритих ділянок валу

для їх встановлення. Тому для діагностування СЕУ та її елементів необхідні рішення, які дозволяють обробляти спектр з метою виділення параметрів діагностичних компонентів за умов нестабільності частоти обертання без виконання синхронної вибірки.

Рівень спектра може визначатися періодичними або випадковими компонентами, а також їх комбінацією. Для узагальненого аналізу спектру (без виділення різних за природою компонентів) можуть використовуватися так звані спектральні маски [83]. Вони визначають бездефектний агрегат за допомогою оцінок природних флуктуацій кожної спектральної лінії [42] або рівня (максимального, середнього) у вибраних широких частотних діапазонах. Перевагою використання опорних масок є відносна простота автоматизації, а головним недоліком – висока неоднозначність, оскільки даний аналіз не дозволяє визначити природу виділених компонентів, при тому, що в досить вузьких діапазонах можуть бути гармонійні складові різного походження, які бажано розділяти та оцінювати окремо. Незважаючи на це, використання спектральних масок у тому чи іншому вигляді пропонується у ряді робіт у галузі вібродіагностики [7, 61].

У більшості стаціонарних систем моніторингу стану за вібрацією виконується найпростіший аналіз з оцінки різних частотних компонентів конфігурованими за правилами пошуку. Такі правила визначають діапазон частот (або дискретну частоту), пов'язані з контрольованою частотою обертання валу, в якому необхідно оцінити максимум або СКЗ.

При розвитку дефектів форма та властивості коливальних сил можуть змінюватися, призводячи до появи нових інформативних компонентів [16, 18, 29, 36]. Так, у типовій судновій газовій турбіні може бути більше 10 різних гармонійних рядів, у кожному з яких спостерігається більше десятка інформативних гармонік. Тому для підвищення ефективності діагностики необхідна оцінка всієї сукупності гармонік зокрема їх видалення і формування залишеної частини, яка характеризує випадкові компоненти. Ця частина називається фоном спектра.

Принцип виділення періодичних та шумових (фонових) складових призначений для аналізу спектрів насосного обладнання [45, 48, 60, 71, 79, 82, 87, 93]. Запропоновані методи базуються на алгоритмі рекурентної фільтрації шумових та періодичних компонентів за умови, що в машині існує основний періодичний віброакустичний процес, який визначає віброактивність, а всі співвідношення між базовими частотами рядів відомі. Спочатку зі спектру виділяються відомі лопаткові гармоніки, потім оборотні та спектр шуму, що залишився, який поділяється на гармонійні і випадкові складові. У діапазоні агрегату з більш складною будовою можуть бути гармонійні складові та складові іншої природи. Пошук алгоритмів обробки спектрів вібрації з метою поділу компонентів різної природи в інших джерелах не дав результатів. Тому розробка такого методу, не прив'язаного до конкретного типу обладнання, є досить актуальним науковим завданням.

1.4.3 Методи спектрального аналізу вібросигналів

Коли визначені лінії спектру, що явно характеризують гармонійні складові, вирішується завдання уточнення їх параметрів – частоти F_g та рівня A_g . За рівень далі розуміється СКЗ або значення дБ, яке є характеристикою потужності компоненти оцінювання величини відповідного дефекту.

Важливим параметром також є частота, яка визначає точність подальшої ідентифікації природи гармоніки шляхом угрупування окремих гармонік у гармонійні ряди характерних частот. Для оцінки параметрів гармоніки використовують частоти та рівень максимального спектрального відліку, коли максимальне значення помилки визначення частоти дорівнює половині df , а помилка визначення амплітуди залежить від типу вагового вікна.

Досить простий спосіб уточнення оборотної частоти описаний у статті [64], в якій запропоновано спосіб поділу частот піків вищих гармонік даної частоти відповідні кратності. Такий підхід також дає суттєві помилки,

оскільки частоти піків кратних гармонік можуть відхилятися від реальних частот, вищих гармонік взагалі не може бути в спектрі, а за вищу може бути прийнята гармоніка іншої природи.

У роботі [82] описаний спосіб оцінки частоти синусоїдальної складової спектру по сусіднім частотним складовим спектру шляхом використання інтерполяції частотної функції прямокутного вікна. Істотним недоліком даного способу є низькі рівні сусідніх з максимальних відліків (спектральних ліній), які у разі сигналу вібрації знаходяться нижче за рівень фону, що призводить до точності аналогічно використанню параметрів максимального відліку. Істотно більш точним методом є аналогічний аналіз спектру з накладенням частотних вікон, які підвищують кореляцію між сусідніми відліками спектра та підвищують рівні бічних пелюсток.

Так, у віброаналізаторі 2515 фірми Брюль і К'єр використовується метод узгодження вагової функції Хана з двома найбільшими дискретними значеннями, що знаходяться поблизу піку спектральної лінії [67]. У даному аналізаторі частота та амплітуда гармонік коригуються відповідно до відомих зв'язків поправки на рівень ΔL й поправки на частоту Δf залежно від різниці рівнів Δ двох максимальних частотних ліній (рисунок 1.15). У роботі [11] пропонується використання аналітичної залежності для трьох попарних співвідношень максимальних спектральних відліків.

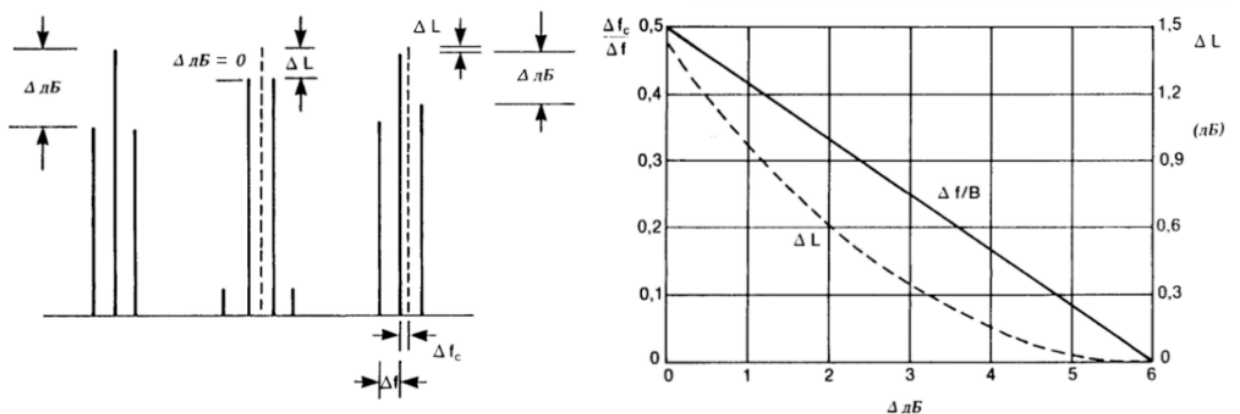


Рисунок 1.15 – Метод уточнення частоти та амплітуди гармонійної складової, використаний у віброаналізаторі 2515 компанії «Брюль та К'єр» [11, 67]

За результатами аналізу наведених інтерполяційних способів уточнення частоти гармоніки доведено, що вони дають істотні помилки при девіації частоти. Це можна навести на модельному сигналі, в якому задається постійна середня частота та амплітуда при різній лінійній зміні частоти гармоніки під час вимірювання спектра.

Так, при незмінній середній частоті та амплітуді гармоніки, при якій відсутня необхідність корекції, в залежності від значення девіації будуть змінюватися співвідношення використаних трьох максимальних значень поблизу гармоніки (рис. 1.16), що призведе до значної корекції частоти та рівня розглянутими вище способами і відповідно, зростання похибки.

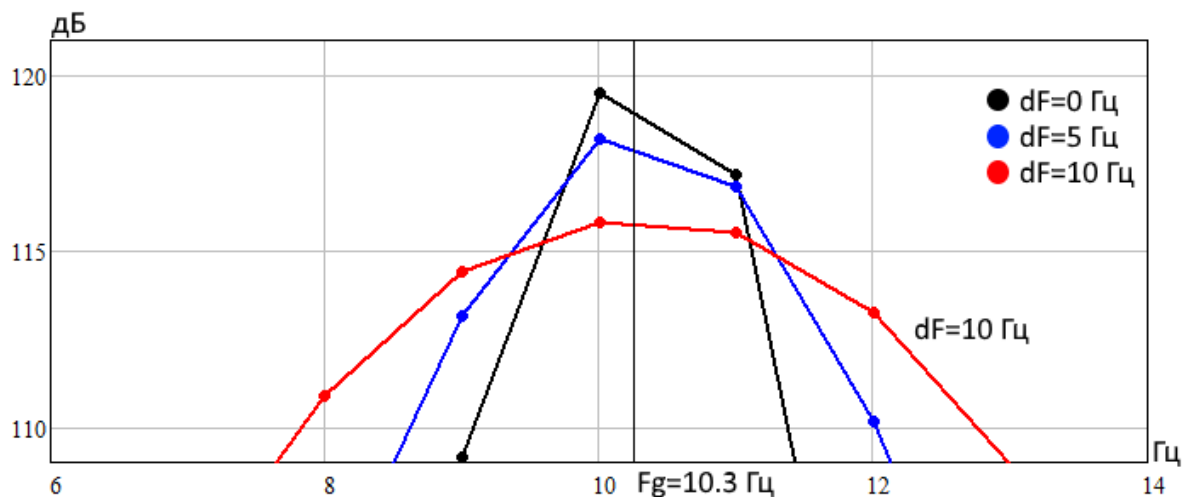


Рисунок 1.16 – Модельний спектр, вимірюваний при девіації частоти гармоніки dF за час вимірювання спектра, середня частота гармоніки

$F_g = 10,3$ Гц (Джерело: [11, 67])

Подібна ситуація також виникає при високому рівні фону, коли рівні відліків поблизу гармоніки істотно залежать від випадкових компонентів, які можуть знижувати або збільшувати дані рівні в залежності від різниці фаз адитивних компонент різної природи. Суднові умови характеризуються девіацією частоти обертання і високим рівнем фону, а розглянуті методи аналізу є обмежено ефективними, то необхідно розробити метод, що дозволяє виділяти гармонійні компоненти та оцінювати параметри з підвищеною точністю.

Спектральний аналіз застосовується не тільки для аналізу вихідного сигналу, але і для його огинаючої, виділеної в певній заданій високочастотній області. Використання спектра огинаючої є головним інструментом глибокого вібродіагностування підшипників кочення [2, 11, 45]. Механізм формування вібрації в багатьох вузлах роторного обладнання є нелінійним і є мультиплікативною комбінацією періодичних та випадкових компонентів, моделлю якої є сигнал, що описується формулою:

$$x(t) = (1 + m \cos \Omega t) \eta(t), \quad (1.4)$$

де $1 + m \cos \Omega t$ – найпростіша моделююча гармонічна функція;

$\eta(t)$ – високочастотна стаціонарна випадкова складова.

При спектральному аналізі вихідного сигналу вібрації при такому характері взаємодій втрачається інформація про кожну компоненту, яка входить до добутку. Як правило, діагностичну інформацію несе в собі модулюючий компонент, ефективним методом виділення якої є отримання огинаючої [11]. Огинаючу можна розглядати як залежність миттєвого СКЗ у певній частотній ділянці від часу. Важливою умовою отримання неспотвореної огинаючої випадкових модульованих процесів є відсутність у частотній області для її виділення порівнянних за потужністю гармонійних складових, биття яких також викликають періодичну зміну потужності [11].

На практиці виконання цієї вимоги є складним завданням, для вирішення якого необхідно знайти частотні області з незначними змінами спектральної густини сигналу (не більше 10 разів) або застосовувати спеціальні алгоритми видалення гармонійних компонентів [25]. Після виділення часовий сигнал огинаючої, як і вихідний сигнал, може бути представлений у частотній області за допомогою перетворення Фур'є (рис. 1.17).

Огинаючу можна отримати за допомогою аналогової техніки, використовуючи смуговий фільтр і детектор, або за допомогою цифрового аналізу шляхом отримання модуля комплексного сигналу, для чого за

допомогою перетворення Гілберта знаходиться ортогональне доповнення для зміненого сигналу:

$$\begin{cases} \hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau; \\ x(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{x}(\tau)}{t - \tau} d\tau, \end{cases} \quad (1.5)$$

де $\hat{x}(t)$ і $x(t)$ – пов'язані за Гілбертом функції, $1/(t - \tau)$ – ядро перетворення.

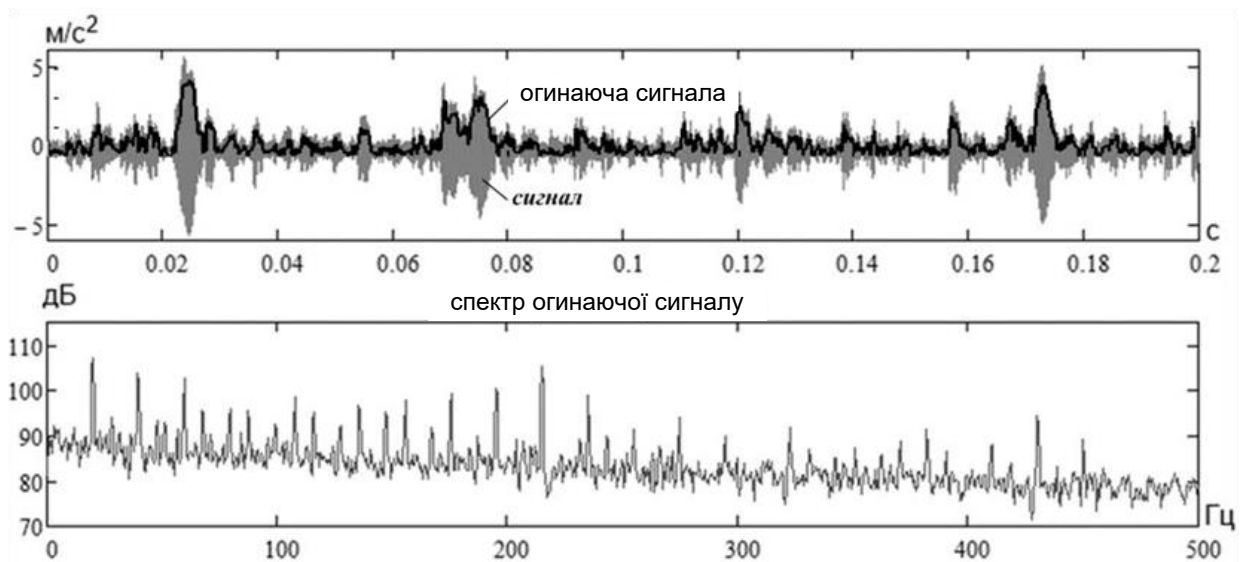


Рисунок 1.17 – Огибающая вибраційного сигналу та її спектр (Джерело: [25])

Як й вузькосмуговий спектр вихідного сигналу, спектр огибающей вимагає подальшого аналогічного аналізу з метою оцінки періодичних та випадкових компонентів. Єдиною відмінністю є те, що діагностичним параметром є глибина модуляції m (1.2). У спектральній області даний параметр можна отримати з відношення рівня гармонійної складової до постійної складової, значення якої міститься у відліку спектра з індексом 0.

Однак такий спосіб є ненадійним, оскільки будь-яка гармонійна складова в області формування огибающей (адитивна комбінація) призводить до зростання постійної складової огибающей та некоректної оцінки m .

Більш надійним способом може бути визначення залежності глибини модуляції від співвідношення рівня гармонійної компоненти A_g до рівня фону A_f поблизу аналізованої гармоніки.

Також дана оцінка дозволить визначити граничні умови такого відношення щодо параметрів гармоніки, оскільки значення діагностично значущої глибини модуляції відомі. Проведемо пошук шуканої залежності.

Для цього розглянемо типовий вимірювальний тракт аналізу спектра огинаючої [65], в який входять смуговий фільтр Гауса з центральною частотою ω_0 та ефективною смугою пропускання $\Delta\omega_e$, такий що $\omega_0 \gg \Delta\omega_e$ (виходячи з вимог до смуги аналізу огинаючої спектру) частотною роздільною здатністю $\Delta\omega_a$.

Оскільки модулюючий процес є низькочастотним, а для аналізу огинаючої використовуються смуги в середньочастотній та високочастотній областях, приймаємо що $\Omega \ll \omega_0$, (Ω див формулу (1.4)). Для отримання залежності скористаємося методами, застосовуваними під час аналізу радіосигналів [11, 65, 78].

Оскільки період модуляції процесу з частотою Ω у багато разів більший за інтервал кореляції сигналу на виході широкосмугового фільтра, то процес можна розглядати як квазістаціонарний, низькочастотний множник у формулі (1.4) прийняти за константу й оцінити рівень фону спектра при проходженні через вимірювальний тракт стаціонарної випадкової компоненти (t).

При виборі смуги виділення огинаючої рекомендується, щоб спектральна щільність сигналу у цій смузі змінювалася незначно [65]. Ідеальним випадком такого сигналу є білий шум [7, 8]. Тому на вході смугового фільтра приймемо спектральну щільність потужності випадкового процесу $\eta(t)$ рівня S_0 . Оскільки смуговий фільтр є лінійною системою, то на виході смугового Гаусівського фільтра отримаємо спектральну щільність:

$$S_1(\omega) = S_0 e^{\frac{\pi(\omega - \omega_0)^2}{2(\Delta\omega_e)^2}}. \quad (1.6)$$

Оскільки детектор є нелінійною системою, для аналізу вихідного сигналу необхідно перейти до кореляційної функції за допомогою теореми Вінера-Хінчина (пряме перетворення):

$$\begin{aligned} R_2(\tau) &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S_2(\omega) \cos \omega \tau d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S_0 \left(e^{\frac{\pi}{2} \left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta \omega_e} \right)^2} \right)^2 \cos \omega \tau d\omega = \\ &= \frac{S_0}{\pi} \int_0^\infty e^{-\pi \left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta \omega_e} \right)^2} \cos \omega \tau d\omega. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Зробимо заміну: $z = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta \omega_e} \Rightarrow \omega = z \Delta \omega_e + \omega_0, d\omega = \Delta \omega_e dz,$

$\omega = 0 \Rightarrow z = -\frac{\omega_0}{\Delta \omega_e}, \omega = \infty \Rightarrow z = \infty,$ див. (1.8).

Для приведення даного інтеграла до табличного, скористаємося тим, що для інтеграла функції загасаючої $e^{-\pi z^2}$ можна для $z = \frac{\omega_0}{\Delta \omega_e} \gg 1$ прийняти межу інтегрування $\frac{\omega_0}{\Delta \omega_e} \sim \infty$, оскільки внесок у значення інтеграла (площа під кривою) даною функції ділянки після $z=1,5$ складає менше 10^{-4} відсотка, тобто є несуттєвим. Також скористаємося властивістю парних та непарних функцій у симетричних межах та формулою косинуса суми.

$$\begin{aligned} R_2(\tau) &= \frac{S_0}{\pi} \int_{-\frac{\omega_0}{\Delta \omega_e}}^\infty e^{-\pi z^2} \cos(\Delta \omega_e \tau z + \omega_0 \tau) \Delta \omega_e dz = \\ &= \frac{S_0 \Delta \omega_e}{\pi} \int_{-\infty}^\infty e^{-\pi z^2} (\cos(\Delta \omega_e \tau z) \cos \omega_0 \tau - \sin(\Delta \omega_e \tau z) \sin \omega_0 \tau) dz = \\ &= \frac{S_0 \Delta \omega_e \cos \omega_0 \tau}{\pi} 2 \int_0^\infty e^{-\pi z^2} \cos(\Delta \omega_e \tau z) dz. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Для (1.8) використовуємо табличний інтеграл виду

$$\int_0^{\infty} e^{-\beta x^2} \cos bx dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\beta}} e^{-\frac{b^2}{4\beta}} \quad (1.9)$$

й отримаємо

$$R_2(\tau) = \frac{S_0 \Delta \omega_e \cos \omega_0 \tau}{\pi} 2 \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\pi}} e^{-\frac{(\Delta \omega_e \tau)^2}{4\pi}} = \sigma_\phi \rho(\tau) \cos \omega_0 \tau, \quad (1.10)$$

де $\sigma_\phi^2 = \frac{S_0 \Delta \omega_e}{\pi}$ – потужність на виході смугового фільтра;

$\rho_\phi(\tau) = e^{-\frac{\omega_e^2}{4\pi} \tau^2}$ – коефіцієнт кореляції низькочастотної частини на виході фільтра.

Далі використовуємо теорему Вінера-Хінчина (зворотне перетворення) для переходу в спектральну область, тоді отримаємо вираз для спектральної щільності на виході детектора:

$$\begin{aligned} S_3(\omega) &= 2 \int_0^{\infty} R_2(\tau) \cos \omega \tau d\tau = 2 \int_0^{\infty} \frac{\sigma_\phi^2}{8\pi} \rho_\phi^2(\tau) = \\ &= 2 \int_0^{\infty} \frac{1}{8\pi} \left(\frac{S_0 \Delta \omega_e}{\pi} \right) \left(e^{-\frac{\Delta \omega_e^2}{4\pi} \tau^2} \right)^2 \cos \omega \tau d\tau = \\ &= \frac{S_0 \Delta \omega_e}{4\pi^2} \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{\Delta \omega_e^2}{2\pi}\right) \tau^2} \cos \omega \tau d\tau = \frac{S_0 \Delta \omega_e}{4\pi^2} \times \frac{1}{2} \sqrt{\pi \frac{2\pi}{\Delta \omega_e^2}} e^{-\frac{\omega^2}{4} \frac{2\pi}{\Delta \omega_e^2}}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Для низькочастотної області $\omega \ll \Delta \omega_e$; отже, тоді результат $e^{-\frac{\pi \omega^2}{2 \Delta \omega_e^2}} \sim e^{-\frac{1}{\infty}} = 1$, і (1.11) можна записати у вигляді:

$$S_3(\omega) = \frac{S_0}{4\sqrt{2\pi}}. \quad (1.12)$$

Амплітуда нестационарної компоненти A_z , що повільно змінюється, на виході детектора залежить від СКЗ в смузі аналізу та глибини модуляції m (оскільки m визначає інтервал зміни СКЗ в смузі, тобто інтервал зміни амплітуди огибаючої). Для середнього значення напруги на виході лінійного детектора отримаємо:

$$A_z = m\bar{u} = m \frac{\sigma_u}{\sqrt{2\pi}} = m \sqrt{\frac{S_0 \Delta \omega_e}{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = m \frac{\sqrt{S_0 \Delta \omega_e}}{2\pi}. \quad (1.13)$$

З урахуванням (1.12) отримаємо внесок стаціонарної випадкової компоненти в спектральну смугу аналізатора з шириною $\Delta\omega_a$:

$$\sigma_c = \sqrt{S_3 \frac{\Delta\omega_a}{2\pi}} = \sqrt{\frac{S_0}{4\sqrt{2\pi}} \frac{\Delta\omega_a}{2\pi}} = \sqrt{\frac{S_0 \Delta \omega_a}{8\sqrt{2}\pi^2}}. \quad (1.14)$$

З урахуванням (1.13) та (1.14) отримаємо відношення рівня суми стаціонарної та нестационарної компоненти до стаціонарної компоненти в смузі аналізатора спектра з $\Delta\omega_a$:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_\Sigma}{\sigma_c} &= \sqrt{\frac{\sigma_z^2 + \sigma_c^2}{\sigma_c^2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{A_z}{\sqrt{2\pi}\sigma_c}\right)^2} = \\ &= \sqrt{1 + \left(\frac{m\sqrt{S_0 \Delta \omega_e}}{2\pi\sqrt{2}} \frac{\sqrt{8\sqrt{2}\pi^2}}{\sqrt{S_0 \Delta \omega_a}}\right)^2} = \sqrt{1 + m^2\sqrt{2} \frac{\Delta \omega_e}{\Delta \omega_a}}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Отримана формула пов'язує глибину модуляції сигналу виду (1.4) та відношення рівня гармонійної складової до рівня фону спектра огибаючої.

Справедливість виразу перевірена методом математичного моделювання, при цьому отримано відхилення від значення, виведеного

теоретично близько 5%, що несуттєво пов'язане з використанням конкретних реалізацій білого шуму.

Визначимо мінімально діагностично важливий рівень гармоніки до рівня фону в спектрі огинаючої. У більшості джерел глибина модуляції випадкової вібрації, що відповідає сильному дефекту, оцінюється в 20 % [73].

Однак на практиці пороги часто знижують [88], це пов'язано з тим, що сумарна вібрація створюється сукупністю елементів тертя, проте в точку установки датчика така вібрація приходить з різними втратами.

Отже глибина модуляції ряду дефектів, що відповідають їх сильному розвитку, знижується до 10-12% і приблизно до 4% для слабкого дефекту [88]. Виходячи з цього, можна сформулювати вимоги до мінімального діагностично важливого відношення рівня гармоніки до рівня фону, при якому необхідно точно ідентифікувати параметри гармоніки. Для цього розглянемо налаштування аналізатора для вимірювання спектра типової машини обертання з частотою 600 об/хв (10 Гц), вал якої обертається в підшипниках кочення. Розгляд агрегату з нижчою чи високою частотою обертання дає аналогічний результат, оскільки разом із зміною частоти обертання пропорційно змінюється як центральна частота фільтра, так і необхідна частотна роздільна здатність.

Для розрахунку параметрів аналізатора скористаємося рекомендаціями [88]. А для того щоб спектр гармонік розрішився, необхідно щоб частота обертання перебувала мінімум у 8 смугах спектра, тобто мінімальна частотна роздільна здатність $df = 1 \text{ Гц}$ (виходячи з прив'язки до ряду 2^n).

Для обладнання з частотою обертання 10 Гц рекомендується вибрати полосовий третьоктавний фільтр близько 10 кГц. Використовуючи формулу (1.15), отримаємо, що з глибини модуляції в 4% відношення гармоніки до фону дорівнює 2,5 (8 дБ). Це значення є дуже малим і в миттєвих спектрах вібрації гармоніки з таким відношенням до фону сильно спотворюється. Отже необхідно проводити усереднення та розробляти способи обробки спектрів з високим рівнем перешкод.

Таким чином, наведений аналіз довів, що розробка комплексного методу вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту є актуальним науковим завданням та вимагає розробки методів діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу:

- 1) методу автоматичного оброблення вузькосмугових спектрів;
- 2) методу автоматичної адаптації порогових значень;
- 3) методу автоматизації вібродіагностики головної енергетичної установки судна).

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз СЕУ як складної технічної систем. Виділені технологічні контури, визначено параметри, які підлягають діагностиці.

2. Аналіз тенденцій розвитку методів та засобів контролю технічного стану та діагностики, що використовуються для роторних агрегатів без вузлів зворотно-поступальної дії, у процесі експлуатації показав, що вібраційний метод відноситься до найбільш ефективних.

3. У суднових умовах за відсутності на борту фахівців з діагностики оптимальним рішенням для забезпечення безвідмовності таких агрегатів може стати використання автоматичних методів виділення та обробки параметрів вібрації як в інформаційних системах діагностики, так і в системах управління технічними засобами за станом.

4. Найбільш інформативним способом аналізу вібраційного сигналу з метою діагностики є спектральний аналіз самого сигналу і його високочастотних складових, що обгинає його, які несуть у собі діагностичну інформацію в неявному вигляді.

5. Для визначення параметрів гармонійних, випадкових та імпульсних діагностичних компонентів вібрації за спектрами потрібне використання

алгоритмів автоматичного аналізу.

6. За виявленим взаємозв'язком глибини періодичної модуляції випадкового сигналу і відношення рівня гармонійної складової до фону в спектрі огибаючої визначено, що діагностично значуще відношення рівня гармоніки до фону вкрай мало і може становити всього 8 дБ. У спектрах вихідного сигналу вібрації гармоніки, що слабо перевищують фон, також можуть характеризувати розвинені дефекти, що особливо характерно для потокоутворювальних агрегатів з високим рівнем випадкових компонентів.

7. Наведено, що при флуктуаціях частоти обертання агрегату та малому відношенні рівня гармоніки до фону можливості точного визначення параметрів гармонійних компонентів відомими методами різко падають і не можуть у багатьох типах об'єктів бути відновленими шляхом використання синхронних методів аналізу вібрації, у т. ч. з побудовою спектрів порядкових.

8. Зазначені проблеми визначають необхідність розробки комплексного методу для автоматичного виділення діагностичних компонентів з вузькосмугових спектрів вібрації в умовах флуктуації частоти обертання та високому рівні фону, властивих обертальним судновим машинам.

Основні результати, отримані у розділі, наведені у роботах здобувача [97, 106].

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ТА КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТИКИ, ЛАБОРАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1 Обґрунтування показників та критеріїв оцінювання ефективності головної енергетичних установок та аналіз існуючих наукових розробок

2.1.1 Критерій енергозбереження головної енергетичної установки

При створенні автоматизованих систем управління як елементів штучного інтелекту (ШІ) важливим питанням є вибір критерію енергозбереження, за допомогою якого можливо впроваджувати елементи оптимізації енергозбереження для тих або інших режимів роботи СЕУ.

Енергетична та екологічна ефективність суден повинна визначатися на стадії проектування та будівництва судна, а також контролюватися на стадії його експлуатації.

Комітет ІМО із захисту морського середовища (КЗМС) на своїй 59-ій сесії (13-17 липня 2009 р.) визнав необхідність розробки конструктивного індексу енергетичної ефективності (в оригіналі документа ІМО МЕРС.1/Circ. 681 від 17 серпня 2009 р. Energy Efficiency Desing Index позначений EEDI) для нових суден з метою стимулювання інновацій та впровадження досягнень технічного прогресу у відношенні всіх елементів судна та оцінювання енергетичної ефективності (ЕЕ) судна (Energy Efficiency) на стадії його проектування. КЗМС, прагнучи забезпечити можливість використання формули для визначення EEDI до всіх категорій суден, у тому числі шляхом введення у формулу EEDI технічних параметрів, погодив застосування тимчасового керівництва для розрахунку EEDI.

КЗМС визнав необхідність подальшого удосконалення та покращення

методу розрахунку EEDI і запропонував використання тимчасового керівництва для перевірки його основних положень на добровільній основі як для суден із традиційними рушійними комплексами (з приводом від головного двигуна), так і для застосовуваних у теперішній час суден з нетрадиційними рушійними комплексами (дизель-електричними, турбінними та гібридними).

В узагальненому вигляді формула для визначення EEDI, рекомендована КЗМС, може бути представлена так:

$$EEDI = \frac{PF}{P} \times f_{CO_2}, \quad (2.1)$$

де PF – проєктне значення витрати палива всіма судновими користувачами;

P – корисна потужність судна, передбачена його проєктом;

f_{CO_2} – фактор приведення витрати палива до викидів CO_2 .

КЗМС запропонував для використання індикатор експлуатаційної енергетичної ефективності EEOI:

$$EEOI = \frac{M_{CO_2}}{TA}, \quad (2.2)$$

де TA – транспортна робота;

M_{CO_2} – маса викинутого в атмосферу вуглекислого газу в результаті спалювання палива на судні, т., що дорівнює

$$M_{CO_2} = \sum_j FC_j \cdot C_{Fj}, \quad (2.3)$$

де FC_j – витрата палива судном за j –ий рейс або період експлуатації, наприклад, за день ГД та допоміжними двигунами, УК та генератором, т;

C_{Fj} – безрозмірний коефіцієнт приведення витрати палива до емісії CO_2 , що залежить від вмісту вуглецю у паливі.

Транспортна робота розраховується за допомогою формули:

$$TA = \sum_i m_{cargi} \cdot D_i, \quad (2.4)$$

де m_{carg} – перевезений вантаж або виконана робота (кількість контейнерів або пасажирів) або валова місткість пасажирських суден, т;

D – відстань, яка відповідає виконаній роботі з перевезення вантажу (пасажирів), морські милі.

Аналіз даних формул свідчить, що вони не у повній мірі відображають фізичний зміст ЕЕ.

Більш правильно називати EEDI індексом викиду парникового газу CO_2 або індексом ефективності витрати палива на судні, або індексом викидів парникового газу CO_2 , що одночасно характеризує ефективність використання палива для перетворення його енергії в транспортну роботу, але не індексом енергетичної ефективності.

Індекс EEOI може бути використаний для оцінки викидів парникового газу CO_2 без адаптації до умов експлуатації суден. Однак цей параметр вірніше називати показником викидів (емісії) CO_2 , пов'язаних з паливовикористанням на судні, але не індексом ЕЕ, і застосовувати для оцінки контролюючими органами забруднення суднами навколишнього середовища парниковим газом.

Індекси EEDI та EEOI є розмірними величинами, внаслідок чого їх нормування викликає певні труднощі у зв'язку з відсутністю еталона.

Аналіз проблеми енергозбереження на суднах показав, що використання однакових підходів до визначення ЕЕ суден при побудові й в експлуатації є помилковим, оскільки на стадії проектування та будівництва суден важко прогнозувати їх енергозбереження в експлуатації. Тому необхідно розглядати дане питання окремо, розробляючи методики визначення енергетичної ефективності суден.

2.1.2 Критерій екологічної ефективності головної енергетичної установки

На сучасному етапі розвитку водного транспорту значна увага приділяється охороні навколишнього середовища. Тому питання і проблеми екологічної безпеки суден знайшли широке відображення в роботах вітчизняних та закордонних вчених, що запропонували цілий ряд показників екологічної безпеки судноплавства (ризики експлуатаційного та аварійного забруднення навколишнього середовища [4, 17, 27], очікуваний збиток [25], оцінки імовірності забруднення [36, 37] й збитку окремим компонентам природного середовища [41, 42], оцінки розміру шкоди [25, 76]).

Велика кількість робіт присвячена питанням оцінки ризиків виникнення і наслідків забруднення навколишнього середовища, у т. ч. у результаті транспортних подій на водному транспорті [50], і містять оцінки ймовірностей експлуатаційних подій і аварій.

Значний інтерес представляє робота [25], де виконана кількісна оцінка розміру шкоди від компонентів судна різного класу небезпеки (у т. ч. нафовмісними (льяльними) водами, стічними (стічнофановими) водами, сміттям) та розроблений спосіб непрямого визначення розміру шкоди за його типовими характеристиками. У роботі [96] приведені результати статистичних досліджень параметрів впливу на навколишнє середовище при вибуховому горінні на танкерах як географічно орієнтованих випадкових величин і розроблена матриця вибору типу вибухового процесу на танкерах за ступенем небезпеки для навколишнього середовища. У роботі [61] розглядаються питання прогнозування забруднення акваторій з об'єктів транспортного комплексу із застосуванням сучасних інформаційних технологій та запропонована оригінальна методика оцінки параметрів забруднення, що забезпечує досить високу точність оцінки параметрів забруднення й формування необхідної для цього вибірки сценаріїв моделювання.

Незважаючи на позитивні рішення у відношенні забруднення водного

середовища, повітряне середовище (атмосфера) забруднюється із суден твердими частками, окислами азоту NO_x , оксидом вуглецю CO , сумарними вуглеводнями CH , парниковим газом CO_2 як результат експлуатації суднових дизелів. Це забруднення тим більше, чим менше на судні приділяється уваги регулюванню робочого процесу та нейтралізації ВГ дизелів, уловлюванню часток незгорілого палива та твердих включень палива у випускних трубопроводах УК та інсинераторів.

При оцінюванні екологічної ефективності суден перевага повинна надаватися суднам з максимально можливою автономністю плавання за умовами екологічної безпеки (з більшою ємністю збірних цистерн та ємностей для сміття або з установленими на них засобами запобігання забруднення навколишнього середовища), а також ті, для яких рівні викидів в атмосферу більш низькі в порівнянні з конкурентами.

У контексті технічного регламенту екологічна ефективність, як і всяка інша ефективність, могла б розумітися як відношення корисного ефекту (у даному випадку природоохоронного) до витраченого на виробництво цього ефекту ресурсів, виражених у тих же одиницях виміру, що і корисний ефект.

З огляду на специфіку розглянутого питання, можна представити також екологічну ефективність як відношення природоохоронного ефекту до ефекту забруднення навколишнього середовища в тому випадку, якби заходи для запобігання її забруднення не були прийняті.

Кількісна міра (показник) екологічної ефективності повинна бути безрозмірним параметром, значення якого менше одиниці, але прагнути до неї, або при множенні на 100% виражатися у відсотках.

Вимір корисного природоохоронного ефекту і навіть визначення цього поняття досить складні. Природоохоронний ефект у результаті застосування обладнання та засобів попередження забруднення навколишнього середовища із судна може бути виражений у яких-небудь умовних або уже використовуваних одиницях забруднення навколишнього середовища. У тому випадку, коли нічим не стримуване забруднення навколишнього

середовища відходами життєдіяльності людей на судні, експлуатації технічних засобів та обладнання вдалося б описати в тих самих умовних або уже використовуваних одиницях. Усе ускладнюється ще й тим, що різні відходи (забруднення) мають різну фізичну природу й їх кількісні міри мають різні одиниці виміру.

2.1.3 Паливозбереження та управління режимами роботи пропульсивного комплексу

Аналіз, результати якого наведені в попередніх пунктах дослідження, показує, що найбільш ефективним напрямком енергозбереження є економія палива ГД та ДД у процесі експлуатації судна, оскільки витрати на паливо в собівартості річкових перевезень досягають 30% [25].

На економічність ГД та ДД впливає велика кількість експлуатаційних факторів, який можна розділити на дві основні групи (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Фактори впливу на паливо збереження двигуна
(Джерело: розроблено автором)

Фактори першої групи відносяться до показників технічного стану ДВЗ. Вплив цих факторів може бути мінімізований шляхом безперервного контролю параметрів робочого процесу при експлуатації двигуна та негайного реагування обслуговуючого персоналу на відхилення цих факторів і показників роботи двигуна від їх значень, що допускаються, зазначених у технічній документації на судно. Отже, у складі апаратних засобів системи управління двигунами та СЕУ в цілому повинне бути передбачене велика кількість датчиків та приладів контролю, а ШІ, що здійснює функції управління, повинен базуватися на алгоритмах, які здійснюють збір, обробку й аналіз даних від розглянутих приладів (систем) контролю.

Фактори другої групи впливають на економічність ГД, при цьому найбільш істотну роль грає правильний вибір режимів його роботи в різних умовах експлуатації. Для виконання вимог раціонального використання палива ці режими повинні розташовуватися в області, обмеженої, з однієї сторони, допустимими величинами потужності або середнього ефективного тиску, а з іншого боку, – однією з економічних характеристик.

У найпростішому варіанті система автоматичного управління ГД дозволить реалізувати необхідний режим їх роботи на різних ділянках шляху, відповідно до розрахованих режимів руху судна, використовуючи традиційну систему порейсового нормування витрати палива. У цьому випадку закономірність зміни керованої величини (режим роботи ГД) повинна бути відома заздалегідь. Це призводить до істотних похибок нормування.

Оптимізації режимів руху суден на внутрішніх водних шляхах та розробці техніко-економічного обґрунтування оптимальних швидкостей руху присвячена достатня кількість робіт [35, 89 – 95], в яких досить глибоко досліджені фактори, які впливають на швидкість руху суден по мілководдю. У теперішній час паливозберігання на суднах внутрішнього і змішаного плавання реалізується шляхом нормування витрати палива. При цьому розроблювачі норм прагнуть врахувати все різноманіття експлуатаційних ситуацій, яке впливає на витрату палива двигунами.

У світовій практиці на суднах морського флоту в більшості випадків методи нормування витрати палива ґрунтуються на результатах стендових і судових іспитів ГД, а також на статистичних даних, отриманих при обробці судових паливних звітів. Вони дозволяють розрахувати норму тільки для ГД конкретних типів суден, що працюють на фарватері з необмеженими глибинами.

В основі порейсової системи нормування лежить алгоритм розрахунку норм витрати палива і ходового часу, що враховує вплив шляхових умов на режим руху судна. Нормативна витрата палива на проходження судном ділянки шляху B_H^y приймається залежно від періоду навігації і напрямку руху судна за розрахованими заздалегідь таблицями, в яких наростаючим підсумком зазначені значення нормативних витрат палива і ходового часу для проходження судном даних ділянок шляху при допустимих значеннях швидкості. Нормативна витрата палива за рейс підраховується за формулою:

$$B_H^p = B_H^y + C_{bx}T_x + C_{bc}T_c + B_{ман}, \quad (2.5)$$

де C_{bx} – норма витрати палива на час роботи ДД в ході судна, кг/год.;

C_{bc} – норма витрати на час експлуатаційної стоянки, кг/год;

T_x, T_c – фактичний час ходу судна та стоянки на протязі рейсу, год;

$B_{ман}$ – витрата палива на маневри в пунктах проведення вантажних операцій, включаючи бункеровку, кг.

Системи порейсового нормування витрати палива забезпечують достатньо точне урахування впливу таких факторів, як глибина фарватеру, швидкість течії та кількість перевезеного вантажу. Використання порейсових норм витрати палива дозволяє судити про технічний стан судна і ГЕУ.

Таким чином, домагаючись максимально можливої в тих або інших шляхових умовах економічності судна по паливу, автоматично буде вирішуватися проблема вибору "оптимальних" режимів руху судна

Аналіз показує, що неможливо одночасно реалізувати цілі максимальної економічності, максимальної екологічності та максимальної

довговічності обладнання судна. Отже автоматизація процесу управління судном та ГЕУ без участі людини в найближчому майбутньому навряд чи можлива, і це повинно бути враховане при розробці моделі автоматизованого інтелектуального управління ГЕУ.

2.1.4 Показники діагностики головної енергетичної установки

Обґрунтуємо показники діагностики.

Діагностичний параметр повинний відповідати таким вимогам:

- а) однозначність;
- б) чутливість;
- в) стабільність;
- г) інформативність;
- д) швидкість проведення діагностування;
- е) питома вартість діагностування;
- є) повнота діагнозу;
- ж) точність діагностування.

Перераховані вимоги до діагностичних ознак є правилами для їх вибору [28, 29]. При підтримці ГД в технічно справному стані однією з головних проблем є невизначеність у часі діагностування і виборі основних діагностичних параметрів. Визначення технічного стану ДВЗ (“справний” або “несправний”) можливо при оцінці прямих або непрямих діагностичних параметрів. Найчастіше використовуються прямі інтегральні показники діагностування – потужність, обертаючий момент, питома витрата палива.

Вузли і деталі, що вимагають у процесі експлуатації кількарізних регламентних впливів, характеризуються неоптимальною періодичністю технічного обслуговування. У цьому випадку відстеження технічного стану машини є необхідним, насамперед, для усунення витрат від раннього і пізнього обслуговувань [36].

При виборі діагностичних параметрів можуть застосовуватися дві взаємопов'язані методики [38], [51]. Перша методика заснована на оцінці ефективності безперервного контролю і прогнозування параметрів зміни технічного стану шляхом аналізу величини питомих ймовірнісних витрат, що відповідають реалізації пропонованих технічних впливів. Отримані значення параметрів порівнюються із заданими нормативними величинами, після чого приймається рішення про доцільність застосування засобів подальшого (заглибленого) діагностування. Для попередження раптових відмов елементів машин, з огляду на недосконалість показників вірогідності існуючих методів діагностування, система контролю повинна забезпечити превентивне обслуговування з мінімізацією витрат. У загальному випадку при будь-якому значенні параметра технічного стану Y , що задовольняє умов:

$$Y_0 \leq Y \leq Y_{\text{п}}, \quad (2.6)$$

де Y_0 та $Y_{\text{п}}$ – відповідно початкове та граничне значення параметру технічного стану,
повинна виконуватися нерівність

$$a > c + \beta \cdot Y, \quad (2.7)$$

де a – витрати, пов'язані з усуненням відмови;

c – постійна складова витрат обслуговування;

β – коефіцієнт пропорційності, який визначає змінну складову витрат превентивного обслуговування.

Друга методика вибору показників (діагностичних параметрів) заснована на визначенні пріоритетності їх контролю. Для цього всі узагальнені структурні параметри, що характеризують технічний стан елементів ДВЗ, розділяються на такі групи:

а) параметри, зміна яких приведе до аварійної зупинки або до

інтенсивному зносу деталей;

б) параметри, що забезпечують запуск машини в експлуатацію;

в) параметри, що впливають на залишковий ресурс і якість робочого процесу.

При виборі діагностичного параметра найбільш важливо визначити взаємозв'язок між структурними і діагностичними параметрами (рис. 2.2).

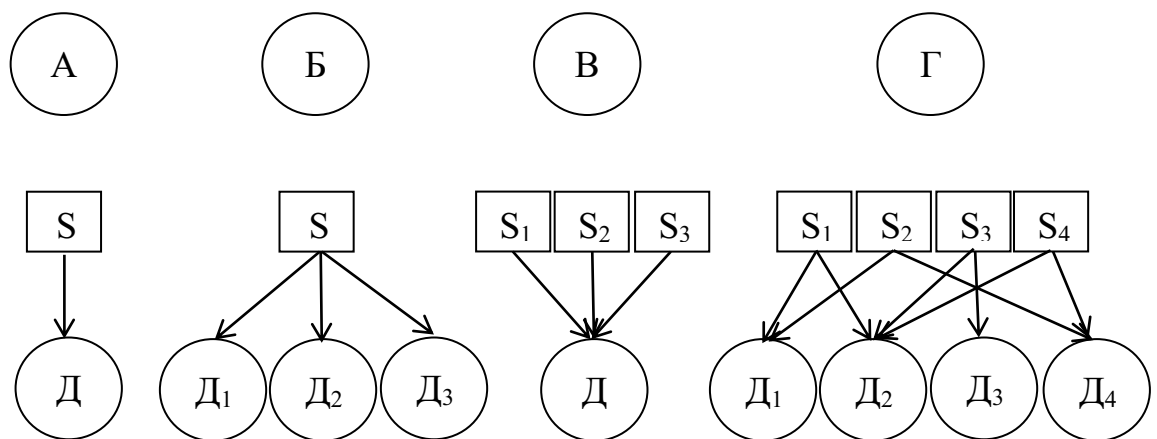


Рисунок 2.2 – Зв'язки між структурними S та діагностичними D параметрами, [38]

З погляду технічного діагностування ГЕУ найсприятливішим зв'язком є варіант А (див. рис. 2.2), коли одному діагностичному параметру відповідає значення одного структурного параметра. Також можна використовувати кілька діагностичних параметрів, що визначають значення одного структурного параметра (варіант Б). У випадку невизначеного зв'язку (варіант В) один діагностичний параметр може виступити мірою оцінки декількох структурних параметрів. Найбільш неінформативними є комбіновані зв'язки, при яких на один діагностичний параметр мають вплив кілька структурних (варіант Г).

Якщо неможливо або складно побудови зміни параметрів технічного стану в процесі експлуатації необхідність контролю того або іншого параметра ранжується методом експертних оцінок. На першому етапі ранжується важливість контролю окремих елементів, на другому – конструктивні і неконструктивні параметри, контроль яких необхідний для

попередження аварійної зупинки ГЕУ з огляду на однозначність, чутливість, стабільність, інформативність діагностичного параметра, швидкість і точність діагностування, повноту діагнозу.

2.2 Аналіз методів та моделей інтелектуального управління складними об'єктами

Задача управління СЕУ в загальному випадку може бути сформульована як задача управління [9], де СЕУ виступає в ролі об'єкту управління (ОУ), а інтелектуальна система виконує функції пристрою управління (ПУ) (рис. 2.2).

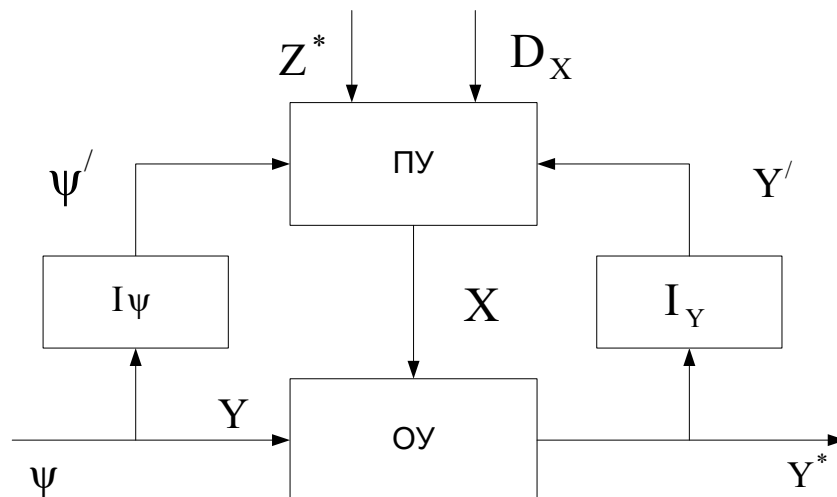


Рисунок 2.2 – Загальна структура автоматизованої системи управління СЕУ
(Джерело: [9])

На рис. 2.2 позначено: ψ – стан зовнішнього середовища, Y – стан ОУ, I_ψ , I_Y – відповідні вимірювачі (метрики); ψ' , Y' – результати вимірювання величин ψ та Y відповідно; X – управляюча (директивна та корегувальна) дія, D_x – ресурси (обмеження на управління), Z^* – мета управління, що складається в переведенні ОУ у необхідний стан Y^* .

У введених позначеннях загальне правило функціонування системи управління можна представити так: система, отримуючи на вході інформацію про стан середовища ψ (ψ') та ОУ Y (Y'), а також інформацію про цілі Z^* та ресурси D_x , видає допустиме управління виду:

$$X = F(\psi', Y', Z^*) \in D_x, \quad (2.6)$$

що переводить ОУ з поточного стану в стан, наближений до стану Y^* . У формулі (2.6) F – ітераційна функція управління процесом функціонування СЕУ. Допустимо, що модель ОУ, яка пов'язує входи та виходи має вигляд $Y' = M_L(\psi', X)$. Тоді задачу синтезу оптимального управління X^* формально можна записати у вигляді:

$$\min_X \mu(Y - M_L(\psi', X)) = \mu(Y - M_L(\psi', X^*)), X \in D_x, \quad (2.7)$$

де функція $\mu(*)$ – міра близькості.

Мета управління Z^* в загальному вигляді може бути формалізована у вигляді набору цілей:

$$\begin{aligned} \omega_i &= \omega_i(\psi', Y', X) = a_i \\ \chi_j &= \chi_j(\psi', Y', X) \geq b_j \\ \eta_k &= \eta_k(\psi', Y', X) \rightarrow \max(\min) \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $\omega_i(\psi', Y', X)$, $\chi_j(\psi', Y', X)$ та $\eta_k(\psi', Y', X)$ – деякі функціонали над змінними; a_i , b_j – задані константи; $i, j, k = 1, 2, \dots$ – індекси [67].

Цілі – рівності $\omega_i = a_i$ можуть задавати, наприклад досягнення ОУ, відсутність яких недопустимо, а цілі – нерівності $\chi_j \geq b_j$ – аналогічний

мінімум досягнень, що можна вважати успішним управління СЕУ.

Необхідно відмітити, що цілі управління не завжди є сталими та залежать від стану зовнішнього і внутрішнього середовища. Процедура синтезу моделі ОУ M_L є ітераційною (як і функція управління $F(\psi', Y', Z^*)$) та включає до свого складу етап структурного та параметричного синтезу.

На етапі структурного синтезу визначають способи формалізації величин ψ' , Y' та X , а також функціональної залежності $Y' = M_L(\psi', X)$. При цьому величини ψ' , Y' задаються у вигляді векторів, а величина X у вигляді двійки: $X = (U, V)$, де $U = (u_1, u_2, \dots, u_i), i = \overline{1, n}$ – вектор навчальних дій, а $V = (v_1, v_2, \dots, v_j), j = \overline{1, m}$ – вектор корегуючих дій. Залежність $Y' = M_L(\psi', X)$ представимо у вигляді деякої функції F_L , що визначена з точністю до вектора параметрів $S = (s_1, s_2, \dots, s_k), k = \overline{1, r}$.

Виходячи з вищевикладеного, модель ОУ має вигляд:

$$Y' = F_L(\psi', U, V, S), \quad S \in D_s, \quad (2.9)$$

де D_s – множина допустимих значень вектора параметрів S .

На етапі параметричного синтезу необхідно визначити значення компонентів вектора S , тобто значення параметрів $S = (s_1, s_2, \dots, s_k), k = \overline{1, r}$. при цьому можуть бути використані три підходи [68]:

- а) ідентифікація в режимі нормального функціонування ОУ (при відсутності спеціальних управляючих дій X);
- б) ідентифікація на основі організації спеціальних експериментів з ОУ;
- в) комбінований підхід.

Ідентифікацію на основі спеціальних управляючих дій можна записати у вигляді:

$$\min_s \|Y' - F_L(\psi', X, S)\| = \|Y' - F_L(\psi', X, S^*)\| = \|Y' - F_L^*(\psi', X)\|, \quad S \in D_L \quad (2.10)$$

де $\|*\|$ – деяка векторна норма, $F_L^*(\psi', X)$ – шукана модель ОУ.

Рішення постановки (2.10) можна знайти методами планування експерименту [69, 70].

Для моделей (2.5)-(1.20) задачу синтезу оптимальних управляючих дій X^* можна записати у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації:

$$\text{extr}_X H(F_L^*(\psi', X)) = H(F_L^*(\psi', X^*)), \quad X \in Q_x, \quad (2.11)$$

де $H(\eta_1, \eta_2, \dots)$ – векторний критерій оптимальності (економічність, ЕЕ, екологічність, тощо), Q_x – множина допустимих управляючих дій:

$$Q_x = \left\{ \begin{array}{l} \omega_i(F_L^*(\psi', X)) = a_i \\ \chi_j(F_L^*(\psi', X)) \geq b_j \\ X \in D_x \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Задача (2.11) може бути розв'язана відомими методами рішення задач багатокритеріальної оптимізації [71-73].

У результаті реалізації управляючих дій X^* ОУ, як правило, не переходить до потрібного стану Y^* . Причини цього факту є різними: недосконалість моделі $F_L(\psi', X)$, похибка виміру величин ψ та Y , нестационарність характеристик ОУ.

2.3 Структура системи автоматизованого діагностування

Структура системи діагностування наведена на рис. 2.3. Датчики вібрації (ДВ) встановлюються на опорах роторів компресора та силової

турбіни, а також на нижній та верхній коробці приводів. Датчики вібрації та частоти обертання підключаються до блоку підсилювачів (БП), розміщеному на рамі двигуна, в якому відбувається посилення та перетворення електричного заряду, пропорційного вимірюваному віброприскоренню, електричну напругу за допомогою підсилювачів (П). Коефіцієнт посилення кожного підсилювача (поканально) задається керуючою частиною схеми нормалізації, управління, контролю та живлення (СНУК та Ж), що входить до складу БП, що дозволяє виключити навантаження підсилювачів по входу. На СНУК та Ж також надходять сигнали частоти обертання від індукційних датчиків (ІД).

Далі сигнал масштабується і по диференціальній кабельній лінії зв'язку передається до блоку обробки сигналів (БОС), який може бути віддалений від двигуна на відстань до 30 м. У БОС сигнали перетворюються на цифрову форму чотирма чотириканальними аналого-цифровими перетворювачами, що синхронно працюють (АЦП1...АЦП4). У БОС також надходять тахометричні сигнали від ДВ локальної системи керування (ЛСК) газотурбінного двигуна (ГТД).

У схемі нормалізації (СН) БОС тахометричні сигнали перетворюються на меандри – лічильну послідовність однакових імпульсів. Подальша обробка оцифрованих сигналів здійснюється розподіленою обчислювальною системою БОС, що складається з сигнальних процесорів (СП1...СП6) відповідно до обраних алгоритмів.

Сигнальні процесори спільно з центральним обчислювачем (ЦО), а також СНУК та енергонезалежною пам'яттю (ЕНП) є підсистемою обробки реального часу з розподіленими обчислювальними ресурсами. У цій підсистемі ЦО координує роботу функціональних вузлів розподіленої обчислювальної системи БОС, виконує необхідні обчислення та здійснює обмін інформацією з локальною мережею управління (ЛМУ) за протоколом TCP/IP локальної мережі Ethernet та автоматизованим робочим місцем (АРМ) оператора системи технічного діагностування [9].

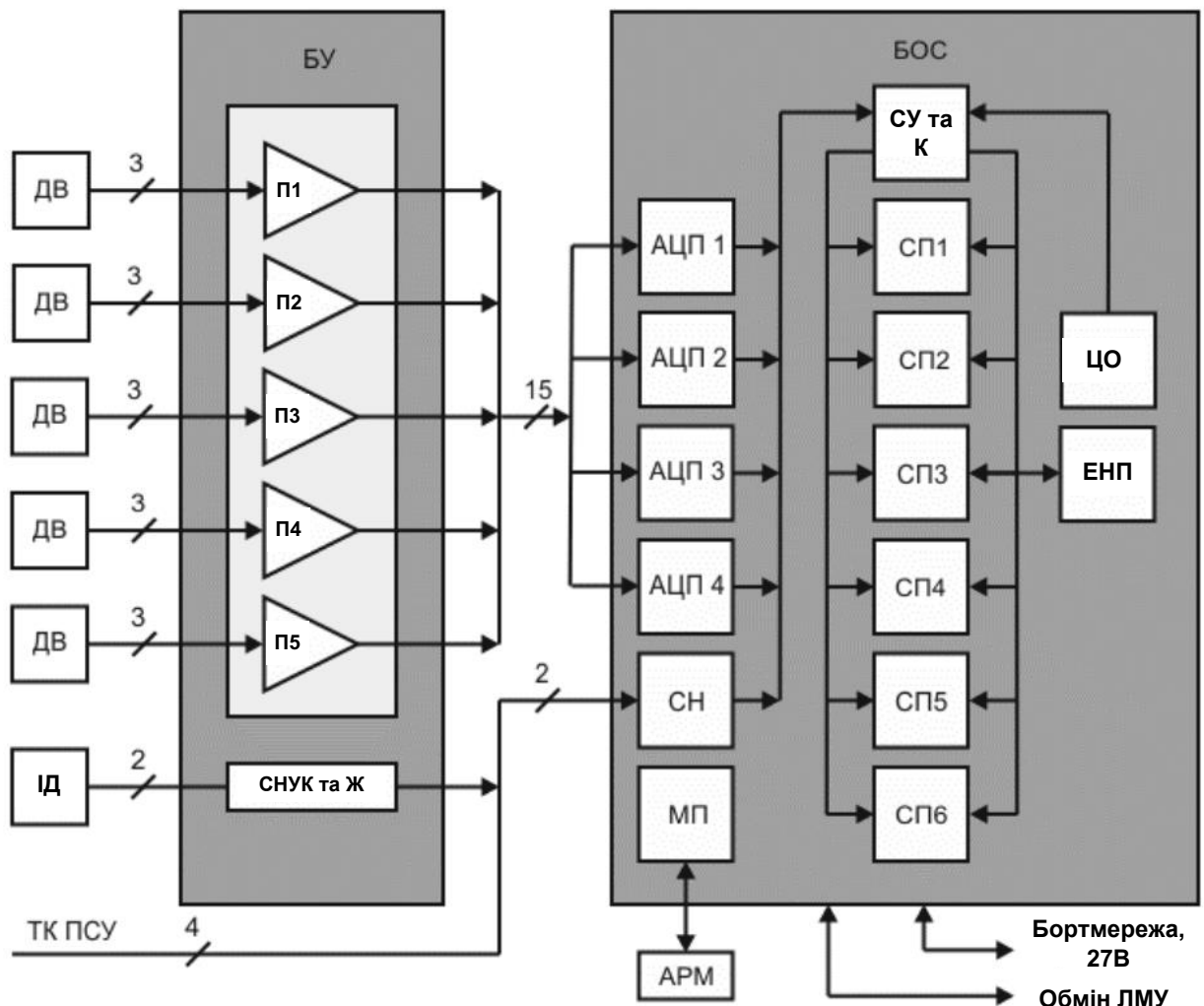


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи діагностування (Джерело: [9])

Основними режимами роботи системи є режим контролю вібрації та режим діагностування. Контроль вібрації є пріоритетним режимом і вмикається за умовчанням при подачі живлення на блоки системи. Контроль вібрації виконується за всіма каналами виміру вібрації паралельно з оновленням вихідних даних один раз на секунду.

Контроль полягає у порівнянні поточних значень параметрів вібрації зі вставками “підвищена вібрація” та “небезпечна вібрація”. Вихідні дані системи містять значення контрольованих параметрів (середньоквадратичне значення (СКЗ) віброшвидкості у смузі від 30 до 400 Гц, рівень віброшвидкості на частоті першої та другої гармоніки кожного валу) та ознаки перевищення.

СКЗ віброприскорення у третьоктавних смугах частот від 10 до 10 000 Гц. За результатами контролю вібрації може бути сформований індивідуальний для кожного екземпляра двигуна вібраційний паспорт, який є набором коефіцієнтів багатовимірних поліномів, що апроксимують залежності контрольованих параметрів від вектору вхідних параметрів. Вектор вхідних параметрів містить дані про частоти обертання роторів та дані про поточний режим двигуна, які пристрій отримує від системи керування ГТД.

Вібраційний паспорт формується під час приймально-здавальних випробувань двигуна та уточнюється на етапі ходових випробувань. Після формування вібраційного паспорта пристрій видає чисельні значення відхилень контрольованих параметрів вібрації від статистичної норми для даного двигуна. Це дозволяє визначати відносно повільні стійкі зміни стану ГТД та прогнозувати величину часового інтервалу, після якого контрольовані параметри можуть досягти значень уставок “підвищена вібрація” та “небезпечна вібрація”.

Режим діагностування призначений для виявлення дефектів основних вузлів двигуна та приводу та оцінки ступеня розвитку цих дефектів, вмикається у таких випадках: при перевищенні одним з контрольованих параметрів вібрації уставок “підвищена вібрація” та “небезпечна вібрація”, при суттєвому відхиленні одного з контрольованих параметрів вібрації у будь-який бік від статистичної норми, встановленої вібраційним паспортом, після закінчення часового інтервалу, заданого як параметр для періодичного діагностування, на час вступу завдання від зовнішньої інформаційної системи (зовнішнього комп'ютера).

Таким чином, характерною ознакою сучасної діагностичної системи є використання складних алгоритмів автоматичної обробки даних, і використання сучасної обчислювальної програмно-апаратної бази. Це вимагає опрацювання структури системи, зокрема побудови обчислювальної частини за розподіленим принципом, для оптимізації обчислювальних навантажень і підвищення швидкості обробки даних.

Для прийняття рішення в системі використовується велика сукупність контрольованих параметрів, що охоплює широкий частотний діапазон приблизно у 11,5 кГц за рахунок третьоктавного аналізу, що, зокрема, дозволяє охоплювати частотну зону, в якій може міститися інформація про характер взаємодії лопаток з потоком газу. Це дозволяє виявити зміну стану, пов'язану з дефектами лопаток або направляючого апарату, що є значною перевагою перед системами, які використовують параметри лише низькочастотної вібрації [28].

Висновки до розділу 2

1. Виділені критерії оптимального управління ГЕУ, такі як енергетична ефективність, екологічна ефективність, паливо витрата. Наведено, що дані критерії є взаємозалежними, що призводить до постановки задачі багатокритеріальної оптимізації.

2. Розроблена структурна схема засобів діагностування, що дозволяє провести натурні експерименти досліджень та довести результати.

3. Розроблена схема проведення дисертаційного дослідження.

Основні результати, отримані у розділі наведені у роботах здобувача [97, 99, 106].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДУ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

У даному розділі дисертації наводиться сутність нових наукових результатів, що у сукупності формує комплексний метод вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту.

Вперше розроблено метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій. Одержав подальший розвиток метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів. Удосконалено метод автоматичної адаптації порогових значень для своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для судових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів.

3.1 Розроблення методу автоматичного оброблення вузькосмугових спектрів

3.1.1 Структура методу автоматичного оброблення вузькосмугових спектрів

Для вилучення із спектрів вібрації параметрів різної природи розроблено метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів.

Сигнал вібрації роторного обладнання працюючої ГЕУ може містити в собі компоненти різної природи – періодичні, випадкові та імпульсні, відомі методи виділення.

При цьому основним видом аналізу, що дозволяє визначати параметри періодичних, стаціонарних випадкових і періодичних імпульсних компонент є спектральний аналіз вібрації вихідного сигналу і високочастотної вібрації. Спектр сигналу несе в собі інформацію про залежність розподілу потужності

сигналу від частоти, в ньому немає явної інформації про наявність і параметри гармонійних або випадкових процесів, і для того, щоб витягти цю інформацію потрібен додатковий аналіз. Такий аналіз може проводитися оператором візуально, однак, як було показано в розділі 1 дисертаційної роботи, для судових умов необхідна його автоматизація.

Спектри вібраційного сигналу реального роторного обладнання якісно відрізняються від спектрів сигналів, аналізованих у різних інших сферах, таких як радіотехніка, також відрізняється мета обробки спектрів. Вібрація порушується різними за фізичною природою коливальними процесами, кожен з яких робить свій внесок у результуючий сигнал.

Отже, вібраційний спектр має складну структуру та містить у собі різну кількість складових частин, кожна з яких може нести діагностичну інформацію. Так, спектр вібрації насоса може містити всього два-три гармонійні ряди, кратних частоті обертання, кожен з яких складається з декількох складових (рис. 3.1).

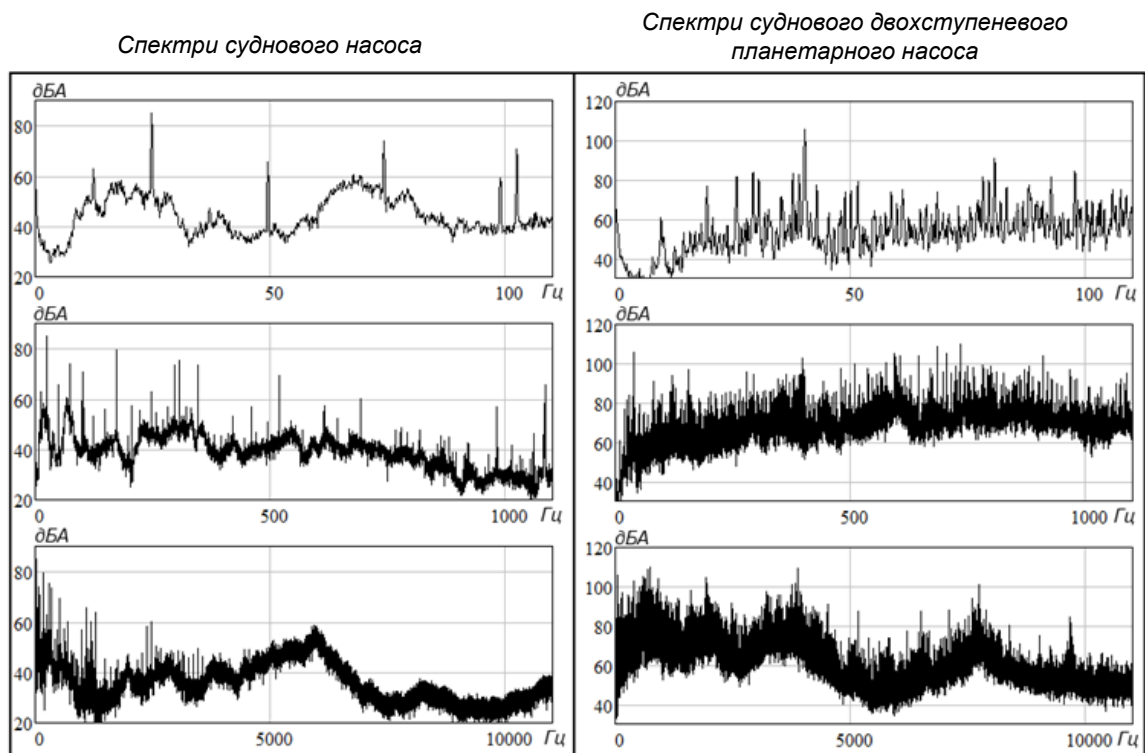


Рисунок 3.1 – Спектри вібрації судового насоса та планетарного судового редуктора, [14]

Спектр складного суднового агрегату СЕУ, наприклад, турбогенератора, може містити більше 10 різних гармонійних рядів, кожен з яких може містити десятки гармонік. Різні за фізичною природою процеси призводять до появи окремих компонентів у сигналі та його огинаючої і, відповідно, у спектрі вібрації. При цьому існує низка факторів, що призводять до спотворення форми гармонійних складових у спектрах вібрації:

- невірність (накладення) близько розташованих за частотою гармонійних складових;
- нестабільність частоти обертання;
- низьке відношення рівня гармоніки до рівня фону біля неї.

На відміну від багатьох інших областей застосування спектрального аналізу корисну інформацію про процеси, такі як тертя, мікроудари, характер взаємодії рухомого середовища (рідини або газу) з обертовими та нерухомими елементами машини та ін., несе в собі розподіл фону спектру, параметри якого також необхідно визначати, оцінювати та використовувати для контролю технічного стану об'єкта. Вказані особливості вібраційного сигналу повинні враховуватися при розробці алгоритму автоматичного аналізу спектрів.

Аналіз спектрів різних типів реального роторного обладнання, у т. ч. суднових планетарних редукторів, газових турбін, насосів, електромашинних перетворювачів та інших об'єктів, дозволив визначити характерні для суднових умов особливості, що ускладнюють такий аналіз:

1. Нестабільність частоти обертання, викликана змінними навантаженнями на вузли через качку, нестабільність мережі живлення, роботи систем регулювання та інших значущих факторів;
2. Сильний взаємовплив близько розташованих машин через обмеженість приміщень, що проявляється як у спектрах конкретної машини компонент, джерелами виникнення яких є взаємодія інших елементів машинах.

У процесі візуального аналізу спектрів реального обладнання та виходячи з досвіду вивчення різних модельних сигналів, що генеруються в

середовищі Mathcad, сформульовані такі особливості спектрів вібраційних сигналів роторного обладнання та їх аналізу з точки зору оцінки параметрів діагностично значимих компонентів (див. розділ 2 дисертаційної роботи):

1. Спектр вібрації роторної машини в логарифмічних величинах (дБ) представляється вузькими викидами (рис. 3.2) на фоні обмеженого розкиду відліків, біля деякої плавної кривої. При цьому подібні викиди інтерпретуються як гармонійні складові спектру, а решта всіх відліків як фон, що характеризує випадкові складові.

2. Кількість відліків у спектрі, що характеризують гармонійні складові, як правило, набагато менше (у більшості випадків й на порядок більше) кількості відліків, що визначаються випадковими складовими, які входять до області обмеженого розкиду. У більшості спектрів типових агрегатів щільність гармонійних складових падає зі зростанням частоти.

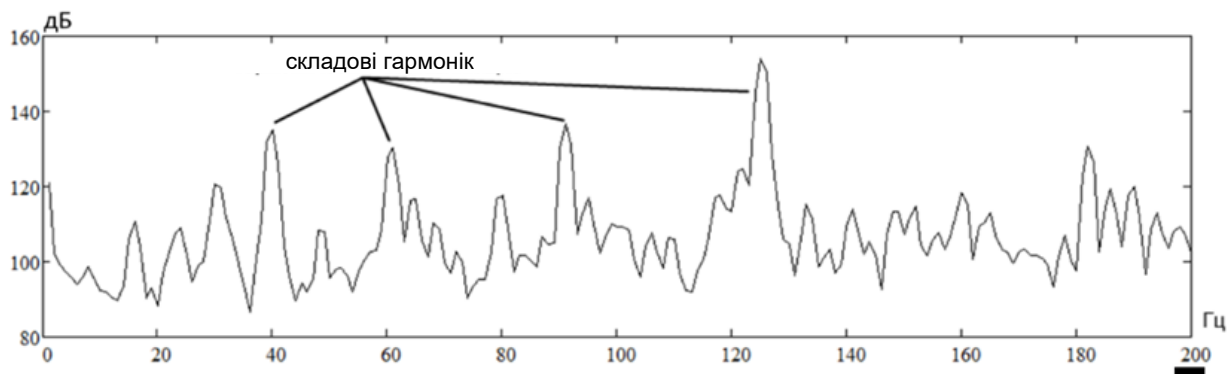


Рисунок 3.2 – Гармонічні складові у спектрі вібрації планетарного суднового редуктора (результати візуального аналізу), [14]

3. Ознакою гармонійної складової, крім значного перевищення над фоном, є її обмежена ширина та характерна форма, які залежать від віконного перетворення, що застосовується в ШПФ. Форма гармонійних складових спектра трохи перевищує фон, спотворюється тим сильніше, чим нижче відносний до фону рівень гармоніки. Частота гармонійної складової близька до максимальної частоти відліку (з точністю до половини ширини частотної лінії). Для того, щоб частота гармоніки збіглася з частотою

спектрального відліку, спектр має бути побудований за цілою кількістю періодів, що відповідають частоті даної гармоніки. Проте, практично немає сенсу проводити вибірку, спираючись на частоту конкретної компоненти, оскільки у сигналі можуть бути компоненти інших некротних її частот.

4. Збільшення кількості усереднень спектра призводить до зниження рівня розкиду випадкових компонентів, що позитивно позначається на виділенні гармонік з рівнями, порівнянними з фоном, але призводить при цьому до спотворення форми гармонік за їх нестабільних частот через збільшення тривалості вимірювання. Частоти більшості гармонійних складових у спектрі пов'язані лінійно з частотою обертання одного з роторів, тому наявність вузьких викидів з однаковою шириною по всій частотній ділянці спектра характеризує відносну стабільність частот обертання роторів у порівнянні з обраним частотним дозволом. Зростання ширини і спотворення форми викидів зі зростанням частоти свідчить про значну девіацію частоти обертання агрегату проти обраного частотного еталону. Наявність окремих широких складових у спектрі за відсутності ознак значної зміни частоти обертання свідчить про наявність у цій області невирішених за частотою гармонік. При девіації частоти енергія кожної гармонійної компоненти розподіляється за кількома частотним лініями, а оцінка її рівня за максимальним відліком дає істотну помилку, оскільки містить лише частину її потужності.

5. Істотним викидам відліків спектра також можуть відповідати резонанси, які підсилюють коливання в локальних частотних областях, проте їх ширина, як правило, значно перевершує ширину кількох нерозв'язаних гармонік, що йдуть поспіль. Також у деяких агрегатах можуть бути коливальні процеси, частоти яких не пов'язані лінійно із частотою обертання валу (одного з кількох валів). Прикладом таких процесів можуть бути складові, пов'язані з обертанням електромагнітного поля, які, у разі асинхронного двигуна, при зміні частоти обертання залишаються незмінними або коливання, які не пов'язані із взаємодією елементів досліджуваного

агрегату, а передаються ззовні через коливання тиску середовищ або безпосередньо через жорстку механічну зв'язку, наприклад, від навісного допоміжного обладнання чи розташованого поблизу машин, що особливо у обмежених за розміром суднових приміщеннях.

Виходячи з особливостей, описаних вище, можна сформулювати такі вимоги до автоматичного аналізу спектрів вібрації суднових машин:

1. Повинні ідентифікуватися викиди спектральних відліків, що відповідають гармонійним складовим спектру, за якими має визначатися їх частота та рівень.

2. Зі спектру повинна отримуватися інформація про розподіл потужності випадкових складових за рахунок видалення знайдених гармонійних складових.

3. Повинне відбуватися визначення параметрів гармонійних складових при девіації частоти обертання, характерної для суднових умов.

4. Має бути передбачено спосіб оцінки стабільності частоти обертання за відсутності датчика оборотів (неможливості його установки).

Точність визначення частоти гармонійної компоненти має вкрай важливе значення, оскільки саме за частотою здійснюється її ідентифікація (рішення про віднесення її до того чи іншого гармонійного ряду). Точність ідентифікації рівня гармонійної компоненти має бути прийнятною, оскільки діагностично значуще зростання визначається зміною в рази [78], а похибка навіть у 20-30% може бути цілком допустимою.

Тому і загальнопромислові віброакселерометри, що застосовуються для вібродіагностики, зазвичай мають нерівномірність частотної характеристики у робочому діапазоні частот 1-3 дБ, що відповідає точності 10-30%. Далі наводиться реалізація методу, що задовольняє сформульованим вище вимогам.

3.1.2 Алгоритм побудови лінії фону для поділу спектральних відліків

У спектрі роторного обладнання частка спектральних відліків, рівень яких визначаються гармонічними процесами в рази (а здебільшого в десятки разів), менше частки відліків з переважним внеском випадкових складових, який називають фоном спектра. При цьому розподіл відліків фону у відносних одиницях (дБ) має обмежений розкид біля деякої кривої лінії фону, який залежить від кількості спектрів усереднень. Визначення цієї лінії, яка використовується для пошуку гармонійних складових, є основним завданням.

Для отримання згладженої лінії фону необхідно виключити вплив гармонійних складових, що реалізується за допомогою алгоритму, блок-схема якого наведена на рисунку 3.3.

За вихідним спектром в лінійних одиницях (СКЗ спектру), зведеному в ступінь $1/4$ для звуження інтервалу розкиду фону (форма спектра стає аналогічною поданням у дБ) розраховується лінія фону L за допомогою зустрічного експоненційного згладжування з коефіцієнтом згладжування α [60, 81].

Потужність даної лінії повинна відповідати потужності фону, для цього слід використовувати нормувальний коефіцієнт K_n , що залежить від кількості усереднень спектра та коефіцієнта згладжування. Якщо відліки вхідного спектра вищі за розраховану лінію порога $L * K_p^{1/4}$, то вони наводяться до лінії фону L . У результаті даної операції розраховується спектр фону SpF . Якщо необхідно, процедура згладжування та приведення викидів до фону повторюється K_f разів, при цьому на вході згладжування замість вхідного спектру використовується SpF , отриманий на попередньому кроці, також можуть використовуватись інші значення K_p, K_n та α .

Коли досягнута необхідна кількість ітерацій видалення викидів, із спектру Sp в окремий масив SpG виділяються відліки вхідного спектру, які перевищили останній поріг до лінії фону.

Даний масив визначає відліки, які відповідають гармонійним

складникам, і далі використовується для ідентифікації їх параметрів.

Аналогічний алгоритм можна застосувати і для значень спектра в дБ, перевівши коефіцієнти Kp та Kn в дБ, й використати підсумовування відносних одиниць замість множення на коефіцієнт. Проте використання ступеня $1/4$ виглядає кращим – як буде показано далі, цей ступінь використовується для визначення параметрів гармонічних компонент.

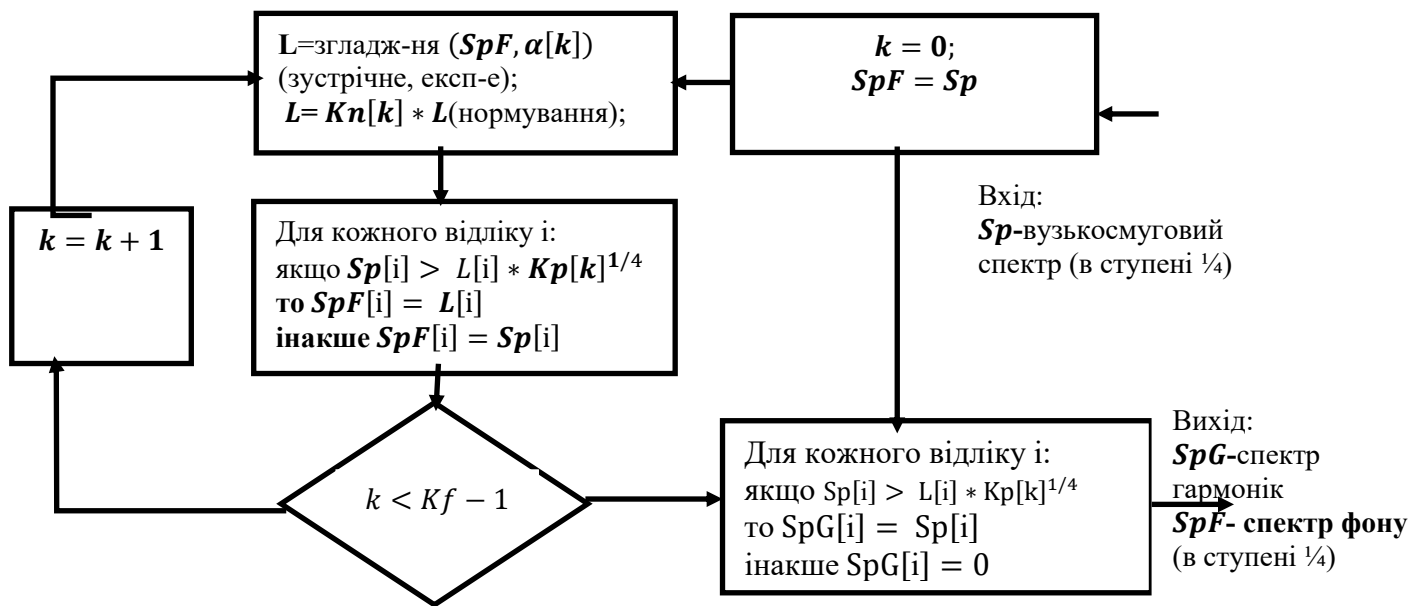


Рисунок 3.3 – Схема алгоритму визначення спектру фону та спектру гармонійних компонентів (Джерело: розроблено автором)

При згладжуванні необхідно враховувати, що перші відліки спектру можуть визначатися постійною складовою сигналу, яка не пов'язана із випадковими процесами і може спотворити згладжену лінію.

Згладжування є фільтрацією і призводить до зміщення (затримки) вихідних даних щодо вхідних [60]. Для виключення даного впливу пропонується проводити згладжування відліків спектра у прямому, а потім у зворотному порядку (реверс) з подальшим обчисленням середнього за двома результатами.

На рисунку 3.4 наведено результат такого перетворення (зустрічного згладжування), яке дозволяє отримати коректнішу оцінку фону поблизу гармоніки, що впливає на точність її виділення та ідентифікації.

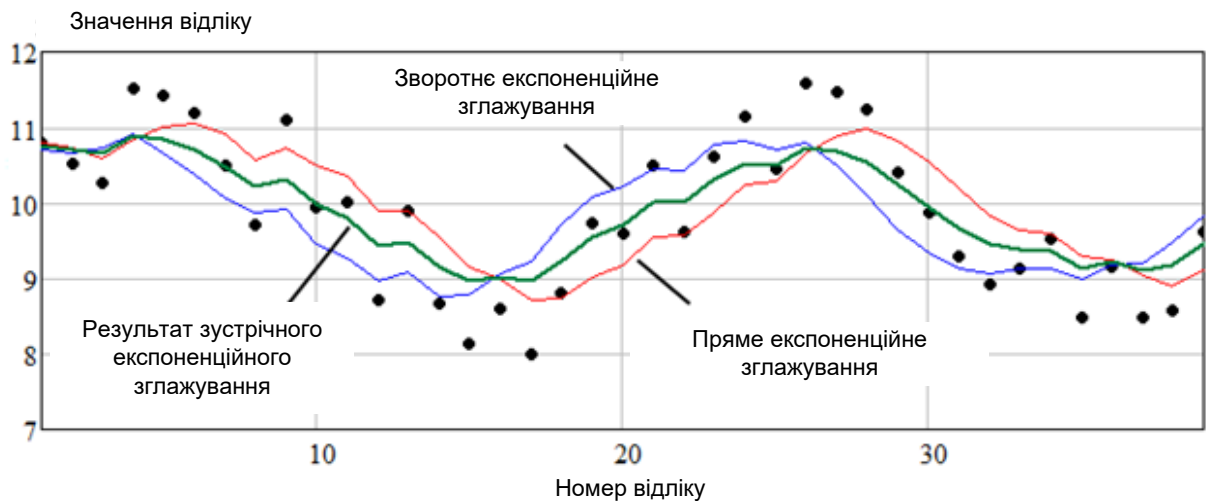


Рисунок 3.4 – Результат зустрічного експонентного згладжування даних (Джерело: [40])

На рис. 3.5 наведено реальний спектр планетарного суднового редуктора з побудованою лінією фону та лінією порога за допомогою запропонованого способу з використанням двох ітерацій видалення викидів відповідно до схеми, наведеної на рис. 3.3.

Як метод згладжування використовувалося зустрічне експоненційне згладжування з коефіцієнтами 8 на першій ітерації циклу і 16 – на другій.

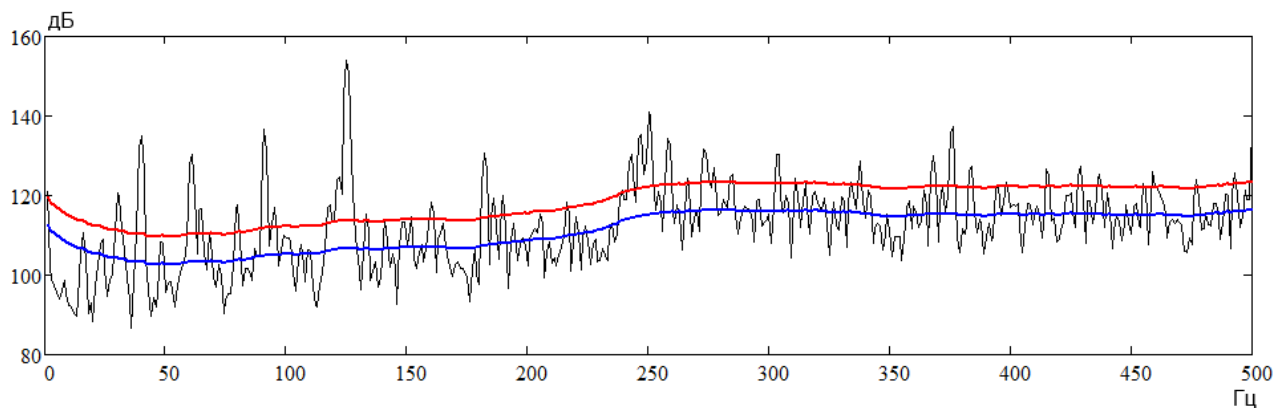


Рисунок 3.5 – Побудова лінії фону (синім) та лінії порога (червоним) за спектром планетарного суднового редуктора (Джерело: [14])

Відліки, що входять до спектру гармонійних компонентів, повинні використовуватися для уточнення їх параметрів з достатньою для цілей діагностування похибкою і врахуванням можливих для суднових умов спотворень.

Відліки, що входять до спектру випадкових компонентів, повинні використовуватися для побудови широкосмугового спектру фону, оскільки діагностичну інформацію несе його сумарна потужність у широких частотних діапазонах. Рішення даних завдань описано далі.

3.1.3 Визначення параметрів гармонійних та випадкових компонентів

Спосіб корекції параметрів гармонійних складових, використаний фірмою «Брюль і К'єр», який широко застосовується у вібродіагностиці, дає істотну помилку при спотворенні форми гармоніки через нестабільну частоту обертання та високий рівень фону.

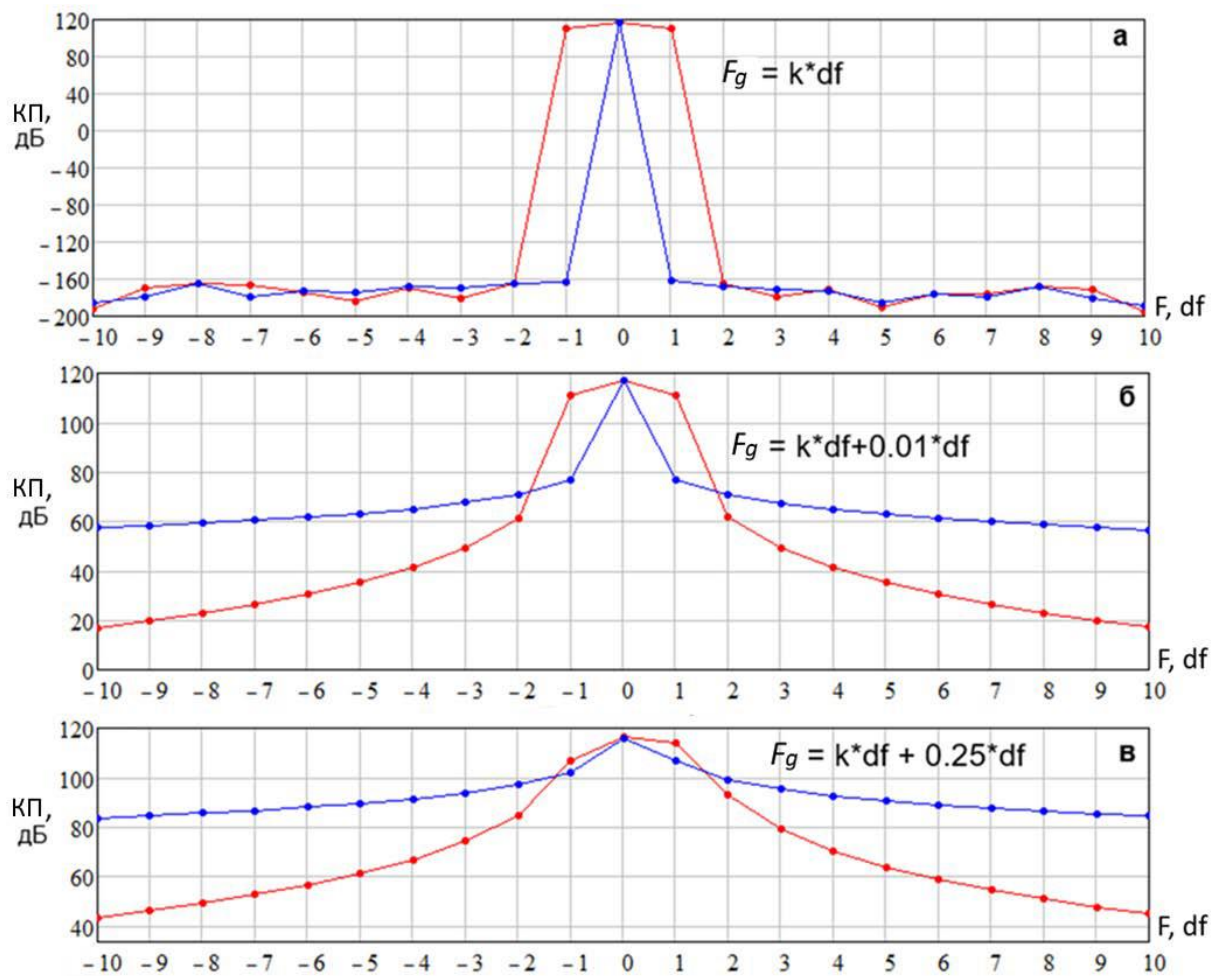
Також розглянуті способи обробки спектрів не вирішують одне з основних завдань – визначення параметрів випадкових компонентів сигналу роторних машин різного типу. При цьому розглянуті проблеми застосування порядкових та синхронних спектрів, що свідчить про необхідність підвищення точності обробки спектрів сигналів тільки з відліками, що рівно відходять за часом, в умовах нестабільності частоти обертання.

Для пошуку такого способу було проаналізовано форму розподілу відліків спектра, отриманого за допомогою перетворення Фур'є гармонійного сигналу з різними параметрами. При цьому використовувалася найбільш підходяща для вібродіагностики віконна вагова функція Хана [78].

Якщо частота гармонійного сигналу кратна частотному дозволу спектру df , то при обчисленні його спектру потужність сигналу при використанні прямокутного вагового вікна зосередиться в одному спектральному відліку, відповідному частоті вхідної гармоніки. При використанні вікна Ханна основна потужність зосередиться в 3-ох спектральних відліках, де рівні бічних відліків будуть нижчими від центрального приблизно на 6 дБ (рис. 3.6, а).

Якщо обчислити спектр гармонійного сигналу, частота якого не кратна df , то потужність гармонійної складової розподілиться за всіма відліками

спектра, а характер такого розподілу залежатиме від положення частоти гармоніки між частотами сусідніх спектральних відділів (рис. 3.6 б) та в).



F_g – частота гармонійної складової, df – частотна роздільна здатність спектра, k – ціле позитивне число; синій колір – використання прямокутного вікна, червоний – вікна Хана

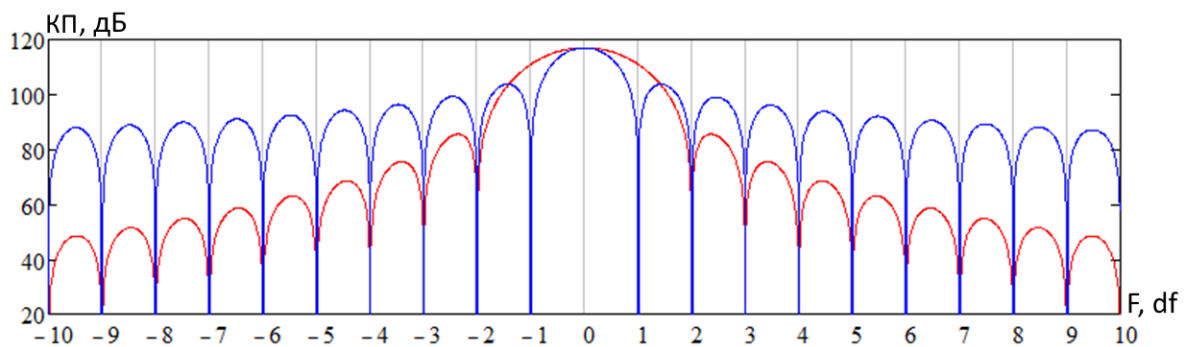
Рисунок 3.6 – Спектри гармонійного колювання залежно від його частоти (Джерело: [78])

З рисунку видна перевага вагового вікна Хана, використання якого призводить до розширення гармоніки – зростання сусідніх з максимальним відділів спектра, з одного боку, і до зниженні її впливу на рівні наступних відділів спектра, з іншого. Наведений рисунок дозволяє виявити слабкі гармонійні складові поблизу сильних гармонік і точніше визначити їх

параметри при високому рівні фону.

Характер впливу частоти гармоніки на рівень конкретного відліку спектра наочно демонструє амплітудно-частотна характеристика смуги спектра, де по осі частот відкладається відносна частота, виражена в df , а, по осі Y – коефіцієнт передачі в дБ (рис. 3.7).

З графіка видно, що ширина основної пелюстки АЧХ смуги спектра, обчисленого за допомогою вікна Хана, становить 4 df . Використання вікна Хана дозволяє значно підвищити діапазон аналізу за рахунок суттєвого спаду бічних пелюстків за рівнем – близько 60 дБ на відстані 10 df від центральної частоти, тоді як для прямокутного вікна цей показник становить всього 20 дБ, що наочно демонструє перевагу використання обраного часового вікна з точки зору виявлення близько розташованих гармонік різного рівня.



$F = 0$ відповідає частоті спектральної смуги, для якої побудовано характеристику, синім – при використанні прямокутного вікна, червоним – вікна Хана

Рисунок 3.7 – Логарифмічна АЧХ смуги спектру (Джерело: [78])

Проаналізуємо форму розподілу потужності гармоніки за частотними смугами спектра. На рис. 3.8 різними кольорами показано АЧХ кількох послідовних смуг спектру та вказано чорну вертикальну лінію, положення якої відповідає довільній частоті F_g деякої гармоніки.

Значення відліків спектра визначаються перетином цієї лінії з АЧХ різних смуг спектру. З рисунку видно, що ця форма відповідає значенням АЧХ однієї лінії спектра (на рисунку 3.8 смуга 4 – синій колір).

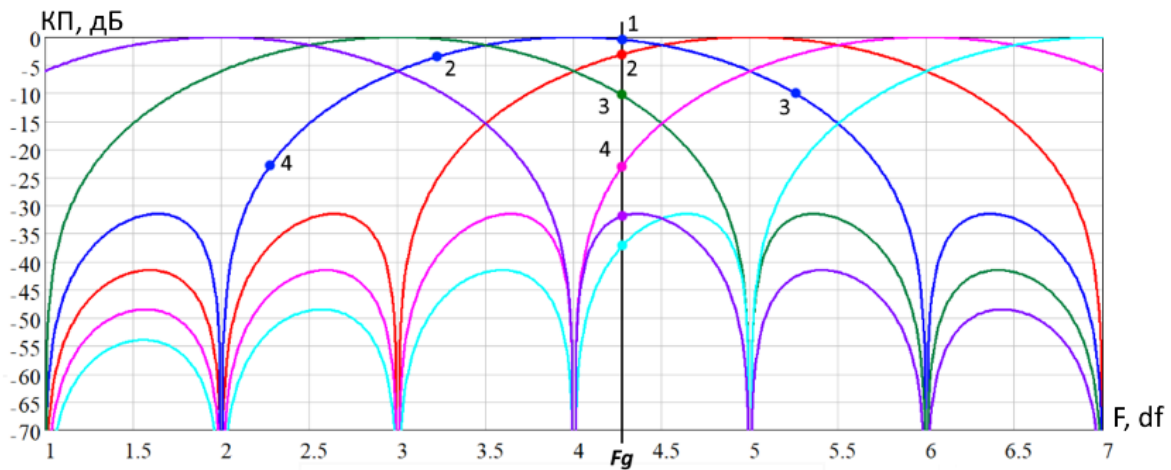


Рисунок 3.8 – Розподіл рівня гармоніки за відліками спектру
(Джерело: [78])

Отже, форма гармоніки відповідає формі основної пелюстки АЧХ смуги спектру, а будь-яка гармоніка має строго певну форму, симетричну щодо її частоти. Також при девіації частоти обертання або високому рівні фону потужність гармоніки відносно рівномірно розподіляється по сусіднім спектральним відлікам, зберігаючи симетрію відносно середньої частоти.

Таким чином, для розв'язання задачі визначення параметрів гармонійної компоненти можна використати інтерполяційний метод, що враховує форму центральної пелюстки АЧХ смуги спектра.

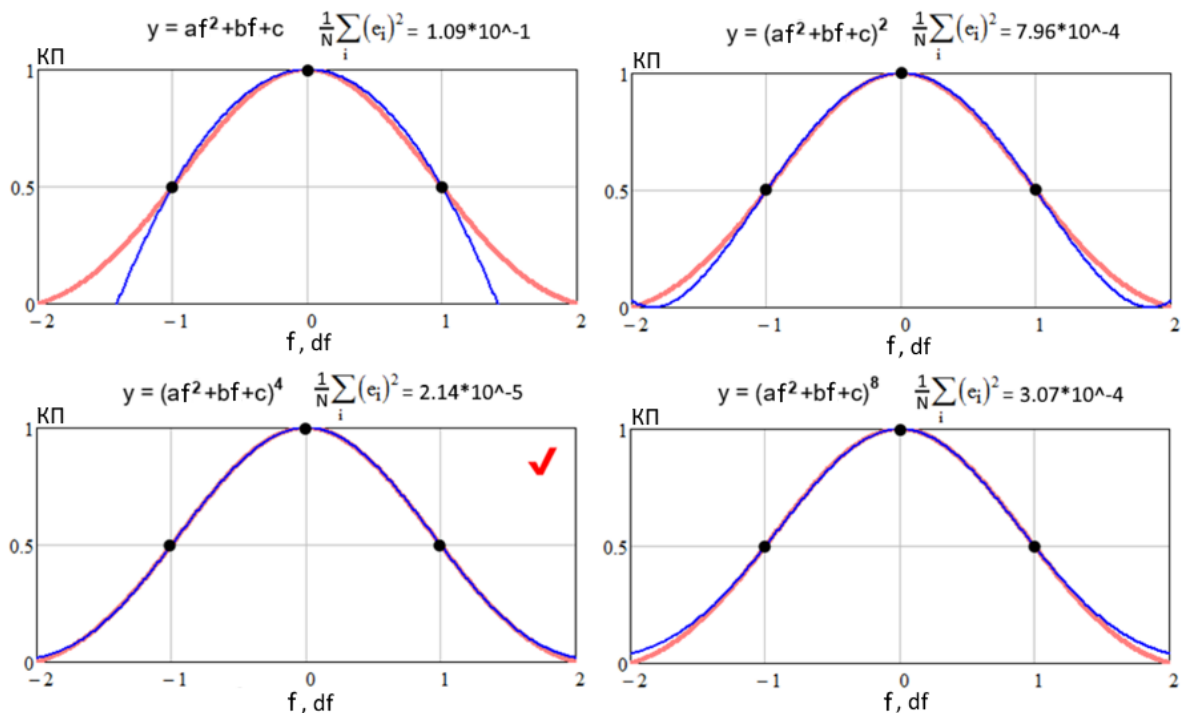
Аналіз наведених на рисунку 3.8 даних свідчить, що в основну пелюстку потрапляє 4 спектральних відліку гармоніки, причому рівень 4-го відліку може бути мінімум (при $F_g = 4.5$) на 14 дБ нижче, ніж максимальний.

При цьому розподіл спектральних відліків практично будь-якої роторної машини та аналіз спектрів, наведених у різних джерелах [12, 78] та отриманих в ході експериментів, свідчить, що відношення багатьох гармонік до фону менше 14 дБ, відповідно для аналізу часто доступні тільки 3 відліки, що значно перевищують фон.

Отже для відновлення форми гармоніки необхідно використовувати інтерполяційну функцію, яка повинна будуватися за трьома точками і з високою точністю описувати форму основної пелюстки АЧХ частотної смуги спектра при використанні вікна Хана.

Форма центральної пелюстки АЧХ частотної смуги спектра нагадує параболу, якій відповідає функція $y(f) = a_0 + a_1f + a_0f^2$, для знаходження коефіцієнтів a якої саме потрібно 3 точки.

Проте форма графіка параболи значно відхиляється від графіка АЧХ смуги спектра (рисунок 3.9). Так, якщо провести параболу через точки АЧХ основної пелюстки смуги спектру зі значеннями по осі абсцис -1,0,1, та оцінити середнє квадратичне відхилення (СКВ) отриманих графіків (у даному випадку по 500-х точках від значення -2 до 2 по осі абсцис), то отримаємо результат 1.09×10^{-1} , що свідчить про явну розбіжність графіків.



червоний колір – форма основної пелюстки АЧХ;

синій колір – різні інтерполяційні функції

Рисунок 3.9 – Пошук функції інтерполяції форми лінії за трьома точками

(Джерело: [12, 78])

Проаналізувавши функції типу $y(f) = (a_0 + a_1f + a_0f^2)^z$, де z – будь-яке число, проведене також через вказані точки, був зроблений висновок про те, що відповідним ступенем є $z=4$, який дає аналогічно отримане СКВ всього 2.14×10^{-5} (рис. 3.10).

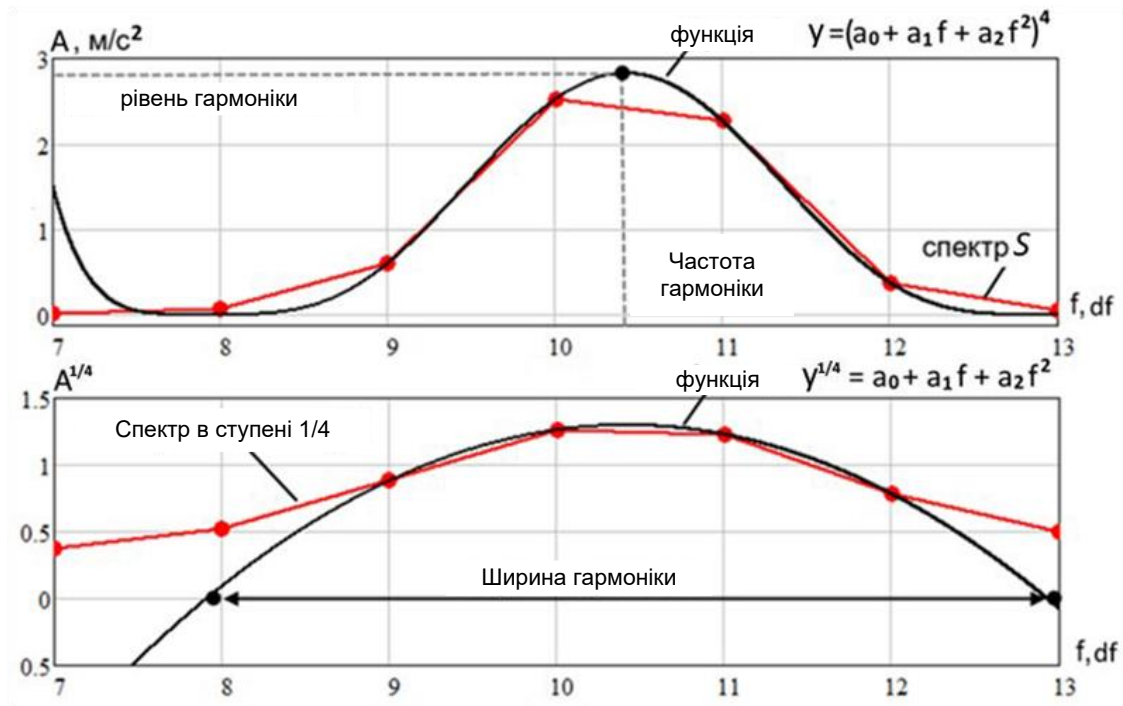


Рисунок 3.10 – Визначення частоти, рівня і ширини гармонійної складової
(Джерело: [12, 78])

Для знаходження рівня Ag та частоти Fg гармоніки використовуються координати вершини параболи $y(f) = (a_0 + a_1f + a_2f^2)^4$, що проходить через 3 сусідні точки спектру. Також пропонується проводити оцінку ширини гармоніки як відстані між точками перетину параболи (без зведення в ступінь 4) осі абсцис. При цьому доцільно використовувати відносну ширину Hg до ширини неспотвореної гармоніки приблизно дорівнює $5df$:

$$a_0 = Sp_i, \quad a_1 = 0.5(Sp_{i+1} - Sp_{i-1}), \quad a_2 = 0.5(Sp_{i+1} + Sp_{i-1}) - Sp_i;$$

$$Fg = \left(i - \frac{a_1}{2a_2}\right) df;$$

$$Hg = \frac{(a_1^2 - 4a_2)^{0.5}}{-5a_2}; \quad (3.1)$$

$$Ag = \left(\frac{-a_1^2}{4a_2} + a_0\right)^4,$$

де Sp – відліки у спектрі ступеня 1/4 такі, що $Sp_{i-1} < Sp_i < Sp_{i+1}$; a_0 , a_1 , a_2 – коефіцієнти апроксимуючого полінома.

Приклад обробки спектра запропонованим способом з урахуванням алгоритму розрахунку лінії фону та визначення відліків відповідних гармонік, наведених на рис. 3.3, наведений на рисунках 3.11, 3.12.

Червоним позначені точки, які відповідають рівням та частотам виділених гармонік, зеленим – лінія фону L , синім – лінія порога виявлення гармонік.

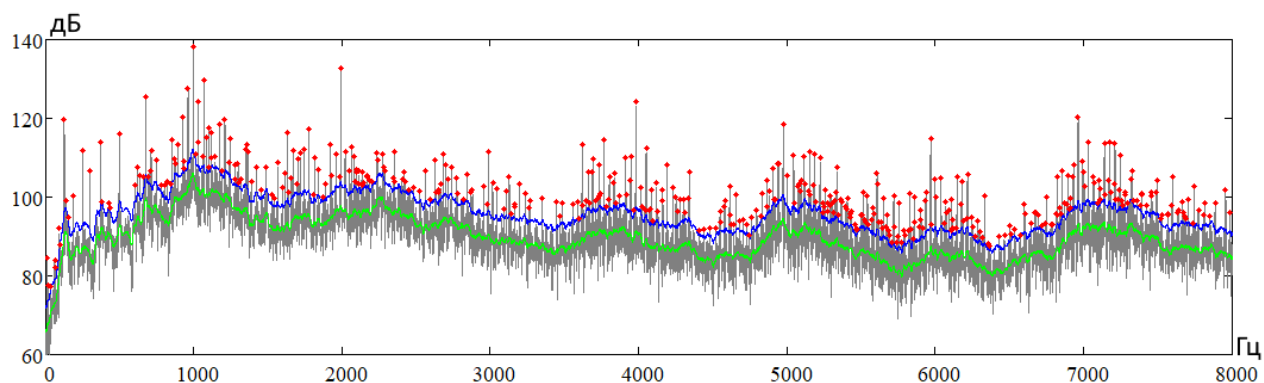


Рисунок 3.11 – Обробка спектру газової турбіни

(Джерело: розроблено автором)

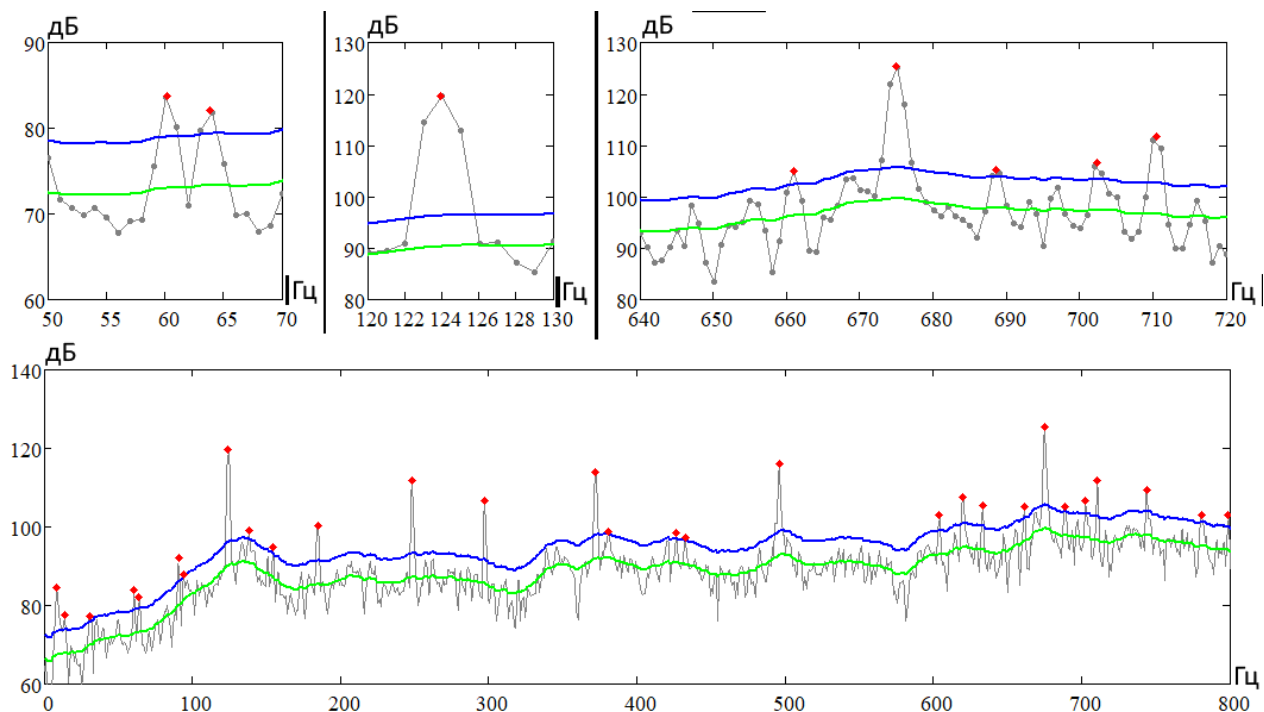


Рисунок 3.12 – Обробка спектру газової турбіни, детально

(Джерело: розроблено автором)

Відносна ширина гармонік Hg може бути використана для оцінки нестабільності частоти обертання, при якій гармоніки розширюються тим більше, чим вище їх частота, а також для виявлення недозволених гармонік в стабільному за частотою стані. Так, на рис. 3.13 наведено графіки залежності Hg від частоти гармонік спектру того ж агрегату, для якого наводилися вищі спектри. Синім наведено графік для стабільної частоти обертання, червоним – для нестабільної (зміна частоти приблизно 0,1%).

Можливий спосіб визначення нестабільності – поріг на нахил лінійного тренду $Hg (Fg)$. Величину Hg пропонується також використовувати для корекції рівня гармонійної складової при виявленні нестабільного за частотою стану:

$$Ag = \left(\frac{-a_1^2}{4 a_2} + a_0 \right)^4 ;$$

$$Hg = \frac{3(N_f - 1)}{-5N_f},$$
(3.2)

де N_f – відношення Sp_i , до відповідного значення лінії фронту L_i , яка розрахована за алгоритмом, наведеним у п. 3.1.2.

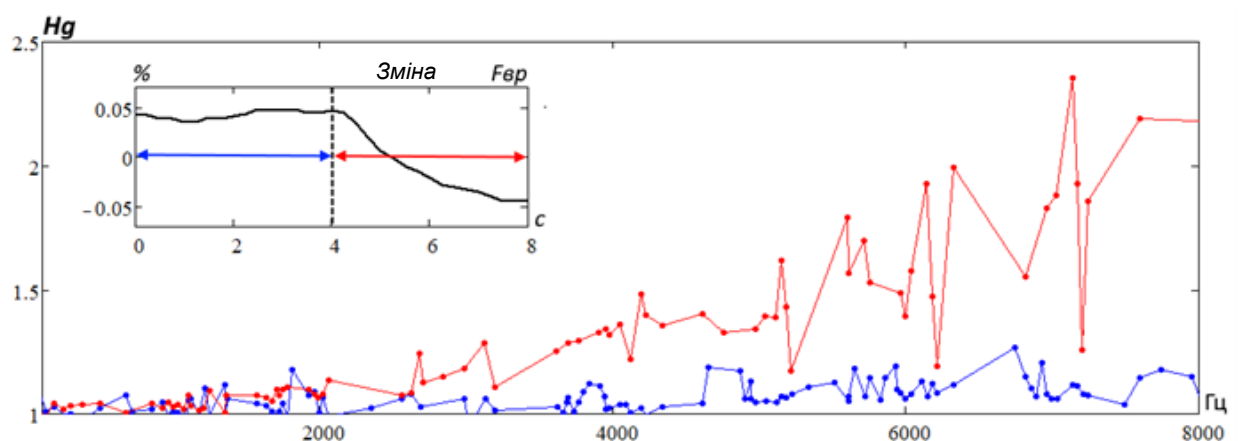
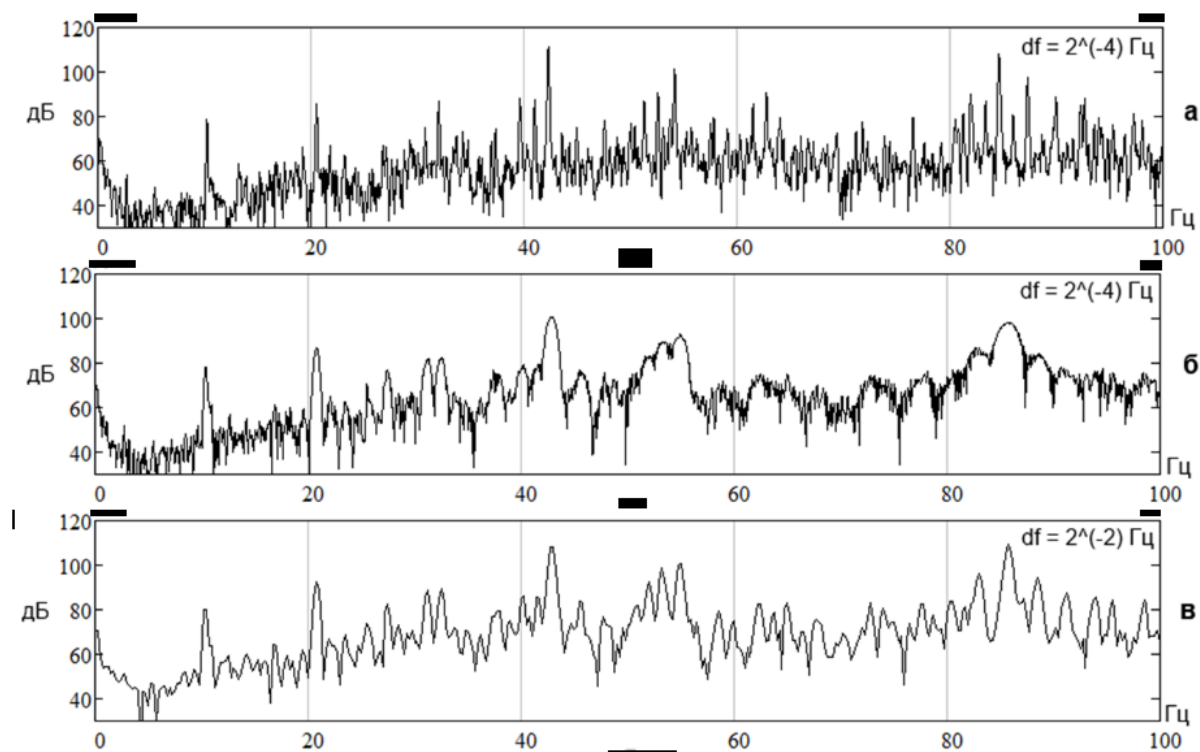


Рисунок 3.13 – Залежність Hg від частоти гармонійних складових за різної стабільності частоти обертання $F_{обер}$

(Джерело: розроблено автором)

На форму гармонійної складової у спектрі значно впливає нестабільність частоти обертання. Проведений аналіз спектрів, вимірюваних у перехідних режимах, свідчить, що при значній (більш df) зміні частоти гармонійної компоненти за час вимірювання спектра потужність гармоніки починає розподілятися за сусідніми спектральними відліками та інформація про її параметри, спотворюється (рисунок 3.14).



- а) при стабільній частоті обертання і $df = 2^{-4}$ Гц;
 б) при нестабільній частоті $df = 2^{-4}$ Гц;
 в) при нестабільній частоті обертання і $df = 2^{-2}$ Гц;
 спектри б) та в) виміряні в один момент часу

Рисунок 3.14 – Спектри вібрації планетарного суднового редуктора
 (Джерело: розроблено автором за матеріалами [4])

Ця проблема може бути вирішена за допомогою обчислення порядкового або синхронного спектра [4]. Однак, як було зазначено в розділі 1, при такому підході частотні складові спектра, не пов'язані лінійно з частотною обертання валу, можуть спотворюватися, їх потужність може розподілятися за значною кількістю відліків спектра (розмазуватися), призводячи до спотворення фону спектра, який також несе інформацію.

Також ключовою вимогою для побудови синхронного спектра є наявність датчика обертів, проте для багатьох судових агрегатів, датчик обертів не передбачений і встановити його неможливо. Тому необхідно розробити альтернативний підхід, що дозволяє проводити обробку спектрів за умов нестабільності частоти обертання.

Виходячи зі сказаного вище, проблему ідентифікації гармонік при нестабільності частоти обертання пропонується вирішувати не тільки шляхом підвищення точності ідентифікації параметрів гармонік конкретного спектра, але й за рахунок зменшення часу вимірювання і, відповідно, погіршення частотного дозволу зі зростанням аналізованої частотної області.

Щільність сильних гармонійних складових вище в низькочастотній частині спектру вібрації типової роторної машини і падає зі зростанням частоти. Тому і високу роздільну здатність актуально застосовувати тільки для обмеженого частотного діапазону, де й абсолютна зміна частот гармонічних складових за умов нестабільності обертання ротора нижча.

Гармоніки на високих частотах при нестабільній частоті обертання доцільно ідентифікувати по спектру з невеликим часом вимірювання і, відповідно, з невисокою частотною роздільною здатністю. Тому пропонується вимірювати кілька спектрів в одній точці і в той же час з різною частотною роздільною здатністю і поєднувати результати їх обробки.

За результатами проведеного тестування програмного модуля, що реалізує запропонований принцип, на спектрах сигналів реального обладнання доведено про достатність використання до трьох спектрів з різною частотною роздільною здатністю та різною граничною частотою.

Кратність граничних частот та частотних розрізнянь сусідніх за роздільною здатністю спектрів можна обмежити числом 4 залежно від частотного діапазону та характеру очікуваної нестабільності частоти обертання. За спектром з високою частотною роздільною здатністю і, відповідно, що вимагає максимального часу вимірювання, визначаються параметри низькочастотних гармонік, за спектром з проміжним частотним

роздільною здатністю – параметри середньочастотних гармонік, а за спектром з низьким частотним розрізнянням параметри височастотних гармонік з видаленням їх з відповідних спектрів для оцінки випадкових компонент. Виходячи з описаного принципу обробки спектрів, виміряних одночасно, на рис. 3.15 наведено блок-схему алгоритму автоматичної обробки вузькосмугових спектрів.

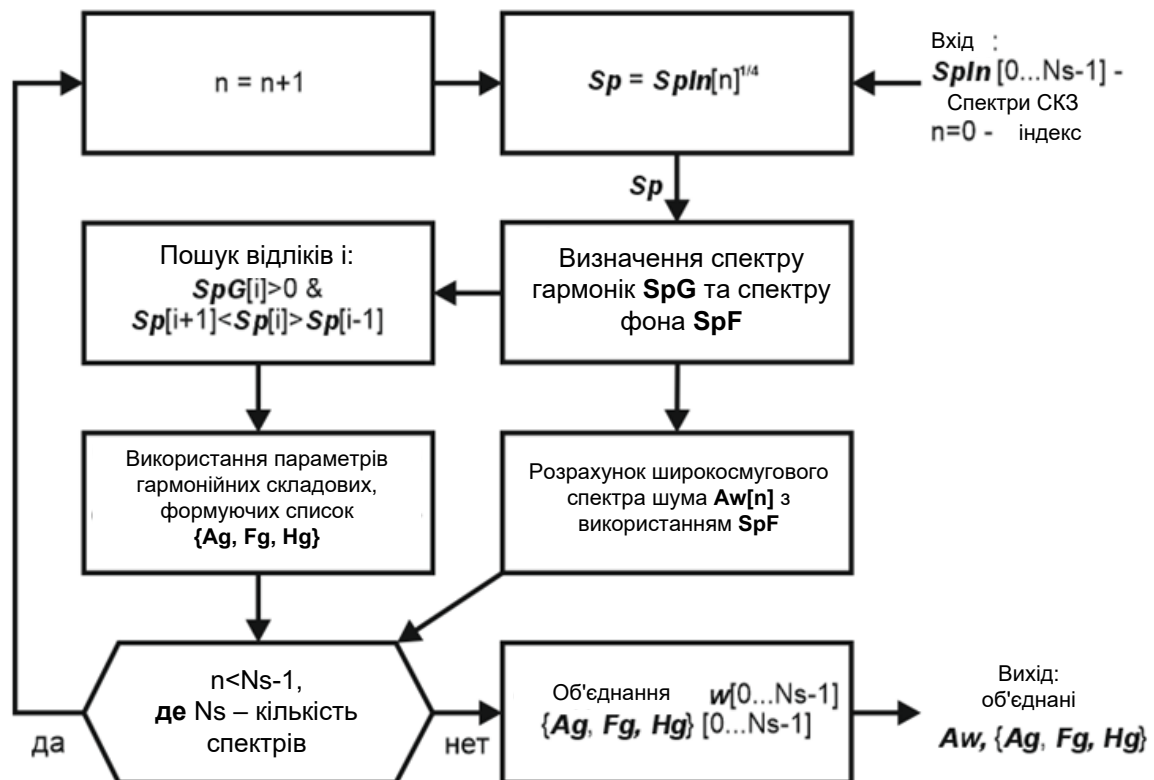


Рисунок 3.15 – Блок схема алгоритму обробки вузькосмугових спектрів
(Джерело: розроблено автором)

Обробка кожного спектра з вхідних $SpIn$, виміряних одночасно, проводиться за допомогою запропонованого раніше алгоритму з розділення спектра на дві частини – спектрів гармонічних SpG і випадкових SpF компонентів. За спектром гармонічних компонентів проводиться визначення параметрів кожної гармоніки. Наведений до потужності спектр випадкових компонентів використовується для побудови широкосмугового спектру фону Aw за допомогою накладання вагових частотних вікон за формулою (3.2), оптимальне використання 1/3 октавних частотних смуг.

Далі відбувається об'єднання знайдених гармонійних та широкосмугових складових по всіх спектрах: з низькочастотного спектру беруться всі отримані складові, з наступного спектра (з більшою граничною частотою) – тільки граничні частоти першого спектру, і т. д.:

$$A[j] = \sqrt{\sum_{i=i_1}^{i_2} SpF_i^8 * W[j]_{i-i_1}}, \quad (3.3)$$

де j – індекс 1/3-октавної смуги; i_1, i_2 – початковий та кінцевий індекс відліку вузькосмугового спектру фону SpF для накладання вагового вікна W , форма вагових вікон має відповідати вимогам ДСТУ 17168-82.

Розглянутий метод автоматичної обробки спектрів з метою виділення компонентів різної природи відповідає сформульованим вимогам, оскільки вирішує задачу ідентифікації як гармонійних, так і випадкових компонентів в умовах нестабільності частоти обертання, характерної для суднових умов, без використання синхронної з обертанням валу вибірки.

Наступні результати аналізу можуть бути використані для знаходження гармонійних рядів, головною умовою яких є кратність всіх гармонік одній певній базовій частоті.

Таким чином, удосконалено метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів, який, на відміну від існуючих, використовує одночасно виміряні в одній точці спектри з різною частотною роздільною здатністю для мінімізації спотворень форми гармонійних складових при нестабільності їх параметрів.

Кожен спектр обробляється з метою визначення параметрів компонентів різної природи з подальшим поєднанням отриманих результатів. Суттєво перевищують побудовану згладжену лінію фону спектральні відліки, що характеризують гармонійні компоненти, наводяться до рівня даної лінії для отримання спектра випадкових компонентів, який за допомогою

накладання вагових частотних вікон перетворюється на широкосмуговий спектр, що використовується для діагностики елементів ГЕУ за силами тертя та пульсація потоку.

За вихідними величинами наведених до лінії фону відліків визначаються частоти та рівні гармонійних компонентів за допомогою оцінки форми їх розподілу інтерполяційним способом, використовуючи параболічну функцію в четвертому ступені, побудовану за трьома точками поблизу вершини гармоніки, що дозволяє також врахувати розширення гармонік, виявити недозволені гармоніки ступеня нестабільності частоти обертання.

Удосконалений метод дозволяє підвищити точність визначення параметрів слабких гармонійних компонентів, які можуть характеризувати вид та ступінь розвитку небезпечних дефектів в умовах характерної для суднових умов нестабільності частоти обертання без необхідності використання синхронної з положенням валу вибірки, неефективною або недоступною для багатьох суднових машин.

3.2 Розроблення методу автоматичної адаптації порогових значень вібродіагностики

3.2.1 Обґрунтування структури методу

Аналіз способів визначення діагностично значущих змін вібрації обладнання, проведений у розділі 1, свідчить про необхідність розробки методу визначення порогових значень обладнання, специфіка роботи якого пов'язана з природними перехідними процесами різної тривалості.

Перехідний процес – це процес зміни параметра від одного встановленого значення до іншого, який може характеризуватись тривалістю та швидкістю зміни (постійний час). Але значень, що встановилися, може і не бути, як у випадку температури зовнішнього середовища, яка постійно

змінюється. Багаторічний досвід аналізу вібрації обладнання в процесі експлуатації та різні джерела, у т. ч. державні стандарти, свідчать, що флуктуації віброактивності машин та обладнання часто не є випадковими, зміни можуть мати монотонний різноспрямований характер навіть у режимах роботи, що встановилися, що викликано різними змінами (рис. 3.16):

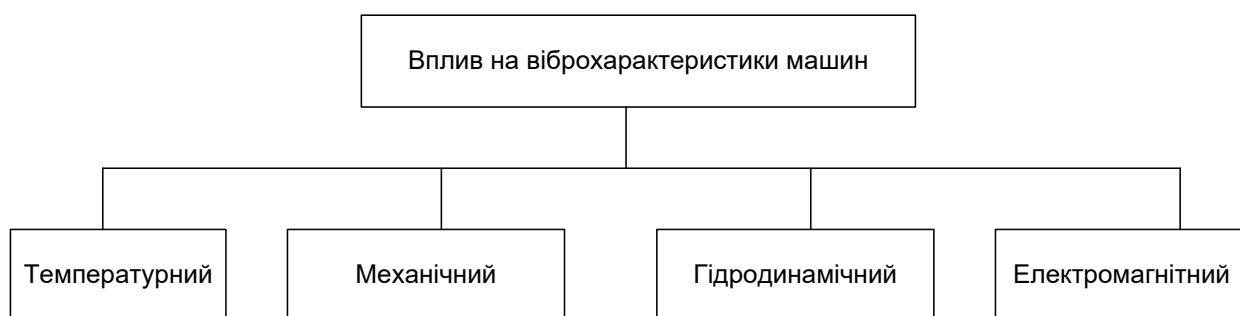


Рисунок 3.16 – Класифікація впливу на віброхарактеристики машин
(Джерело: розроблено автором)

- температурний (прогрів машини, коливання температури навколишнього або робочого середовища);
- механічний (коливання навантаження, у тому числі через хитавицю);
- гідродинамічний (зміни параметрів потоку);
- електромагнітний (коливання параметрів мережі живлення).

Робота конкретного агрегату може супроводжуватися декількома подібними природними явищами, які можуть призводити до монотонних змін величин діагностичних вібраційних параметрів, значно відмінних від їх випадкових флуктуацій [76]. Причому кожне з подібних явищ характеризується діапазоном зміни фактору, що впливає на вібрацію. Так, при пуску та прогріві температура елементів справної роторної машини піднімається до деякого певного значення, яке також залежить від температури навколишнього і робочого середовища, а діапазон змін навантаження визначається технологічним процесом і властивостями агрегату. Вплив хитавиці визначається її допустимими кутами.

Більшість природних фізичних процесів, таких як прогрів або деградація,

змінюється експоненційно і також призводить до експоненційних змін вібраційних параметрів. Часто зміни відбуваються стрибкоподібно або лінійно, рідше – за іншими законами, що призводить до аналогічних змін вібраційних параметрів. Деградація також може відбуватися стрибкоподібно при зовнішній дії, такої як порушення технологічного процесу, аварії даного чи пов'язаного агрегату (загальним технологічним процесом та іншими видами зв'язків).

Перехідний процес складної форми можна представити сукупністю перехідних процесів, кожен із яких наближено описується певною типовою функцією (пряма, експонента та інші). У свою чергу, кожен з таких простих перехідних процесів пов'язаний зі зміною одного з факторів, що впливають. Головним завданням при аналізі вібраційних параметрів під час природних перехідних процесів є виділення й обробка даних перехідних процесів змін, пов'язаних з деградацією технічного стану.

Традиційним методом побудови порогових значень параметрів, відповідно до стандартів вібродіагностики, є визначення базового значення як середнього з оцінкою розкиду значень у стабільному режимі роботи об'єкта, використовуючи дані, отримані за кілька послідовних вимірювань через значні проміжки часу [38].

Також у стандартах рекомендується визначати різні базові значення різних можливих значень робочих характеристик [45], поділяючи, таким чином, контроль у різних режимах. Однак на практиці ця вимога є складною, оскільки контроль зміни всіх впливових показників є проблематичним, а набір режимів може бути досить великим. Це викликано тим, що доводиться враховувати різні комбінації факторів, які впливають на дослідження.

Тому зазвичай виділяють обмежену кількість режимів, як правило, за частотою, навантаженням (споживаним струмом) або іншим найбільш значущим для віброактивності об'єкта параметром при можливості їх контролю. При цьому як базове значення для кожного режиму встановлюється середнє, а пороги враховують максимальний розкид за час спостереження, що охоплює найтриваліші монотонні різноспрямовані зміни [11].

Якщо за час спостереження виявляється лише одна тенденція і є ознаки конкретних дефектів, це інтерпретується як деградація. Такий спосіб можна назвати стандартним, оскільки він є найбільш застосовним на практиці та відповідає ряду стандартів у галузі моніторингу та діагностики з вібрації [20, 36, 45]. При цьому навіть у межах одного виділеного режиму можуть бути суттєві флуктуації віброактивності через зміни різних факторів, які, як було наведено раніше, можуть призводити до недостовірної ідентифікації стану обладнання залежно від того, де знаходиться контрольований параметр щодо інтервалу природних змін під час початку деградації, і від того яка швидкість деградації має місце.

Як приклад таких змін розглянемо часовий тренд рівня гармоніки з частотою обертання газової турбіни, у складі турбогенератора (рис. 3.17).

На графіку видно значні зміни параметра за період 15 днів. При цьому на їх фоні присутні менші флуктуації, пов'язані з добовими змінами навантаження на даний агрегат. А більш ранні дані свідчать про те, що дані флуктуації є природними, мають різноспрямований циклічний характер і пов'язані з температурними деформаціями опор та фундаменту.

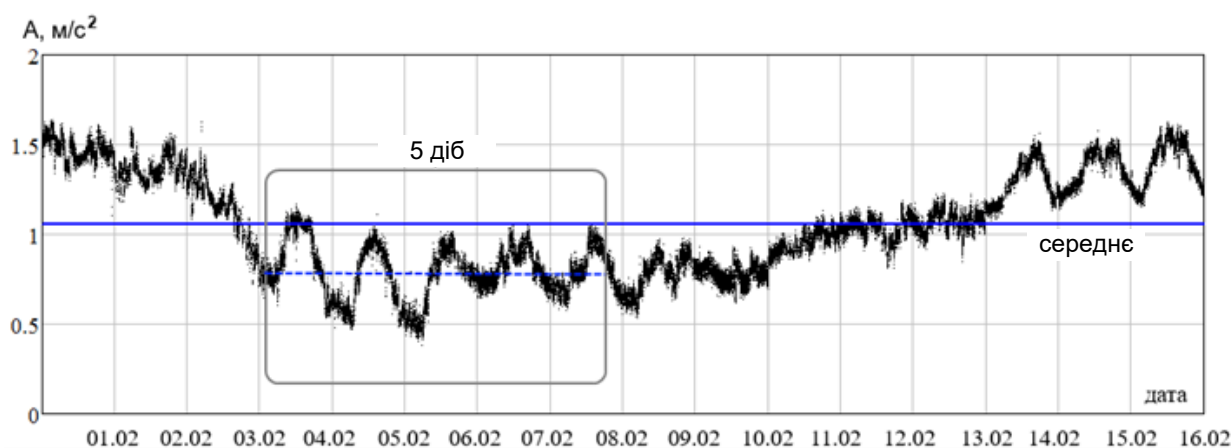


Рисунок 3.17 – Графік зміни рівня гармоніки на частоті обертання газової турбіни

(Джерело: розроблено автором)

Наведені на графіку (рис. 3.17) значення свідчать, що в інтервал кілька годин природні коливання параметрів складають $0,2 \text{ м/с}^2$, протягом кількох діб – $0,5 \text{ м/с}^2$, половину місяця – 1 м/с^2 . Тому, при підтвердженні рівнів даних флуктуацій за тривалий час швидка зміна параметра більш ніж на $0,5 \text{ м/с}^2$ за кілька годин буде свідчити про зміну стану обладнання або нетиповий режим, що вимагає уваги.

Підтвердити одну з гіпотез можна двома способами:

- 1) виявити чи є порушення в технологічному процесі та усунути їх;
- 2) провести діагностування виявлення ознак конкретних дефектів, що характеризуються виявленням нетиповим зростанням параметрів.

Таким чином, основою контролю технічного стану може бути статистична оцінка типових змін для виявлення нетипового зростання діагностичних параметрів. Оцінка швидкості зростання як діагностичний параметр пропонувалася і раніше, наприклад [74]. Але запропонований підхід не дозволяє оцінювати швидкості типових перехідних процесів, що не дає можливості реагувати на нетипові, повільні зміни, пов'язані з деградацією.

Для врахування змін з різними швидкостями слід оцінювати флуктуації параметрів на різних за довжиною часових інтервалах за набраною статистикою. При цьому пороги на певну величину зростання за конкретний часовий інтервал необхідно встановлювати з урахуванням оцінки статистики типових змін, що спостерігалися раніше, на даному інтервалі за час, мінімум на порядок довше часового відрізка, що розглядається.

Застосування цього підходу можна показати на прикладі. На рис. 3.18 наведено дві часові ділянки $dT1$ та $dT2$ з характерними інтервалами змін параметра $K1$ та $K2$ відповідно, пороги на інтервалі $dT2$ відповідають порогам, визначених за допомогою стандартного підходу.

Побудувавши на $dT1$ базове значення $B1$, відповідне нижньому рівню значень параметра, і відклавши від нього пороги, що відповідають максимальному інтервалу флуктуацій $K1$ (позначений зеленими лініями), що спостерігаються, можна виявити зміну стану в точці $P1$.

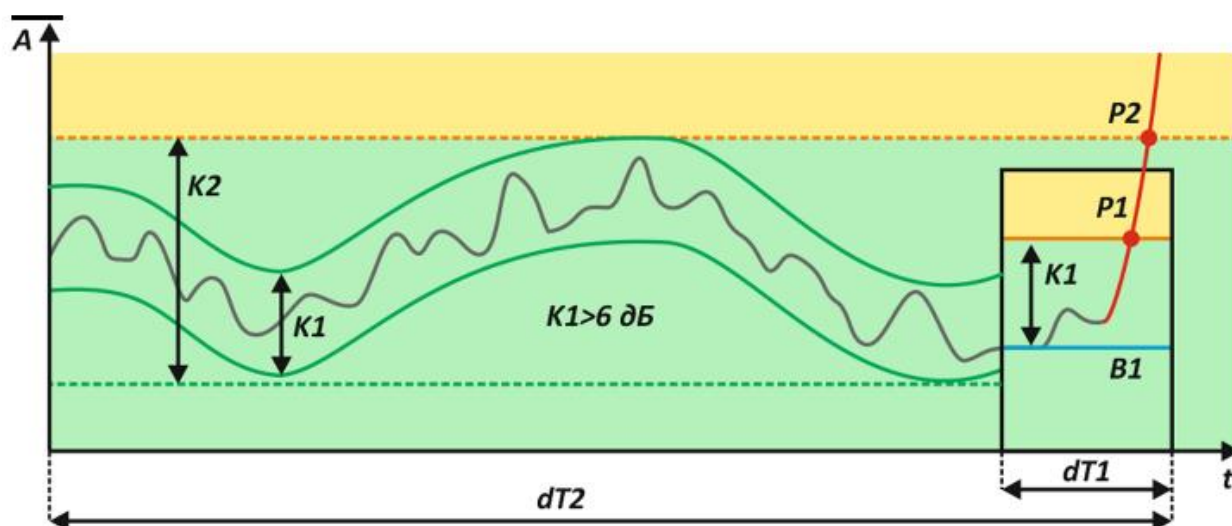


Рисунок 3.18 – Виявлення вимірювання стану з оцінкою зростання на інтервалах із різною тривалістю (Джерело: розроблено автором)

Точка $P2$ відповідає моменту виявлення зміни стану з порогом за рівнем максимальних флуктуацій сигналу $K2$ та запізнюється щодо $P2$. Спосіб реалізації цього принципу описаний нижче.

3.2.2 Алгоритм накопичення діагностичних параметрів

Для реалізації запропонованого підходу пропонується метод адаптації порогових значень, який здійснюється за допомогою організації накопичення діагностичних параметрів у кількох кільцевих буферах (накопичувачах результатів вимірювань).

У кожному буфері з заданою періодичністю (типова періодичність – половина довжини буфера) обчислюється середнє значення та інтервал зміни параметра й передається до наступного, більшого за тривалістю буфера. За рахунок усереднення відбувається згладжування несуттєвих для конкретного інтервалу часу флуктуацій, при цьому необхідна для аналізу форма тренду зберігається. Буфери організовані в такий спосіб: дані приймаються по мірі їх заповнення; після заповнення буфера для прийому нового елемента найстаріший видаляється.

Буфери індексуються від 0, в якому знаходяться вихідні дані,

індексація наступних – збільшується протягом зростання інтервалу згладжування та часового інтервалу оцінки. Базове значення даних, накопичених у поточний буфер, пропонується визначати за оцінкою нижньої межі інтервалу змін наступного буфера.

Пороги, що відраховуються від базового значення, пропонується визначати за статистичною оцінкою інтервалів зміни величини параметра на часових відрізках поточного та наступного буфера для мінімізації затримки, що з'являється при згладжуванні даних.

Останній буфер (архів) повинен накопичувати згладжені за попереднім буфером дані вимірювань за весь час спостереження. Самі значення порогів (відраховуються від базового значення) для накопичувача, крім останнього, визначаються з урахуванням величин природних флуктуацій параметра, визначених в ході набору статистики.

Способи побудови порогових значень та прогнозування часу їх досягнення наводяться нижче. Підхід з оцінки величин флуктуацій на різних часових інтервалах, як і стандартний, що використовує міру розкиду на всьому інтервалі оцінки, має недолік, пов'язаний із запізненням або відсутністю реакції на монотонне повільне зростання параметра, викликане деградацією, що з'явилася до початку накопичення статистики. Отже для останнього накопичувача (архіву), доцільно встановлювати поріг на задане число дБ (типове значення - 10 дБ для порога попередження) від базового значення, визначеного в цьому ж накопичувачі. Дані пороги, отримані для архіву, має сенс використовувати і для попереднього накопичувача, якщо обладнання до початку збору статистики давно перебуває в експлуатації.

На рис. 3.19 наведено блок-схему алгоритму накопичення даних для реалізації методу адаптації порогових значень. Кожен буфер часового інтервалу $Buf(i)$, де i – індекс буфера ($i=0$ – буфер з вихідними даними), містить $L(i)$ елементів, кожен з яких є сукупністю трьох значень: дати-часу d , поточних значень рівня параметра M і значень інтервалів його змін K . Для ініціації передачі кожного накопичувача використовується лічильник $C(i)$,

який на початку дорівнює нулю і збільшується на одиницю при отриманні нового елемента (d, M, K) . При досягненні лічильником заданого значення $T(i)$ ініціюється передача елементів наступного буфера.

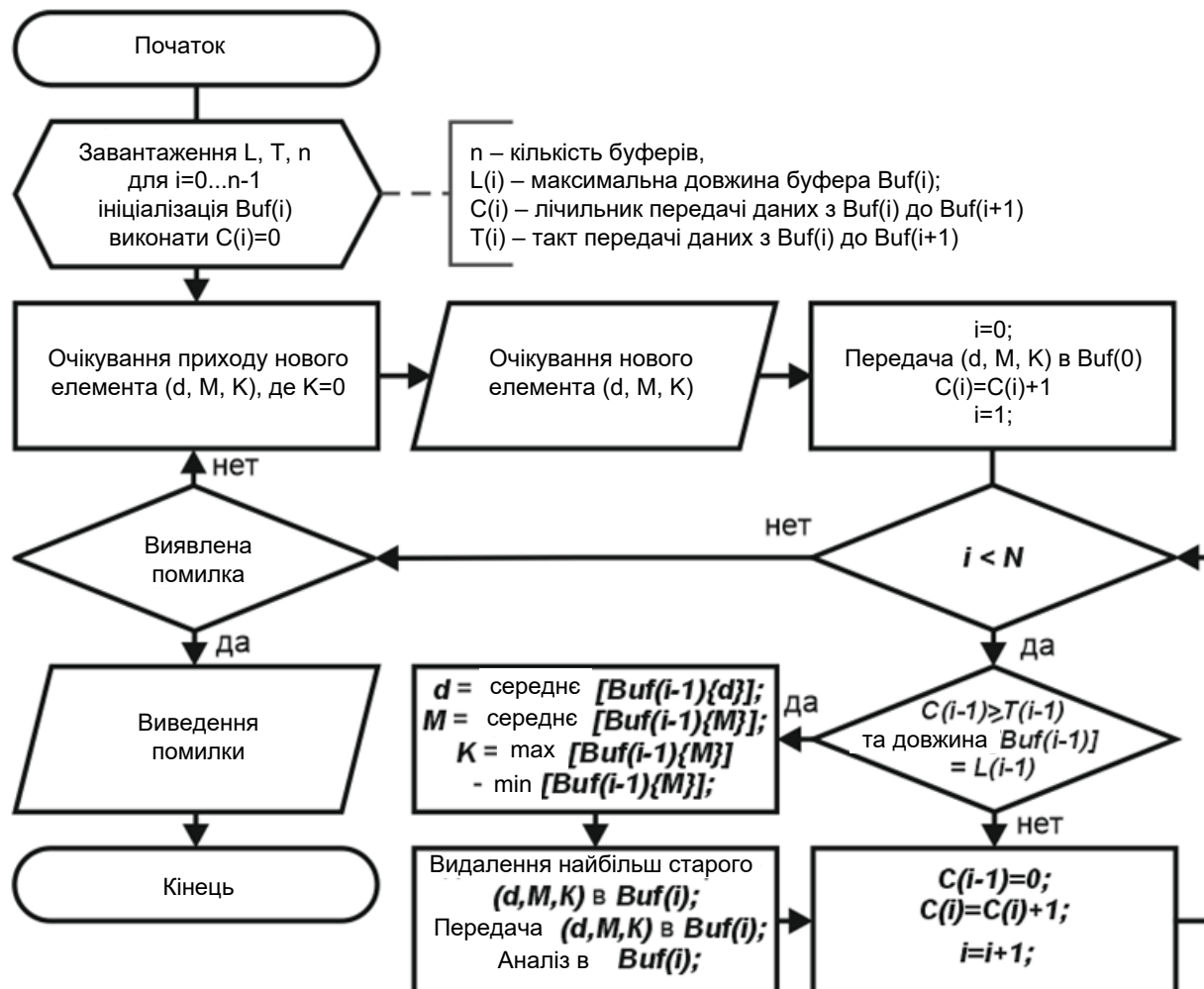


Рисунок 3.19 – Блок-схема алгоритму організації накопичення даних
(Джерело: розроблено автором)

Дата-час d та значення елемента параметра M переданого наступного буфера елемента відповідають середнім значенням відповідних параметрів поточного буфера (з якого здійснюється передача). Значення елемента K визначається як різницю максимального та мінімального значення елементів M поточного буфера. Передача елемента (d, M, K) у $Buf(i)$ відбувається тільки після повного заповнення $Buf(i-1)$.

Насправді виникає завдання збереження окремих значень, які

випадають за статистичні пороги, для можливості експертної оцінки. Для цього пропонується організовувати окремий архів, в якому зберігаються дані при виникненні події (перевищення порогового значення одним або декількома параметрами). При цьому доцільно зберігати в архіві частину даних до події та після події, а також розраховані на момент події пороги.

3.2.3 Визначення порогових значень та прогноз моменту їх досягнення

Найчастіше при автоматичній обробці часових рядів для апроксимації даних на якомусь конкретному часовому інтервалі використовується спосіб підбору найбільш підходящої за вибраним критерієм функції деякого переліку (екстраполяційний метод прогнозування).

У якості подібних критеріїв можуть використовуватися коефіцієнт кореляції, середнє квадратичне відхилення, критерій Фішера та інші критерії [38]. При цьому більшість розробників за замовчуванням виходить з того, що на всьому аналізованому інтервалі є одна основна тенденція, описати яку можна якоюсь однією обраною функцією.

Однак, як видно з рис. 3.18, картина на інтервалі, що розглядається, може складатися з різних тенденцій, які можуть мати різні характеристики, такі як нахил, розкид інше, тому важливим завданням є не тільки підбір апроксимуючої функції, а й визначення інтервалу для її побудови. Як правило, експерт у галузі діагностики у разі візуального аналізу часового тренду для розрахунку базових значень та отримання прогнозу діятиме так.

Він розбиває весь аналізований інтервал на ділянки, що відрізняються формою, нахилом, розкидом або іншими ознаками. Далі виділяє з таких ділянок тенденції, що характеризують бездефектний стан, тобто оцінює базове значення, а апроксимацію даних для прогнозу проводить за останньою ділянкою, якщо в ньому мають місце невідповідні зміни, що спостерігалися раніше. Автоматична обробка даних у кожному накопичувачі відбувається за

аналогічним принципом: для прогнозування має використовуватися остання тенденція. Досвід показує, що для даних у логарифмічних одиницях частіше всього достатньо лінійної апроксимації, оскільки вона відповідає експоненті, яка добре описує перебіг природних фізичних процесів деградації [4].

Точніший прогноз може бути отриманий з використанням інших функцій, тим більше що спосіб прогнозування повинен бути універсальним, і застосовним до параметрів лінійних одиниць.

Це дозволяє показати покроковий алгоритм побудови порогових значень для визначення зон стану та прогнозування їх зміни з урахуванням сформульованого вище принципу оцінки типових змін на інтервалах різної тривалості. В алгоритмі використовуються позначення буферів й елементів, що входять до них, відповідно до наведеного в попередньому пункті алгоритму організації накопичення даних.

1. Аналіз даних щодо визначення зон стану та прогнозу їх зміни здійснюється у кожному буфері $B_{uf}(i)$ через задану періодичність, мінімальна періодичність – при прийомі кожного нового значення. Обробка відбувається тільки при накопиченні в буфері необхідної для знаходження точки зміни тенденції послідовності даних з урахуванням сформульованих п. 6 даного алгоритму умов. До першого буфера повинні надходити вже перевірені дані, наприклад, сильні разові стрибки параметрів, які зазвичай викликані перешкодами або зовнішніми впливами, для виключення помилок.

2. За базове значення B приймається мінімальне середнє за заданим числом nB послідовних значень M параметра; кількість послідовних значень доцільно встановлювати, виходячи з вибраного розміру буфера $L(i)$ як деяку частку меншу за $1/4$. Базове значення характеризує нижню опорну межу для оцінки відносних змін у буфері.

3. Порогові значення R для буферів, крім двох останніх, визначаються за формулою (3.4), для передостаннього – за формулою (3.5) для логарифмічних одиниць, для лінійних одиниць використовується відповідний коефіцієнт G до базового значення B , для останнього буфера порогови не визначаються.

Принцип побудови порогів для одного буфера наведений на рис. 3.20.

$$R_i^p = B_{i+1} + 2^{p-1}H_{i+2} + 0.5H_{i+1}, \quad (3.4)$$

де i – індекси послідовних накопичувачів ($i=0$ – накопичувач із вихідними даними);

R_i^p – поріг для накопичувача з індексом i та ступенем небезпеки p (рівно 1 для порога попередження та 2 – для порога небезпека і т. д.);

B_i – базове значення у накопичувачі з індексом i ;

H_i – оцінка інтервалу флуктуацій у накопичувачі з індексом i , яка визначається за елементами K накопичувача $Buf(i)$ як сума середнього та трьох середньоквадратичних відхилень:

$$R_{N-1}^p = B_N + 2^{p-1}G, \quad (3.5)$$

де N – індекс останнього накопичувача;

G – задане перевищення дБ, що характеризує максимально можливий інтервал природних змін (типове значення - 10 дБ).

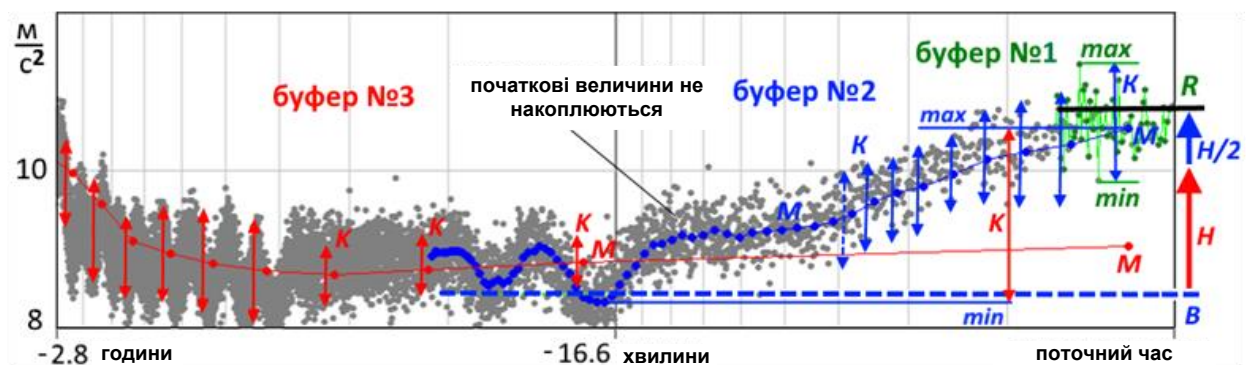


Рисунок 3.20 – Визначення порогового значення R у буфері №1

(Джерело: розроблено автором)

При використанні методу моніторингу стану обладнання, яке довго перебуває в експлуатації, в якому на момент початку накопичення статистики можуть йти процеси деградації, що викликають монотонне

зростання вібропараметрів, поріг для передостаннього накопичувача R_{N-1} необхідно застосовувати і для інших накопичувачів за принципом вибору меншого з двох.

Також у цьому випадку базове значення B_N у формулі (3.5) доцільно оцінювати відразу після отримання перших даних як їх середнє, доки не буде накопичено більш ніж nB значень.

4. Перевищення параметрів M , що надходить у накопичувач, порогового значення є подією щодо зміни зони стану за вказаним параметром. Зона стану використовується для визначення технічного стану агрегату та його діагностування.

5. Побудова лінії тренду відбувається за останньою тенденцією, яка знаходиться між точкою зміни тенденції та останнім прийнятим у буфер значенням. Точка зміни тенденції визначається так:

– визначаються параметри апроксимуючої функції за набором послідовних даних довжиною $h=h_0$ значень (h_0 – заданий початковий інтервал пошуку тенденції), остання точка якого відповідає кінцевій точці буфера;

– виконується екстраполяція до ряду попередніх точок, відповідно до налаштування заданих умов (див. нижче);

– отримані значення використовуються для виявлення точки зміни тенденції, яка вважається знайденою при виконанні хоча б однієї з умов:

а) поява точки перегину (рисунок 3.21, а), яка характеризується значним середнім відхиленням заданої кількості наступних точок від лінії тренду:

$$\left| \frac{1}{m_a} \sum_{i=k-h-m_a+1}^{k-h} (M_i - \hat{M}(d_i)) \right| > P_a \sigma; \quad (3.6)$$

б) зміна розкиду даних щодо лінії тренду (рисунок 3.21, б), що може характеризувати початок або кінець дії того чи іншого фактору впливу:

$$\frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{m_\sigma - r - 1} \sum_{i=k-h-m_\sigma+1}^{k-h} (M_i - \hat{M}(d_i))^2} > P_\sigma V \sigma; \quad (3.7)$$

$$V \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{m_\sigma - r - 1} \sum_{i=k-h-m_\sigma+1}^{k-h} (M_i - \hat{M}(d_i))^2} < \frac{1}{P_\sigma};$$

в) поява значного стрибка параметра вгору (рисунок 3.21, в), що свідчить про стрибкоподібні зміни в агрегаті:

$$\begin{aligned} & \left[(M_{k-h-m_\sigma+1} - \hat{M}(d_{k-h-m_\sigma+1})) > P_B \sigma \right] V; \\ & \left[(M_{k-h-m_\sigma+2} - \hat{M}(d_{k-h-m_\sigma+2})) > P_B \sigma \right] V \dots V; \\ & \left[(M_{k-h} - \hat{M}(d_{k-h})) > P_B \sigma \right]. \end{aligned} \quad (3.8)$$

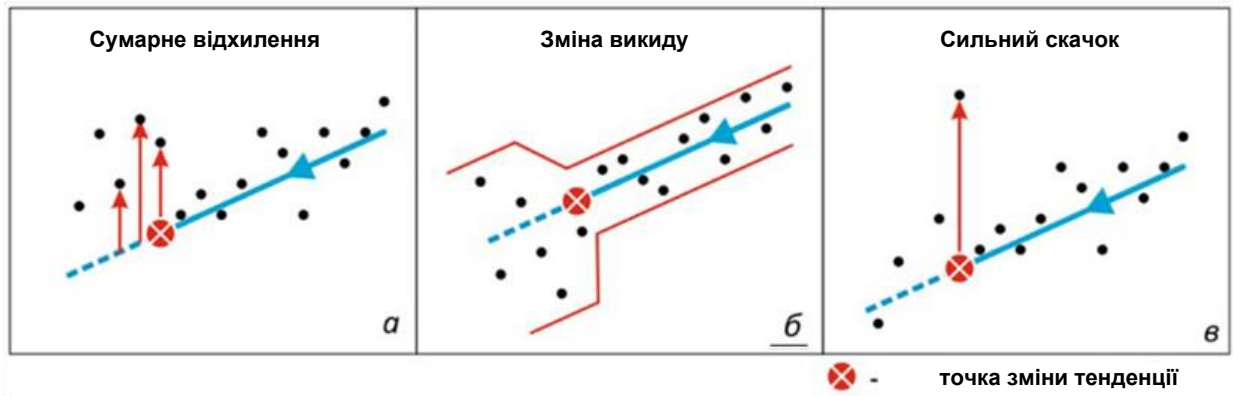


Рисунок 3.21 – Виявлення точки зміни тенденції

(Джерело: розроблено автором)

Для формул (3.6) – (3.8) σ – СКВ дорівнює

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{h - r - 1} \sum_{i=k-h+1}^k (M_i - \hat{M}(d_i))^2}, \quad (3.9)$$

де k – індекс останнього прийнятого в буфер значення M ;

h – кількість значень для побудови тренду;

$\hat{M}(d_i)$ – значення лінії тренду в точці d_i ;

m – кількість точок до інтервалу побудови тренду для оцінки за критерієм;

P – порогове значення критерію (значення P та m – різні для умов формул (3.6)-(3.8), що позначено підрядковим знаком (а, б, в);

r – порядок апроксимуючого полінома.

Якщо точка зміни тенденції не виявлена (жодна з умов не виконана), то відбувається додавання до сукупності даних довжиною h , за якими було побудовано початковий тренд попередніх h_s значень ($h = h + h_s$), і знову відбувається побудова тренду та перевірка умов зміни тенденції, доки умови не будуть виконані або доки не буде досягнуто кінця повного набору даних – тобто не буде побудовано тренд на всю довжину. Точка зміни тенденції вважається знайденою, якщо виконується хоча б одна з умов. Крок перерахунку тренду має бути малим і за умовчанням становить одне значення.

Отримана ділянка від точки зміни тенденції до останнього прийнятого значення використовується для прогнозування досягнення наступного порогового значення відповідно до наведеного способу. Прогноз, як і зона стану, використовується в алгоритмі автоматичного діагностування.

6. Вихідні дані аналізу кожного накопичувача можуть бути представлені в табличному (таблиця 3.1) та графічному (рис. 3.22) вигляді.

Запропонований метод для побудови та коригування (адаптації) порогових значень містить своєчасне визначення нетипового зростання параметрів на фоні природних перехідних процесів різної тривалості.

Спосіб є універсальним та простим у реалізації за рахунок застосування однакових алгоритмів обробки даних на різних часових інтервалах. Але він дозволяє вирішувати завдання мінімізації обсягу даних, які зберігаються, що важливо при створенні складних систем, що використовують великі обсяги діагностичної інформації високої періодичності.

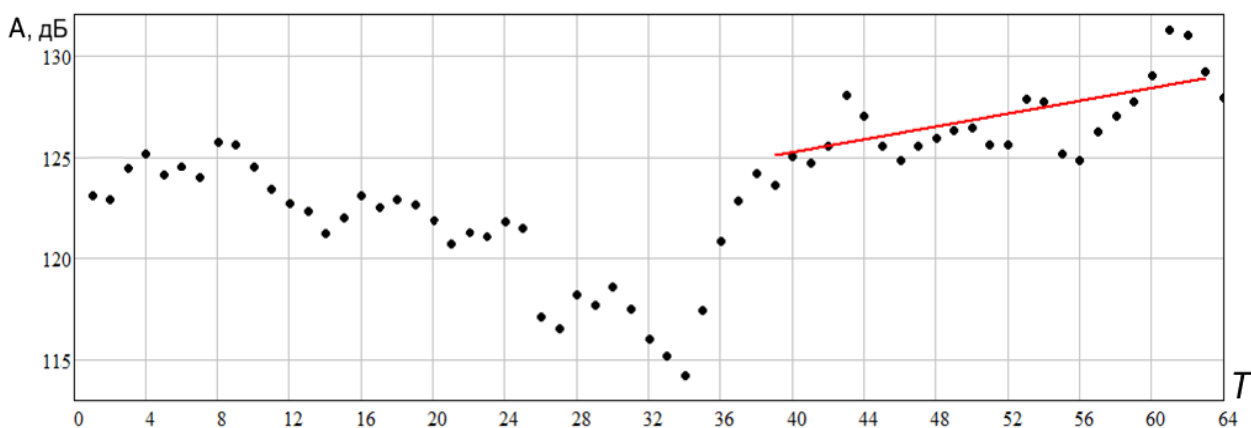


Рисунок 3.22 – Визначення тренду з ретроспективи загального рівня віброприскорення у смузі 10-1 000 Гц суднового насоса з періодичністю вимірювання 1 хвилина (Джерело: розроблено автором)

Таблиця 3.1 – Вихідні параметри (Джерело: розроблено автором)

Параметр	Значення
Точка зміни тенденції знайдена (умова)	так (перегин)
Номер початкового значення	40
Номер кінцевого значення	64
Початкове значення тренду	125,0 дБ
Кінцеве значення тренду	128,8 дБ
Значення порога	150,1 дБ
Чи перевищено поріг	ні
Прогноз досягнення порога (через)	70,39 відліків

3.2.4 Апроксимація часових рядів та оцінка тенденції до зростання

Для аналізу ретроспективи даних у кожному із накопичувачів необхідно визначити наявність тенденцій до зростання чи спаду значень параметра та прогнозування досягнення найгірших зон стану. Такий підхід є індивідуальним, оскільки оцінюється закон зміни конкретних параметрів конкретного об'єкта, а не зібрана статистика з великої кількості відмов однотипного обладнання [37].

Найчастіше природні деградації відбуваються за експонентою, тобто зі швидкістю пропорційною значенню самої величини. Оскільки в

логарифмічних одиницях (децибелах) експонента є прямою лінією, у багатьох випадках буває достатнім апроксимувати значення вібраційних параметрів, представлених у децибелах, використовуючи лінійну залежність. Проте, залежність може мати складнішу форму, наприклад, якщо експоненційне зростання чи спад відбувається щодо певної константи.

Отже для отримання більш точного прогнозу рішення прийнято використовувати ступінь апроксимуючого полінома до 2. Тоді, позначивши дата-час d як x , а величину параметра M – як y , завдання апроксимації зводиться до визначення коефіцієнтів апроксимуючої функції:

$$\hat{y}(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (3.10)$$

Ефективним способом вибору достатнього ступеня полінома i , відповідно, оцінки наявності значущої тенденції до зростання є критерій Фішера, який забезпечує статистичну оцінку значущості коефіцієнтів апроксимуючої функції вигляду (3.10) при її поданні у вигляді лінійної комбінації ортонормованих поліномів Q :

$$Q_j(x) = q_{j0} + q_{j1}x + \dots + q_{jj}x^j; \quad (3.11)$$

$$\psi(x, \omega) = \omega_0 Q_0(x) + \omega_1 Q_1(x) + \omega_2 Q_2(x). \quad (3.12)$$

Для полінома ступеня 0 приймається:

$$Q_0(x) = \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (3.13)$$

Для обчислення значень поліномів наступних ступенів у точках відповідних аргументів значень параметра використовується рекурентне співвідношення Форсайта [17]:

$$\begin{cases} Q_{r+1}(x) = [xQ_r(x) - \alpha Q_r(x) - \beta Q_{r-1}(x)]\lambda; \\ a = \sum_{i=1}^n x_i Q_r(x_i); \\ \beta = \sum_{i=1}^n x_i Q_r(x_i) Q_{r-1}(x_i). \end{cases} \quad (3.14)$$

Оскільки використовуються ортонормовані поліноми, константа розраховується виходячи з умови:

$$\sum_i Q_j^2(x_i) = 1. \quad (3.15)$$

При цьому маємо:

$$\begin{cases} \omega_{r+1} = \sum_{i=1}^n y_i Q_{r+1}(x_i); \\ R_{r+1} = R_r - \omega_{r+1}^2; \\ \sigma_{r+1}^2 = \frac{R_{r+1}}{n - (r + 1) - 1}, \end{cases} \quad (3.16)$$

де ω – коефіцієнт при поліномі;

R – залишкова сума квадратів;

n – кількість аргументів;

σ – розкид даних відносно полінома.

При цьому апроксимуючий поліном ступеня r матиме вигляд:

$$\hat{y}_r = \sum_{j=0}^r \omega_j Q_j(x), \quad (3.17)$$

який за допомогою множників, виразу (3.14) і коефіцієнтів при аргументах

різних ступенів, перетворюється до вигляду (3.13):

$$\omega_j Q_j(x) = \omega_j (q_{j0} + q_{j1}x + \dots + q_{j2}x^2); \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_0 &= [\omega_0 \lambda_0] x^0; \\ \hat{y}_1 &= [\omega_0 \lambda_0 - a_1 \lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \omega_1] x^0 + [\lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \omega_1] x^1; \\ \hat{y}_1 &= [\omega_0 \lambda_0 - a_1 \lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \omega_1] x^0 + [\lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \omega_1] x^1; \\ \hat{y}_2 &= [\omega_0 \lambda_0 - a_1 \lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \omega_1 + a_1 a_2 \lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \omega_2 - \beta_2 \lambda_0 \quad \lambda_2 \quad \omega_2] x^0 + \\ &+ [\lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \omega_1 - a_1 \lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \omega_2 - a_2 \lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \omega_2] x^1 + [\lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \omega_2] x^2. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Оцінка ступеня полінома відбувається перевіркою гіпотези $\omega_j = 0$ за допомогою критерію Фішера [17]:

$$\frac{\omega_j^2}{\sigma_{n-r-1}^2} > F_{1,n-r-1}, \quad (3.20)$$

де F – значення розподілу Фішера (автором використовується розподіл для значимості 0,1)

Якщо побудувати ортонормовані поліноми, використовуючи вирази (3.13) та (3.14), і виконати аналіз їх форми (рис. 3.23), то очевидно, що поліном ступеня 0 відповідає за середнє, поліном ступеня 1 – за нахил, а поліном ступеня 2 – за кривизну (вигин в один бік).

Аналіз форми поліномів ступеня 3 та вище показує, що дані поліноми відповідають за різні різноспрямовані зміни, які, очевидно, не повинні враховуватися під час прогнозування, оскільки має виявлятися лише одна переважна монотонна тенденція до зміни параметра.

Це свідчить про достатність використання поліномів до 2 ступеня включно. Аналіз форми даних поліномів можна свідчить, що саме поліном ступеня 1 відповідає за наявність тенденції до зростання або спаду, оскільки два інших поліноми симетричні щодо середини області значень аргументу. Тому завдання оцінки наявності тенденції зростання чи спаду зводиться до

перевірки гіпотези $\omega_1 = 0$. Дана перевірка дуже важлива практично, оскільки без оцінки значимості достатнього ступеня полінома нахил і, відповідно, тенденція зміни буде виявлятися у будь-якому часовому тренді.

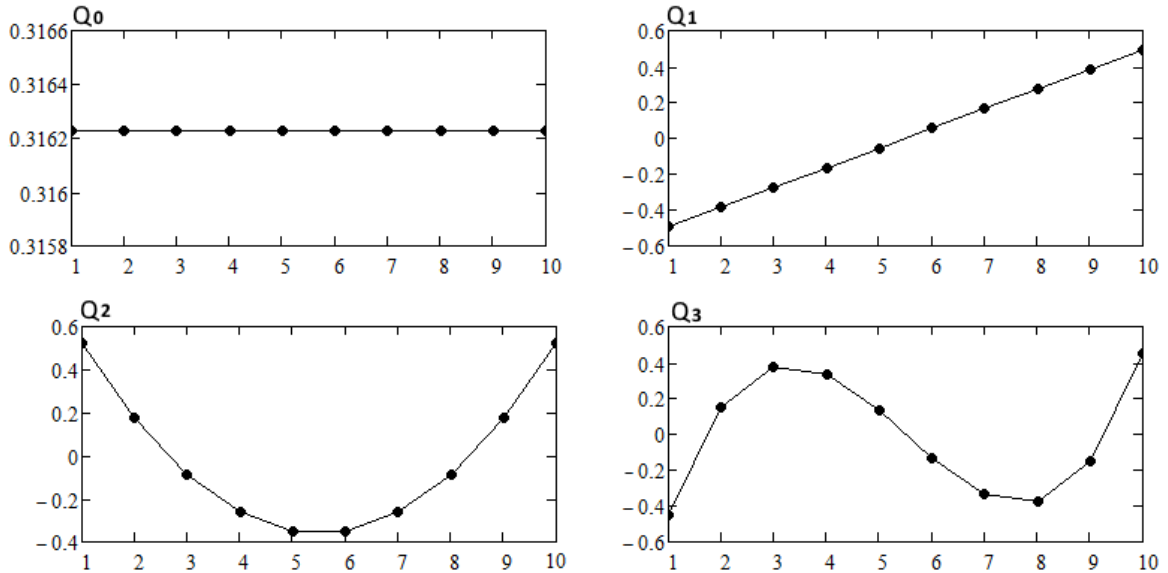


Рисунок 3.23 – Ортогональні поліноми, побудовані за 10 точками
(Джерело: розроблено автором)

Наведений вище математичний апарат дозволяє скласти такий алгоритм апроксимації, визначення значущості зростання та прогнозу шляхом побудови ортогональних поліномів:

- 1) x – час виміру параметра; y – його значення; n – кількість значень;
- 2) обчислення параметрів для ортогонального полінома 0-го ступеня:

$$Q_0(x) = \lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{n}},$$

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^n y_i Q_0(x_i), R_0 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \omega_0^2; \quad (3.21)$$

- 3) обчислення параметрів для ортогонального полінома 1-го ступеня:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \sum_{i=1}^n x_i Q_0(x_i), \\
\lambda_1 &= \left(\sum_{i=1}^n (x_i Q_0(x_i) - a_1 Q_0(x_i))^2 \right)^{-0.5}; \\
Q_1(x_i) &= (x_i Q_0(x_i) - a_1 Q_0(x_i)) \lambda_1; \\
\omega_1 &= \sum_{i=1}^n y_i Q_0(x_i); \\
R_1 &= R_0 - \omega_1^2;
\end{aligned} \tag{3.22}$$

5) обчислення параметрів для ортогонального полінома 2-го ступеня:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \sum_{i=1}^n x_i Q_0(x_i), \quad \beta_1 = \sum_{i=1}^n x_i Q_0(x_i), \\
\lambda_2 &= \left(\sum_{i=1}^n (x_i Q_0(x_i) - a_1 Q_0(x_i) - \beta_1 Q_0(x_i))^2 \right)^{-0.5}; \\
Q_2(x) &= ((x_i Q_1(x_i) - a_1 Q_1(x_i) - \beta_1 Q_0(x_i)) \lambda_2); \\
\omega_2 &= \sum_{i=1}^n y_i Q_2(x_i); \\
R_2 &= R_1 - \omega_2^2;
\end{aligned} \tag{3.23}$$

6) перевірка значущості ω_1 та ω_2 за формулою (3.20);

7) якщо ω_1 та ω_2 не значущі, то для визначення параметрів апроксимуючої функції використовується вираз (3.21) для ступеня 0, вважається що тенденції до зростання немає, прогнозування не відбувається;

8) якщо ω_1 значуще та більше нуля і ω_2 незначимо, то для визначення параметрів апроксимуючої функції використовується вираз (3.22) для ступеня 1 і вважається що має місце тенденція до зростання. При цьому можливий прогноз досягнення параметром найгіршої зони стану. Дата-час x_p

досягнення граничного значення P визначається як

$$x_p = \frac{P - a_0}{a_1}; \quad (3.24)$$

9) якщо ω_1 значуще та більше нуля і ω_2 значимо, то для визначення параметрів апроксимуючої функції використовується формула (3.23) для ступеня 2. Для визначення дати-часу x_p досягнення порогового значення P використовується формули розв'язання квадратного рівняння – обчислюється дискримінант і, якщо він більше нуля, то виробляється визначення «правого» кореня, вважається, що має місце тенденція до зростання і можливий прогноз досягнення параметром гіршої зони стану. Якщо дискримінант менше нуля, то вважається, що тенденції до зростання немає, прогноз не проводиться:

$$a_2x^2 + a_1x + a_0 - P = 0, \quad (3.25)$$

$$D = a_1^2 - 4a_2(a_0 - P).$$

$$\text{Якщо } D > 0, \text{ то } x_p = \frac{-a_1 + \sqrt{D}}{2a_2}.$$

Зручність використання ортогональних поліномів полягає у простоті та обчислювальній ефективності визначення апроксимуючої функції в сукупності з використанням критерію визначення значущості коефіцієнтів при поліномах, що дозволяє визначити достатній ступінь апроксимуючого полінома та виявити наявність статистично значущої тенденції до зростання.

Таким чином, удосконалено метод автоматичної адаптації порогових значень своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін монотонних змін вібраційних параметрів. Метод заснований на організації накопичення усереднених вібродіагностичних параметрів та величин їх зміни у буферах

різної часової тривалості. Для кожного буфера визначається базове значення, що характеризує нижню межу інтервалу змін наступного на порядок більшого часу буфера, а пороги відраховуються від даного базового значення з урахуванням величини типового інтервалу змін як поточного, так і наступного буфера. Розроблено спосіб прогнозування досягнення отриманих таким чином порогів з урахуванням можливої наявності різноспрямованих змін параметрів, для чого автоматично визначається інтервал для прогнозування, на якому для знаходження апроксимуючої функції визначаються параметри ортогональних поліномів до 2-го ступеня з використанням критерію вибору достатнього ступеня за наявності тенденції до зростання. Метод автоматичної адаптації порогів призначений для раннього виявлення та прогнозування небезпечної зміни технічного стану без необхідності стандартного завищення порогів при нестабільній віброактивності.

3.3 Розроблення методу автоматичної діагностики

3.3.1 Сутність методу автоматичної діагностики

У більшості переносних та стаціонарних систем застосовується повузлова діагностика роторного обладнання.

Суть даного підходу полягає у використанні параметрів, отриманих у точках контролю, розташованих на конкретному вузлі визначення технічного стану цього ж вузла. Однак багато дефектів, що з'являються в конкретному вузлі, призводять до зміни вібраційної картини і в інших вузлах, причому чим більш розвинений дефект, тим більше впливає він на стан ГЕУ.

Тому повузловий метод застосовується, як правило, при діагностуванні слаборозвинених дефектів у системах глибокої превентивної діагностики, в яких використовуються переважно аналіз сильно загасаючих при поширенні випадкових високочастотних компонентів.

Однак у разі появи розвинених дефектів автоматичний діагноз у таких системах може стати неточним і фахівцю доводиться коригувати його, аналізуючи зміну вібраційної активності спільно в різних вузлах і навіть у різних машинах за їх близького розташування або зв'язку через середовище, що передається. Наприклад, поява дефекту лопаті насоса може вплинути на вібрацію як інших справних вузлів даного агрегату (наприклад, підшипників), так і вузлів інших агрегатів через пульсації тиску середовища або через вібрацію, що поширюється через фундамент.

Тому при діагностиці розвинених дефектів необхідно враховувати їхній вплив на вібраційну картину у всіх точках контролю, розташованих на агрегаті. Так, при зростанні вібрації на декількох опорах обертання потокоутворювального агрегату можна говорити про дефект потоку або дефекти лінії валу та інших (залежно від параметричних ознак), а зростання вібрації в одному підшипнику з великою долею ймовірності свідчить про його дефект.

Такий підхід вигідно відрізняється від повузлового принципу діагностики і підвищує достовірність результату. Однак при розробці вирішальних правил діагностування (визначення зв'язку простору зон стану діагностичних параметрів з простором дефектів) потрібне глибоке розуміння зв'язку дефектів конкретного вузла з широким переліком виділених з вібрації компонентів у всіх вимірюваних агрегатах точках.

Тому конфігурувати такі правила повинен експерт високої кваліфікації у галузі вібродіагностики. Також бажано, щоб даний інструмент був доступний не тільки виробнику, а й замовнику, що експлуатує об'єкти, для подальших коригувань за результатами апробації.

Для спрощення налаштування та впровадження силами розробника систем доцільно створити діагностичні модулі типових агрегатів та адаптувати їх до особливостей конкретних об'єктів. Тому до методу автоматичного діагностування пред'являються такі вимоги:

- 1) уніфікація (інваріантність до об'єктів діагностування), коли можна виявляти різні типові дефекти обладнання різного виду, зокрема й суднового,

а вирішальні правила конкретного об'єкта повинні враховуватися на рівні вхідних даних (зміни);

2) врахування не тільки параметричних, а й просторових ознак дефектів для врахування шляхів передачі вібрації, згасання вібрації при поширенні та врахування взаємодії через середовище;

3) простота конфігурації діагностичних вирішальних правил для врахування наявності діагностичних ознак, що збігаються з різними дефектами.

Урахування даних вимог дозволить спростити автоматизацію діагностування та конфігурацію діагностичних вирішальних правил і коригувати їх на рівні користувача, без зміни коду.

Використання просторових ознак дозволить врахувати судову специфіку – сильний взаємний вплив обладнання, насамперед, через його близьке розташування в обмежених приміщеннях шляхом об'єднання пов'язаних об'єктів у групи та складання загального діагностичного модуля.

Під просторовою ознакою розуміється врахування наявності чи відсутності зростання величин діагностичних параметрів у рознесених у просторі точках контролю.

Автоматизацію процесу діагностування пропонується реалізувати в такий спосіб. Для кожного накопичувача автоматично формується матриця зон станів Z розміром $i \times j$, де i – кількість діагностичних параметрів (кількість рядків), а j – кількість точок контролю (кількість стовпців). Кожен елемент даної матриці відповідає зоні стану відповідного параметра. Якщо перевищено поріг попередження, то відповідний елемент матриці містить числовий код зони зі значенням 1, 2 або 3, інші елементи – 0.

Також автоматично формується матриця прогнозів T , аналогічна структурою матриці зон станів, що містить прогнози досягнення параметрами наступних зон стану у форматі дата-час.

При конфігурації системи фахівець у галузі діагностики повинен сформувати перелік дефектів конкретних вузлів, кожному з яких надається порядковий номер-ідентифікатор n . Далі для кожного дефекту конкретного

вузла фахівець має заповнити конфігураційну матрицю ознак дефектів C . Матриця має таку ж структуру як і матриця зон станів та матриця прогнозів. Елемент такої матриці є набором елементів, кожен з яких включає такий опис ознаки: номер дефекту (посилання на дефект), тип ознаки: основний (О) або додатковий (Д) коефіцієнт впливу (від 0 до 1);

Основні – це характерні (унікальні) ознаки, які з великою ймовірністю вказують на дефект, наприклад, зростання лопатевих гармонік при дефектах формування потоку. Додаткові ознаки можуть бути наслідком вказаного дефекту, наприклад, той же дефект лопатки насоса може викликати гідродинамічну невідповідність з ознакою зростання вібрації на частоті обертання, яка є ознакою механічної або електромагнітної невідповідності. Введення таких ознак, як відсутність зростання параметрів, не потрібно. Ознаки даного типу закладені в сам алгоритм, що, з одного боку, скорочує обсяг даних, що вводяться і, відповідно, спрощує конфігурацію, але, з іншого боку, вимагає задати всі типові стани (дефекти).

Урахування таких ознак як відносне зростання параметрів лежить поза рамками алгоритму. У такому разі повинні формуватися окремі діагностичні параметри, що характеризують різницю двох інших параметрів однієї природи з установкою їм абсолютних порогів. Конфігурація загальної матриці дефектів всім станам C служить для зручності порівняльного аналізу ознак різних дефектів за її конфігурації. Матриці Z , T та C є вхідними даними алгоритму діагностування.

3.3.2 Схема методу автоматичної діагностики

Процес ідентифікації дефектів зводиться до:

- 1) оцінки попередніх ймовірностей кожного дефекту P_p ;
- 2) розрахунку остаточної ймовірності дефектів P_o за рахунок зниження ймовірності дефектів, основні ознаки яких збігаються з додатковими

ознаками інших ймовірних дефектів відповідно до добутку коефіцієнтів впливу збіжних ознак.

Для автоматизації алгоритму зручно використовувати операції над матрицями. Для цього кожна повна діагностична матриця розбивається на найпростіші матриці коефіцієнтів впливу окремо для основних $O(n)$ і додаткових $D(n)$ ознак кожного дефекту n .

Далі в алгоритмі: $A \times B$ – поелементне перемноження матриць A та B (добуток Адамара), ΣA – сума елементів матриці A .

$A^{(0,1)}$ – бінарна матриця.

Опис методу автоматичного діагностування:

1. Попередня оцінка ймовірності ідентифікації кожного з дефектів:

$$P_{\Pi}(n) = \frac{\mu + 1 - \varepsilon}{\mu + 1} \times \frac{\sum (Z^{(0,1)} \times O(n))}{\sum O(n)} + \frac{1}{\mu + 1} \times \frac{\sum (Z^{(0,1)} \times D(n))}{\sum D(n) + 1 - \varepsilon}, \quad (3.26)$$

де якщо $\sum D(n) \neq 0$ то $\varepsilon = 1$, інакше $\varepsilon = 0$; μ – відношення вкладу до ймовірності основних ознак до вкладу додаткових (типове значення дорівнює 2 та встановлюється, виходячи з досвіду діагностування та стратегії внесення величин коефіцієнтів впливу).

2. Для подальшого аналізу використовуються лише дефекти, ймовірність яких $P_{\Pi} > 0,5$. Дані дефекти вважаються попередньо виявленими.

3. Для кожного попередньо виявленого дефекту з номером n визначається матриця $S(n)$, в якій кожен елемент є максимумом за відповідними елементами матриць $D(k)$ всіх інших ($k \neq n$) попередньо виявлених дефектів.

4. Остаточна оцінка ймовірності ідентифікації кожного дефекту $P_{\Pi}(n)$:

$$P_o(n) = P_{\Pi}(n) - \frac{\sum [S(n) \times O(n) \times Z^{(0,1)}]}{(\mu + 1) \sum O(n)}. \quad (3.27)$$

5. Для кожного дефекту n визначається ступінь розвитку дефекту $Zd(n)$ як гірша (максимальна) зона за зонами знайдених основних $Z \times O(n)$ та додаткових $Z \times \sum D(n)^{(0,1)}$ ознак. При цьому не повинні враховуватись зони додаткових ознак, які є основними ознаками інших попередньо виявлених дефектів.

6. Для кожного дефекту n прогнозується час досягнення наступної зони небезпеки як мінімальний прогноз досягнення зони $Zd(n) + 1$ основними та додатковими параметрами із зоною стану, що дорівнює $Zd(n)$. При цьому не повинні враховуватись прогнози за додатковими ознаками, які є основними ознаками інших попередньо виявлених дефектів;

7. Вихідними даними алгоритму є: найімовірніший дефект з максимальним ступенем небезпеки, і навіть дефект із максимальною ймовірністю, якщо його ступінь небезпеки нижче максимальної.

Оскільки одні й ті ж самі діагностичні параметри можуть бути основними для одних дефектів й додатковими для інших (тобто простори діагностичних ознак дефектів перетинаються), в алгоритмі застосований механізм взаємного нівелювання ймовірностей, дію якого можна пояснити на розглянутому вище прикладі. Якщо дефект лопаті насосу, характерною ознакою якого є зростання модуляції лопатевих гармонік частотою обертання (основна ознака), призводить в тому числі до зростання вібрації на частоті обертання через гідродинамічної невідповідності (додаткова ознака), то ймовірність механічної невідповідності (дисбаланс ротора), що характеризується тією ж ознакою, буде знижено.

У дисертаційній роботі запропоновано включити до переліку діагностичних такі вібраційні параметри:

- 1) рівень у стандартній смузі частот;
- 2) рівні гармонійних складових на характерних частотах в автоспектрах та спектрах огинаючої;
- 3) рівні складових трьохоктавного спектра фону (випадкових складових).

Крім цього, рекомендується включити величини СКЗ та пік-фактору для аналізу імпульсних компонентів та використовувати смуги третьоктавного спектра вихідного сигналу для отримання інформації про параметри коливальних сил у разі сильної нестабільності частоти обертання. Ідентифікацію дефектів рекомендується проводити з великою періодичністю, якщо стан параметрів не змінюється, і за подією, при перевищенні одним із контрольованих параметрів вібрації порогових значень або появи сильного стрибка параметра без перевищення порога [45].

Розроблений метод діагностування дозволяє враховувати специфіку судових умов за рахунок можливості конфігурування просторових ознак дефектів та можливості коригування діагностичних вирішальних правил, а також використання як вхідних даних результатів визначення та оцінки значущості зміни параметрів різної природи, створених для умов нестабільності частоти та віброактивності.

Таким чином, отримав подальший розвиток метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій. Метод є інваріантним до типу об'єкта діагностування, а прив'язка до конкретного агрегату здійснюється за допомогою складання конфігураційної таблиці з описом ознак можливих станів, в якій стовпці відповідають точкам контролю, а рядки – вібродіагностичним параметрам, що визначаються. Діагностування здійснюється шляхом визначення попередньої ймовірності наявності кожного дефекту за основними та додатковими ознаками за допомогою оцінки відношення сум вагових коефіцієнтів до та після перемноження з матрицею перевищень порогів й подальшим уточненням ймовірності з урахуванням перетину просторів діагностичних ознак попередньо виявлених дефектів. Розроблений метод задовольняє сформульованим вимогам до простоти та доступності для фахівця конфігурування правил діагностування та урахування просторових ознак.

Висновки до розділу 3

1. Послідовно розкрито нові наукові результати, що ведуть до досягнення мети дисертації роботи.

2. Вперше розроблено метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій, який, на відміну від існуючих, є інваріантним до типу об'єкта діагностування, а прив'язка до конкретного агрегату здійснюється за допомогою складання конфігураційної матриці.

3. Удосконалено метод автоматичної адаптації порогових значень для своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів, який, на відміну від існуючих, заснований на організації накопичення усереднених вібродіагностичних параметрів та величин їх зміни у буферах різної часової тривалості, що дозволяє виявляти та прогнозувати небезпечну зміну технічного стану без необхідності стандартного завищення порогів при нестабільній віброактивності.

4. Одержав подальший розвиток метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів, який, на відміну від існуючих, використовує одночасно виміряні в одній точці спектри з різною частотною роздільною здатністю для мінімізації спотворень форми гармонійних складових при нестабільності їх параметрів та дозволяє підвищити точність визначення параметрів слабких гармонійних компонентів, які можуть характеризувати вид та ступінь розвитку небезпечних дефектів, в умовах характерної для суднових умов нестабільності частоти обертання без необхідності використання синхронної з положенням валу вибірки, неефективної або недоступної для багатьох суднових машин.

Основні результати, отримані у розділі, опубліковані в роботах здобувача [98-100, 102-105].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДУ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

У даному розділі дисертаційної роботи наводяться результати апробації розроблених методів, що входять до складу комплексного методу вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту, а також практичні рекомендації щодо застосування методу на водному транспорті. Ряд рекомендацій та методів доведено до програмної реалізації, що дозволяє автоматизувати процес діагностики на судах.

4.1 Апробація та рекомендації щодо застосування методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів

4.1.1 Апробація методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів

Запропонований метод автоматичної обробки спектрів випробуваний як на модельних сигналах, так і реальних сигналах вібрації, записаних на різному судновому та промисловому обладнанні. Для цього обробка спектра даним способом (далі – апробований спосіб) була реалізована у вигляді проекту Mathcad, який за вхідним спектром розраховував лінію фону та ідентифікував параметри гармонійних компонентів: частоту F_g , рівень (СКЗ) A_g та відносну ширину H_g .

У цієї ж програмі для порівняльної оцінки з реалізованим фірмою “Брюль і К'єр” [67] програмно-апаратним комплексом для спектрального аналізу вібрації розроблений контрольний спосіб визначення рівня та частоти гармоніки, заснований на введенні поправок за частотою та рівнем залежно від співвідношення величин двох максимальних спектральних відліків гармоніки.

На першому етапі досліджувалась точність визначення параметрів гармоніки залежно від положення її частоти між частотними смугами спектру, рівня фону, числа усереднень спектру та рівня девіації частоти за модельними сигналами. Для цього використовувалася частота дискретизації 64 Гц (частота Найквіста 32 Гц) та гармонійні сигнали, частота чи середня частота (при девіації) яких була близькою до середини частотного діапазону аналізу, тобто близько 16 Гц. Спектри обчислювалися з використанням вікна Хана з частотною роздільною здатністю 1 Гц з різним числом усереднень та перекриттям часових відрізків для розрахунку миттєвих спектрів на 50%.

На другому етапі проведена обробка характерних спектрів вібрації роторного обладнання, обчислених як при постійній частоті обертання, так і при девіації частоти обертання для дослідження впливу реальної (немодельованої) нестабільності частоти обертання на можливість й точність ідентифікації параметрів гармонійних компонентів.

У рамках апробації була аргументована та використана як критерій позитивного результату ідентифікації параметрів гармоніки достатня для діагностичних цілей похибка знаходження її рівня та частоти.

Як зазначено в п. 3.1 необхідна похибка визначення рівня слабких складових на фоні перешкод не більше 30% обумовлена переважним використанням завдань діагностики відносних змін, при яких діагностично значуще зростання відповідає збільшенню в 2 рази та більше [8].

Вказану мінімальну похибку можна порівняти з похибкою типових вимірювальних перетворювачів віброприскорення, нерівномірність яких становить від 1 до 3 дБ (для AP28-10, ГлобалТЕСТ та 603V01, РСВ), з урахуванням впливу температури близько 0,2% на °С. До вимірювання частоти гармонійних складових пред'являються жорсткіші вимоги, а похибка оцінюється в ширинах частотних смуг спектру df , оскільки дана ширина, виражена в df , однакова для обраної віконної функції та відповідає ширині головної пелюстки АЧХ смуги спектра.

Допустиму похибку визначення частоти гармоніки можна отримати,

виходячи з необхідності за частотою першої гармоніки визначити гармоніки, що відносяться до цього ж ряду, з максимальною кратністю близько 10-12 для ідентифікації таких дефектів як прослизання кільця підшипника, дефекту муфти, ослаблення кріплення та ін. [14].

Методичні рекомендації до налаштувань діагностичної вібровимірювальної апаратури [44] дозволяють стверджувати, що:

- мінімальна частотна роздільна здатність відповідає знаходженню першої гармоніки мінімальної частоти обертання в 8-ій смузі спектра;
- для того, щоб сусідні гармоніки вирішилися, потрібно, щоб між ними було не менше 3-4 ширин частотних смуг спектру.

Розглянемо граничний випадок – спектр вібрації з частотною роздільною здатністю df , для машини з частотою обертання $Fg = 8df$. Гармоніка з номером 12 матиме частоту $12Fg$, а найближча дозволена гармоніка – частоту $12Fg + 3df$ (рисунок 4.1). Знайшовши відношення відстані між найближчими гармоніками до кратності шуканої гармоніки, отримаємо мінімальну необхідну похибку $ПХ = 0,25df$, необхідну для того, щоб в інтервал для ідентифікації $dF = 12(Fg \pm ПХ)$ не потрапила сусідня гармоніка. Отримані похибки в 30% для рівня та $0,25df$ для частоти використовуються далі як умова події з ідентифікації.

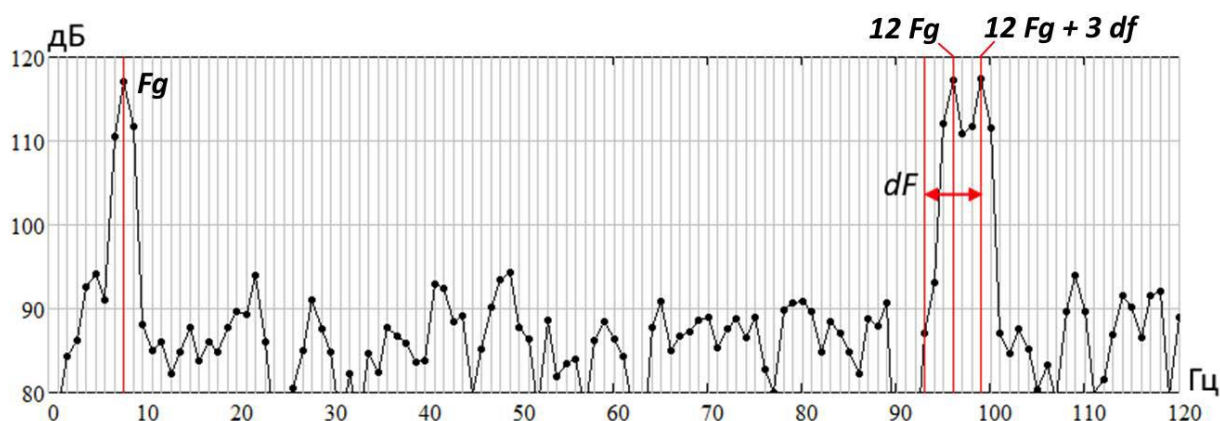
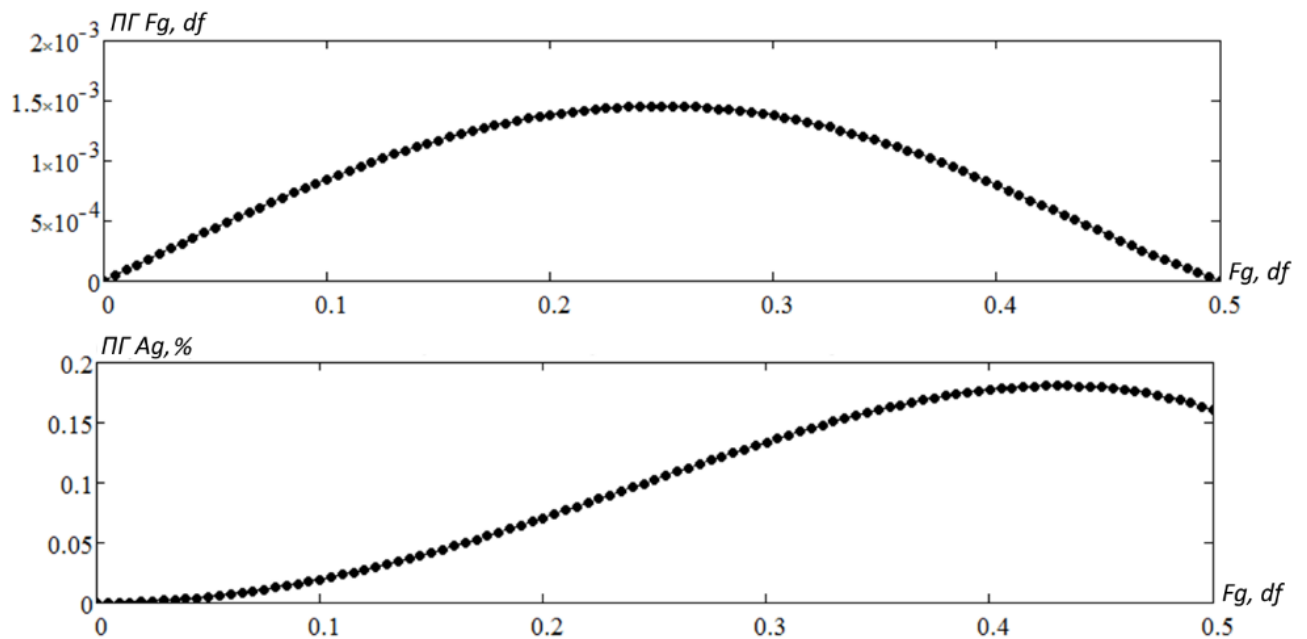


Рисунок 4.1 – Спектр модельного сигналу, що показує граничний випадок обробки спектрів з метою ідентифікації гармонік одного ряду
(джерело: розроблено автором)

Для оцінки коректності вибору інтерполяційної функції апробованого способу були згенеровані модельні гармонічні сигнали з різною частотою, що змінюється в межах половини смуги спектра для всіх можливих форм гармонік.

Далі для кожного сигналу обчислювався миттєвий (перше усереднення) спектр та оцінювалася похибка визначення частоти та рівня за допомогою апробованого методу. Дана оцінка наведена на рис. 4.2, з якого видно, що максимальна похибка визначення частоти становить $0,002 df$, а рівня $0,2\%$.



$Fg = 0$ – гармоніка подається до центру смуги, $Fg = 0,5df$ – гармоніка подається між смугами

Рисунок 4.2 – Похибка визначення частоти ($ПХ Fg$) та рівня ($ПХ Ag$) гармоніки без фону залежно від положення її заданої частоти між частотними смугами спектру (Джерело: розроблено автором)

Дані похибки є несуттєвими (менше допустимих), що свідчить про коректність вибору інтерполюючої функції апробованого методу. Контрольний метод не використовувався, оскільки він також виходить з залежності, отриманої при такому моделюванні, тобто відповідні похибки дорівнюють 0.

Для оцінки впливу нестабільності частоти гармонійної складової на похибку визначення її параметрів згенеровано ряд сигналів з лінійною

зміною частоти тривалістю 1 с, за якими далі розраховувалися спектри з частотною роздільною здатністю $df = 1 \text{ Гц}$ і визначалися параметри відповідної компоненти за допомогою контрольного та апробованого способу з урахуванням формули (3.2).

Було прийнято, що відношення рівня гармоніки до рівня фону дорівнює 10 (тобто істотно). Усього згенеровано шість груп сигналів, кожній з яких відповідала певна середня частота від 16 до 16,5 Гц з кроком 0,1 Гц, яка використовувалася як задана при визначенні похибки.

Для сигналів кожної групи задавалась девіація (зміна) частоти гармоніки від 0 до $8df$ з малим кроком, таким чином, для кожної групи отримано свою залежність.

Сукупність графіків описаних вище залежностей наведено на рис. 4.3, відповідні значення максимальних похибок у ХТ наведені у табл. 4.1.

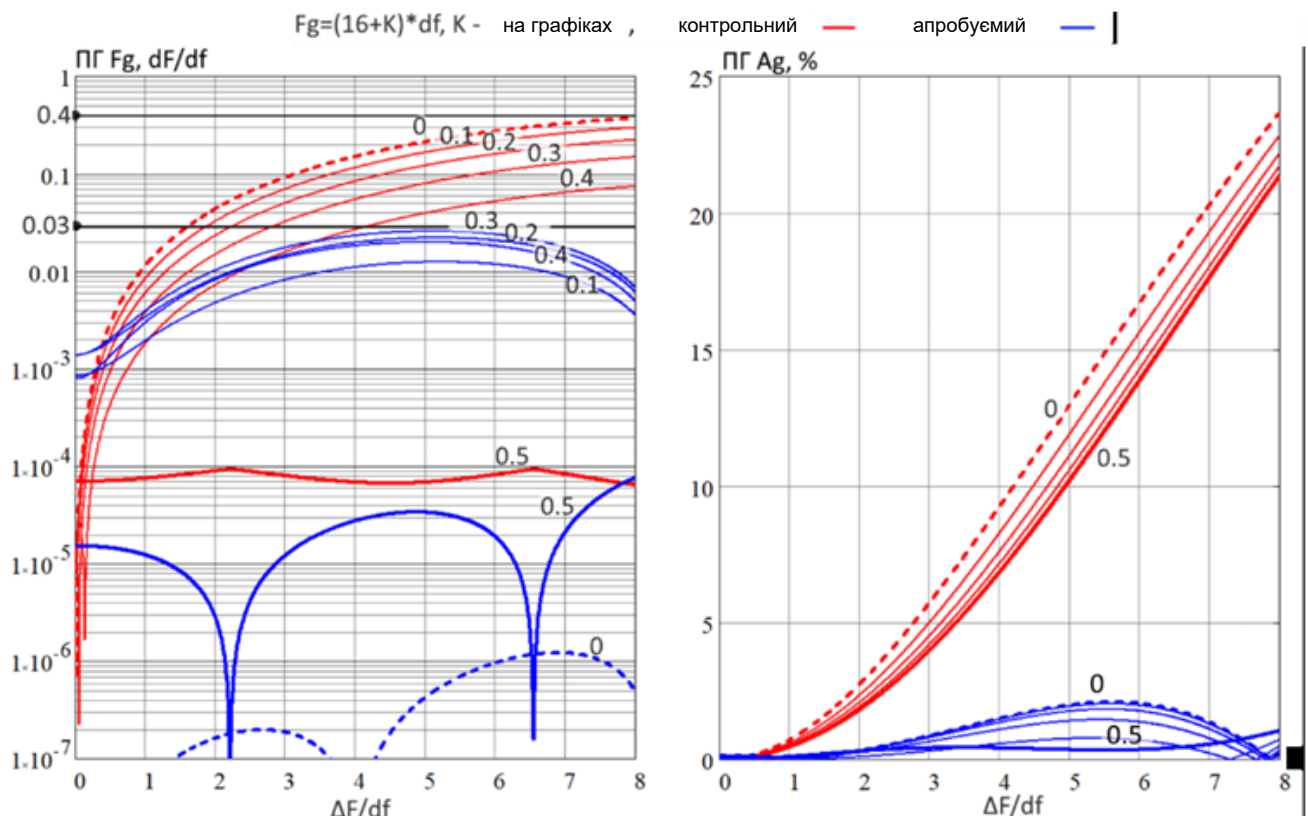


Рисунок 4.3 – Похибки визначення параметрів гармоніки під час девіації її частоти (Джерело: розроблено автором)

Таблиця 4.1 – Похибки визначення параметрів гармоніки під час девіації її частоти (Джерело: розроблено автором)

Максимальна похибка		$\Delta F/df$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ПХ Fg , df	контрольний	0,011	0,044	0,092	0,151	0,213	0,273	0,327	0,372
	апробований	0,004	0,010	0,018	0,023	0,026	0,024	0,017	0,007
ПХ Ag , df	контрольний	0,73	2,76	5,74	9,25	12,98	16,71	20,29	23,65
	апробований	0,03	0,32	0,87	1,50	1,99	2,05	1,36	1,05

На даних графіках по осі абсцис відкладено зміну частоти гармоніки ΔF (за час вимірювання), наведену до df , а по осі ординат на графіках зліва – абсолютна похибка визначення частоти гармоніки ПХ Fg , наведена до df , на графіках справа – відносна похибка визначення рівня гармоніки ПХ Ag у відсотках. На самих графіках зазначено відповідне перевищення заданої середньої частоти опорної середньої частоти 16 Гц, що потрапляє до центру смуги спектра.

З графіків видно перевагу апробованого способу, якому відповідають значно менші похибки, ніж контрольного способу. Характерним є результат, отриманий за зміни частоти на ширину основної пелюстки АЧХ смуги спектра, тобто на $4df$, в якому максимальна похибка ПХ Fg апробованого способу дорівнює $0,023df$ проти $0,151df$ контрольного способу, а максимальна ПХ Ag апробованого способу дорівнює 1,5% проти 9,25% контрольного способу. Тобто, отримані більш ніж у 6 разів менші похибки для апробованого способу.

Характерним є результат, отриманий за зміни частоти на ширину основного пелюстки АЧХ смуги спектра, тобто на $4df$, в якому максимальна похибка ПХ Fg апробованого способу дорівнює $0,023df$ проти $0,151df$ контрольного способу, а максимальна ПХ Ag апробованого способу дорівнює 1,5% проти 9,25% контрольного способу, тобто отримані більш ніж у 6 разів менші похибки для апробованого способу.

4.1.2 Апробація удосконаленого методу на сигналах з фоном

Апробація способів на модельних сигналах з фоном, конкретні реалізації якого мають випадковий характер, заснована на ймовірності визначення параметрів гармоніки з допустимою похибкою в залежності від різного відношення рівня гармоніки до рівня фону та числа усереднень.

Для апробації було згенеровано 10^4 гармонійних сигналів з $Ag = 1$ та Fg від 16 до 16,5 Гц з рівним кроком по частоті. Конкретний гармонійний сигнал підсумовувався з сигналом білого шуму із заданим очікуваним рівнем Af в частотній смузі спектру, що розраховується щоразу заново. Таким чином задавалося різне відношення рівня гармонійного сигналу до рівня фону й забезпечувалася випадковість розподілу фону біля гармоніки.

Для кожної зі 10^4 заданої таким чином частоти було отримано 100 сигналів з різним відношенням рівня гармоніки до рівня фону від 1 до 10 з рівномірним кроком, для кожного з яких обчислені по 20 спектрів з різним числом усереднень від 1 до 20.

Таким чином, для кожної пари значень відношення рівня гармоніки до рівня фону Ag/Af та числа усереднень N_{av} були отримані 10^4 спектрів, за якими визначено відсоток ідентифікацій параметрів P гармонік з допустимою похибкою, визначеної вище за допомогою контрольного й апробованого способу. У результаті отримано залежності ймовірності визначення з достатньою точністю окремо рівня, окремо частоти та спільної події, графіки яких для кожного числа усереднень N_{av} наведено на рисунках 4.4-4.6.

На даних графіках по осі абсцис відкладено зміну частоти гармоніки ΔF (за час вимірювання), наведену до df , а по осі ординат на графіках зліва – абсолютна похибка визначення частоти гармоніки ПХ Fg , наведена до df , на графіках справа - відносна похибка визначення рівня гармоніки ПХ Ag у відсотках. На самих графіках зазначено відповідне перевищення заданої середньої частоти опорної середньої частоти 16 Гц, що потрапляє до центру смуги спектра.

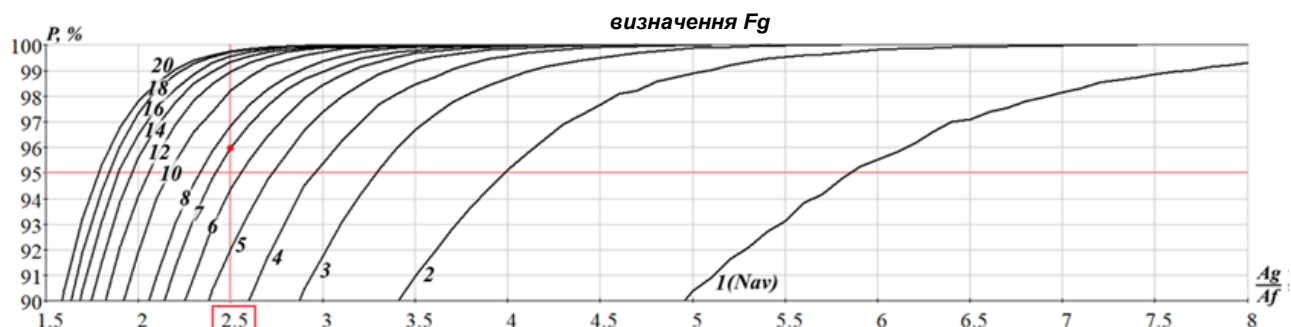


Рисунок 4.4 – Імовірність визначення частоти (F_g) гармонійної складової з допустимою похибкою
(Джерело: розроблено автором)

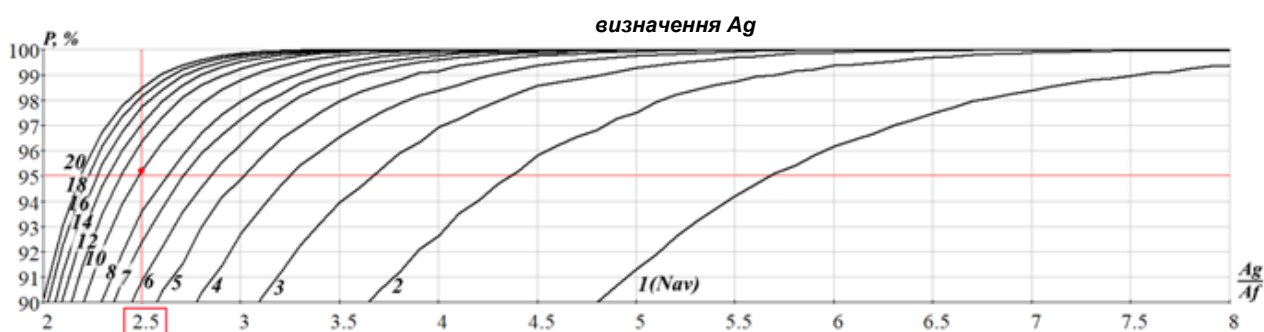


Рисунок 4.5 – Імовірність визначення рівня (A_g) гармонійної складової з допустимою похибкою
(Джерело: розроблено автором)

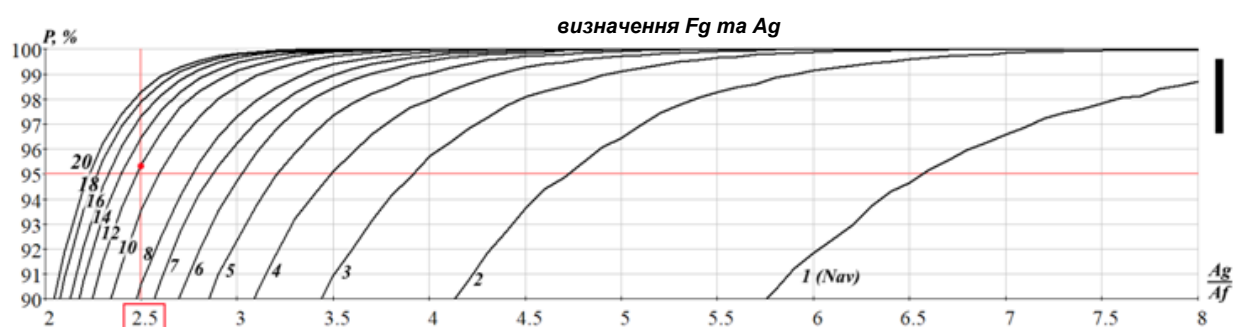


Рисунок 4.6 – Імовірність визначення частоти та рівня (спільна подія) гармонійної складової з допустимою похибкою
(Джерело: розроблено автором)

З графіків видно перевагу апробованого способу, якому відповідають значно менші похибки, ніж контрольного способу. Характерним є результат, отриманий за зміни частоти на ширину основного пелюстки АЧХ смуги спектра, тобто на $4df$, в якому максимальна похибка ПХ Fg апробованого способу дорівнює $0,023df$ проти $0,151df$ контрольного способу, а максимальна ПХ Ag апробованого способу дорівнює 1,5% проти 9,25% контрольного способу. Тобто, отримані більш ніж у 6 разів менші похибки для апробованого способу.

Приймемо рівень достатньої ймовірності 95%. За отриманими залежностями визначено мінімальну кількість усереднень, необхідну для ідентифікації з достатньою ймовірністю параметрів гармонійної складової з мінімальним діагностично важливим відношенням рівня гармоніки до рівня фону, що дорівнює 2,5.

Визначено, що для ідентифікації параметрів гармоніки з цим відношенням потрібно сім усереднень для коректної ідентифікації Fg , 10 усереднень для коректної ідентифікації Ag та 12 усереднень для коректної ідентифікації Fg й Ag (див. точку на вертикальній лінії на рис. 4.5, 4.6).

Дані значення кількості усереднень слід використовувати при встановленні параметрів вимірювання спектрів систем вібродіагностування. За отриманими вище залежностями також встановлені коефіцієнти Kp до лінії фону для виявлення відліків спектру гармонік SpG для алгоритму, наведеного в п. 4.1.2, які наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Пороги для алгоритму з ідентифікації гармонійних складових (Джерело: розроблено автором)

<i>Nav</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Kp, рази</i>	6.6	4.8	4	3.5	3.3	3.1	2.9	2.8	2.7	2.6
<i>Nav</i>	11	12	12	14	15	16	17	18	19	20
<i>Kp, рази</i>	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3

Порівняння залежності ймовірності точної ідентифікації параметрів гармонік від кількості усереднень та відношення рівня гармоніки до рівня фону за допомогою контрольного та апробованого способу свідчить про однозначну перевагу запропонованого способу, що апробується (рис. 4.7).

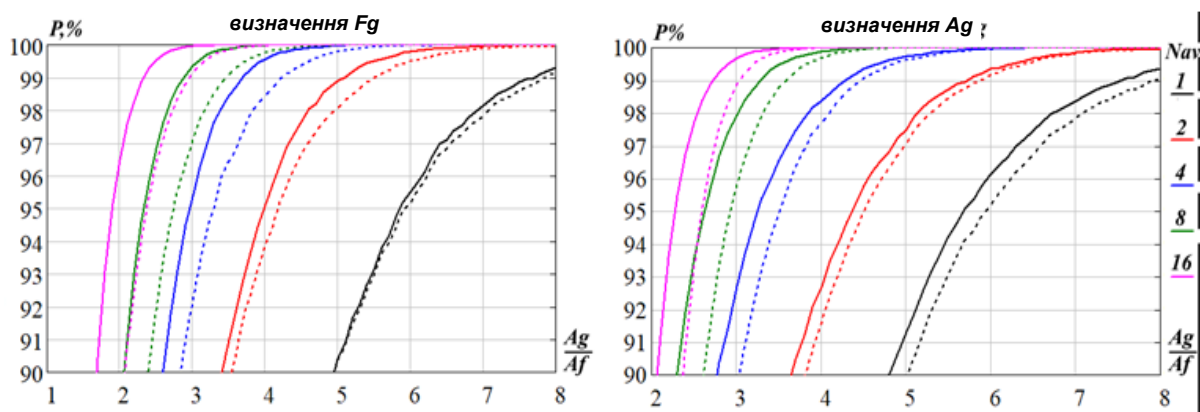


Рисунок 4.7 – Порівняння ймовірності визначення параметрів гармонійної складової з допустимою похибкою за допомогою апробованого (суцільною лінією) та контрольного (пунктирною лінією) методу
(Джерело: розроблено автором)

Перевага при ймовірності P більше 95% знаходиться в діапазоні 0-5% і є максимальною при малих відносинах A_g/A_f і великій кількості усереднень.

4.1.3 Апробація удосконаленого методу для реальних сигналів

Для апробації запропонованого методу на реальних сигналах вимірені вібрації різного суднового обладнання. Аналіз значної кількості реальних сигналів підтвердив результат, отриманий під час моделювання. Як приклад розглянемо показовий спектр синхронного турбогенератора, де є лише один гармонійний ряд частоти обертання валу з числом гармонік більше 100 та різним рівнем перевищення гармонік над фоном. Прийmemo, що кожна гармоніка спектра такого агрегату відноситься до ряду частоти обертання, оскільки джерела коливальних сил інших частот в агрегаті відсутні.

За таким спектром можна визначити, яким чином пов'язана похибка визначення частоти гармоніки з її перевищенням над фоном. Спектр такого агрегату з одним усередненням, частотною роздільною здатністю 1 Гц та граничною частотою 6 400 Гц наведений на рис. 4.8 зверху.

Даний спектр був оброблений тим самим методом, що і модельні сигнали. При цьому був встановлений низький поріг перевищення над фоном, що дорівнює 2, для того, щоб охопити якомога більше гармонік.

Результат залежності похибки визначення частоти від перевищення рівня гармоніки над фоном A_g/A_f наведено рис. 4.8 знизу.

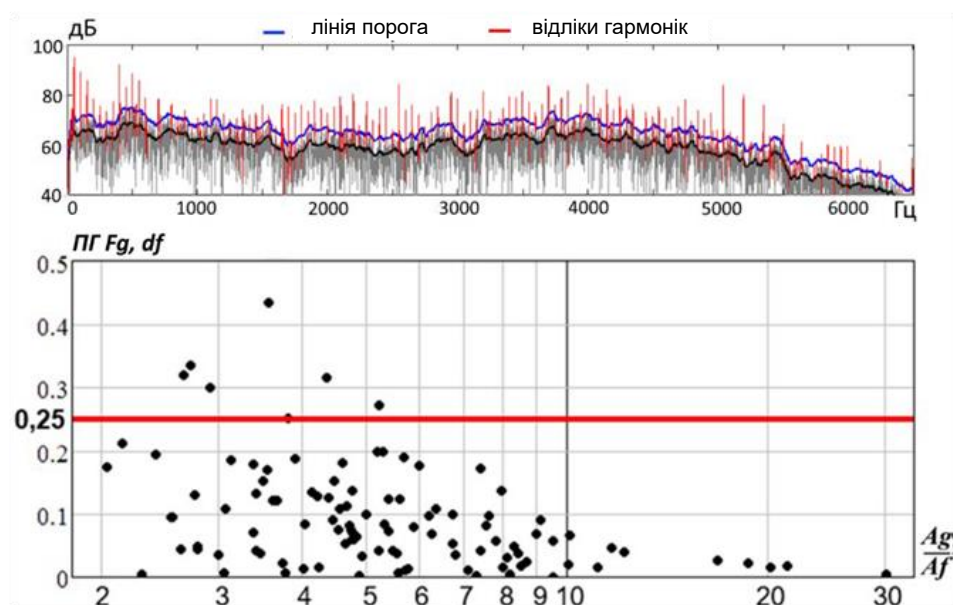


Рисунок 4.8 – Спектр суднового синхронного турбогенератора (зверху) та результат його обробки (знизу): залежність похибки визначення частот гармонійних складових від перевищення рівня гармоніки над фоном (Джерело: розроблено автором)

Похибка розраховувалася як різниця між ідентифікованою частотою гармоніки та відповідною розрахунковою гармонікою низки частоти обертання. Далі визначалося відношення даної різниці до df , коли в розрахунок бралися лише гармоніки з відхиленням менше $0,5df$, ця умова використовувалася як критерій попадання конкретної гармоніки до частоти обертання.

З наведеного на рис. 4.8 результату видно, що похибка визначення частоти всіх гармонік, рівень яких перевищує лінію фону в 5,2 рази і більше, знаходиться в межах $0,25df$. При цьому раніше за допомогою моделювання показано, що ймовірність ідентифікації гармонік з сигналом відношення, що дорівнює 5,2 та одного усереднення, становить 92% (див. рис. 4.5).

Результати, отримані на реальних сигналах і під час моделювання, вважатимуться аналогічними, оскільки статистика, отримана під час обробки реальних сигналів, обмежена і дозволяє оцінити можливість з аналогічною модельованою точністю.

Невелика відмінність в оцінках пов'язана з неповною відповідністю моделі реальному сигналу, в якому фон не є білим шумом і часто визначається маскованими гармонійними компонентами малої потужності, що призводить до спотворення рівня фону і зниження його флуктуацій.

Крім апробації запропонованого способу ідентифікації параметрів гармонійних компонентів на реальних сигналах, отриманих при відносно стабільній частоті обертання, була проведена оцінка застосування запропонованого апробованого способу обробки спектрів, вимірюваних при девіації частоти обертання. Головним завданням даної апробації була оцінка можливості ідентифікації параметрів гармонійних компонентів при істотно нелінійній девіації частоти гармоніки.

Для цього використовували різні сигнали вібрації, записані в тому числі на планетарному редукторі головної енергетичної установки судна. Схему редуктора і точок контролю наведено рис. 4.9.

Один із записів, вироблених на даному агрегаті, відповідає суттєвій зміні частоти обертання вихідного тихохідного валу під час перехідного режиму (рис. 4.9 праворуч).

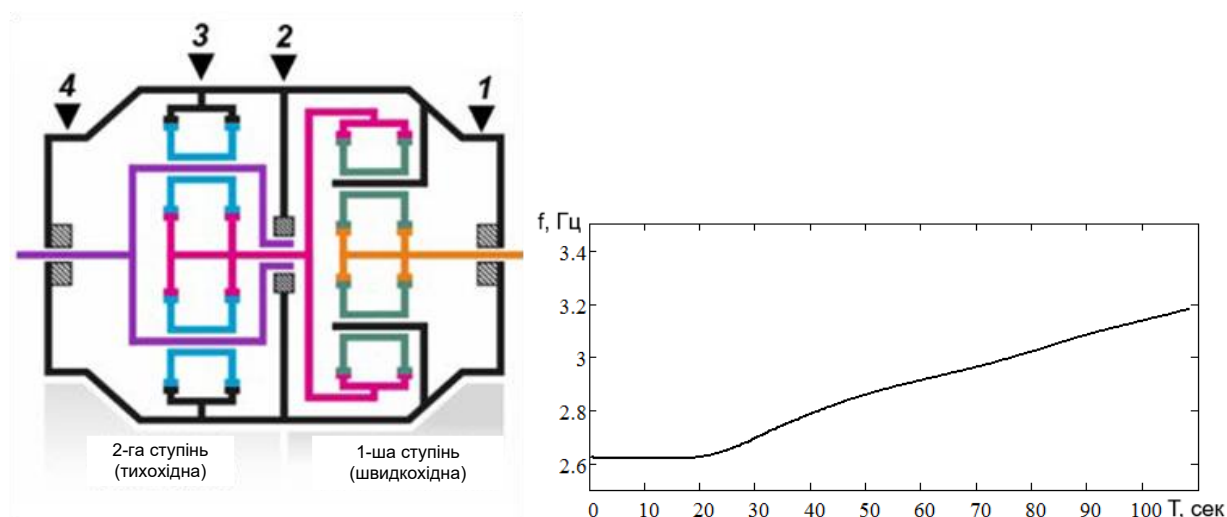


Рисунок 4.9 – Кінематична схема корабельного планетарного редуктора (ліворуч) та графік зміни його частоти обертання в процесі запису сигналу (праворуч) (Джерело: розроблено автором)

Основні характерні частоти вібрації редуктора наведено у таблиці 4.3. Для кожної частоти вказано відношення до частоти обертання вихідного тихохідного валу, на якому встановлено датчик оборотів.

Таблиця 4.3 – Характерні частоти планетарного редуктора (Джерело: розроблено автором)

Характерна частота	Позначення	Коефіцієнт
Частота обертання вихідного валу, водила другого ступеня	$F_{\text{вод2}}$	1
Частота обертання корони першого ступеня, проміжного валу, сонячної шестерні другого	$F_{\text{пв}}$	3,818
Частота обертання сателіту першого ступеня	$F_{\text{сат1}}$	10,08
Частота обертання вхідного валу	$F_{\text{сол1}}$	15,75
Зубцова частота першого ступеня	$F_{\text{зуб1}}$	155
Зубцова частота другого ступеня	$F_{\text{зуб2}}$	756

Для порівняльної оцінки проведено обчислення спектру та його автоматичний аналіз за допомогою апробованого способу до 18-ої секунди при відносно стабільній частоті обертання та після 18-ої секунди при її зміні.

Виходячи з того, що мінімальна частота обертання становить 2,62 Гц і перша гармоніка повинна потрапити мінімум у 8 смугу, задано частотне розрізняння спектра 0,25 Гц, три усереднення та верхня гранична частота 6,4 кГц, якої достатньо для охоплення двох-трьох перших гармонік максимальної характерної частоти $F_{зуб2} = 1\,980$ Гц.

Для виділення гармонійних складових над рівнем фону було обрано коефіцієнт порога K_p , що дорівнює 4 (12 дБ) відповідно до таблиці 3.2.

В отриманих спектрах виділені складові двох рядів ряди $F_{пв}$ та $F_{сол1}$ з великою кількістю вхідних гармонік. Спектр сигналу редуктора, виміряний у точці 2 при стабільній частоті обертання з вказаними гармонійними складовими, наведено на рис. 4.10 до 2 кГц, оскільки вищі гармоніки цих рядів не виявлено.

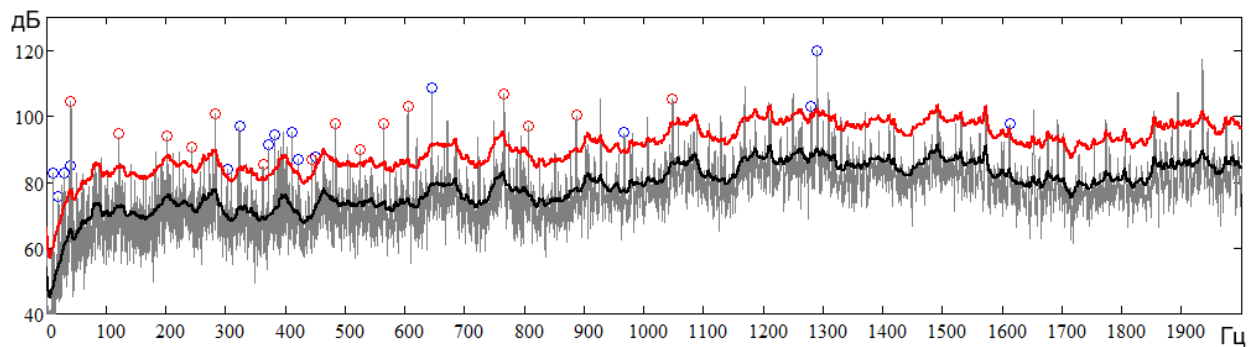


Рисунок 4.10 – Спектр суднового планетарного редуктора, гармоніки рядів $F_{пв}$ (синім) та $F_{сол1}$ (червоним) при стабільній частоті обертання
(Джерело: розроблено автором)

Спектр з такими самими параметрами, виміряний при девіації частоти обертання на 30-ій секунді, девіація частоти обертання за час вимірювання спектру (8 секунд), склала близько $devF = 3\%$ (частота, виміряна за допомогою датчика оборотів, змінилася з 2,66 Гц до 2,74 Гц).

Для порівняння низькочастотні фрагменти спектрів для стабільної та нестабільної частоти обертання наведено на рис. 4.11. Як видно з даних, наведених на рис. 4.11, гармонійні складові після 2-3 гармоніки частоти обертання проміжного валу спотворюються настільки сильно, що втрачають

форму і не можуть бути ідентифіковані, а третя гармоніка частоти обертання проміжного валу $F_{пв}$ і перша гармоніка частоти обертання сонячної шестерні $F_{сол1}$ першого ступеня виявлено з похибками більш допустимих.

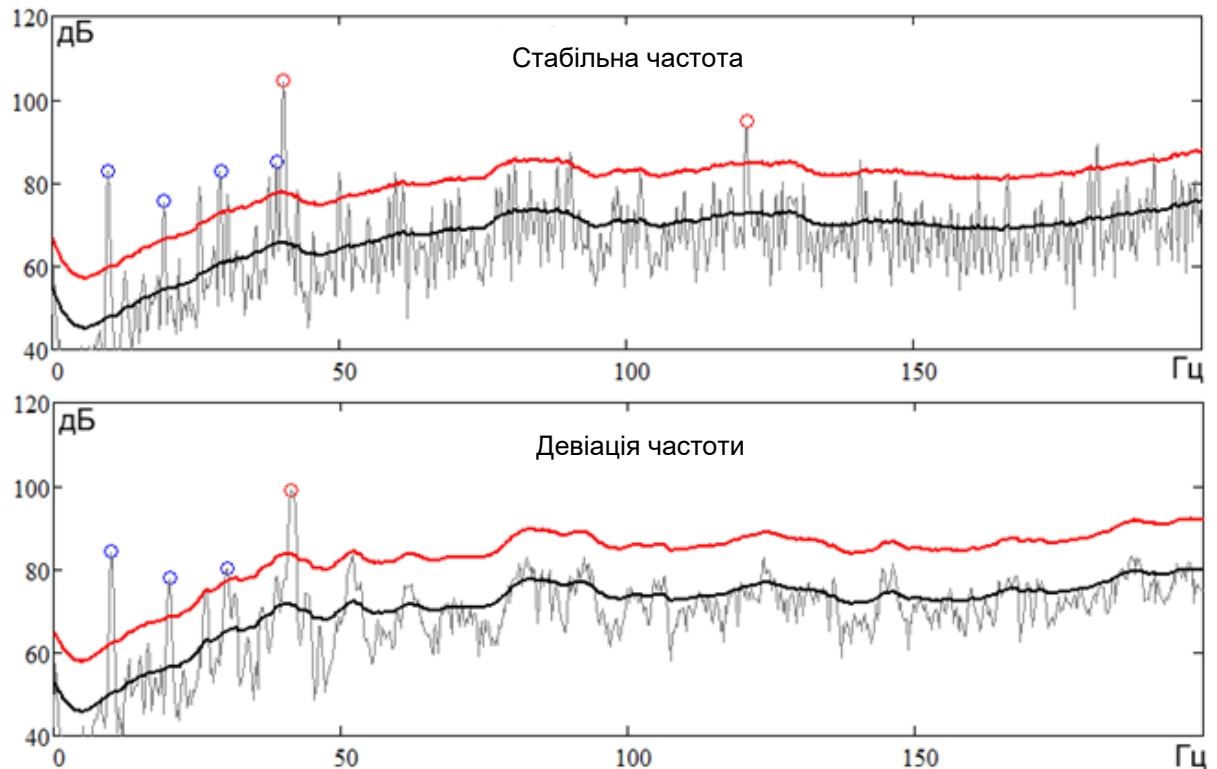


Рисунок 4.11 – Спектри суднового планетарного редуктора з ідентифікованими гармоніками, позначеними гармоніками, кратними $F_{пв}$ (синій) та $F_{сол1}$ (червоний)
(Джерело: розроблено автором)

Виходячи з того, що гармоніку $2F_{пв}$ можна вважати ідентифікованою, був зроблений висновок про допустимість девіації частоти гармоніки на $2,4 df$, за формулою (4.1), при конкретному законі зміни частоти та зазначених параметрів вимірювання:

$$dN = \frac{F_g \times devF}{df} = \frac{20.1 \times 0.03}{0.25} = 2.4df, \quad (4.1)$$

де F_g – частота гармоніки, Гц;

$devF$ – зміна частоти обертання;

df – частотна роздільна здатність спектра.

Результат аналізу з тими ж налаштуваннями спектрів інших агрегатів дав досить суттєвий розкид оцінки межі зміни частоти гармоніки для її надійної ідентифікації, приблизно від 2 до 6 df .

Такий розкид викликаний різним характером нестабільності частоти обертання. Так, на машинах з великою інерцією ротора (кількість яких переважає) частота змінюється плавно за законом, близьким до лінійного або квадратичного. У цьому випадку гармоніки при розширенні до $6df$ не втрачають форму. При складніших законах, наприклад, під час роботи нелінійних систем автоматичного регулювання, навіть невеликі зміни можуть критично спотворити форму високочастотних компонентів. При стрибкоподібних змінах часто з'являється ефект хибних гармонік (роздування), в якому одна й та сама складова під час виміру займає кілька майже фіксованих положень.

Як було відмічено в п. 3.1.2 дисертаційної роботи, щільність гармонік набагато вища в низькочастотній частині спектру вібрації типової роторної машини і падає зі зростанням частоти. Тому доцільно застосовувати високу частотну роздільну здатність тільки для обмеженого частотного діапазону.

Гармоніки на високих частотах при нестабільній частоті обертання доцільно ідентифікувати за спектром з невеликим часом вимірювання і, відповідно, з низьким частотною роздільною здатністю відповідно до способу обробки групи спектрів, запропонованому в п. 3.1.2 (рисунок 3.15).

Аналіз експериментальних даних засвідчив достатність застосування до трьох спектрів з частотною роздільною здатністю, що відрізняється між крайніми спектрами до 16 разів. Застосування даного способу апробуємо на сигналі, записаному в точці 1 розглянутого вище планетарного редуктора в режимі, в якому швидкість зміни частоти знаходилися в межах 0,01% за секунду. З метою оцінки роботи алгоритму одночасно були обчислені 3 спектри з частотною роздільною здатністю 0,25, 1 та 4 Гц, з 3 усередненнями та з однаковими граничними частотами 25 600 Гц (рисунок 4.12).

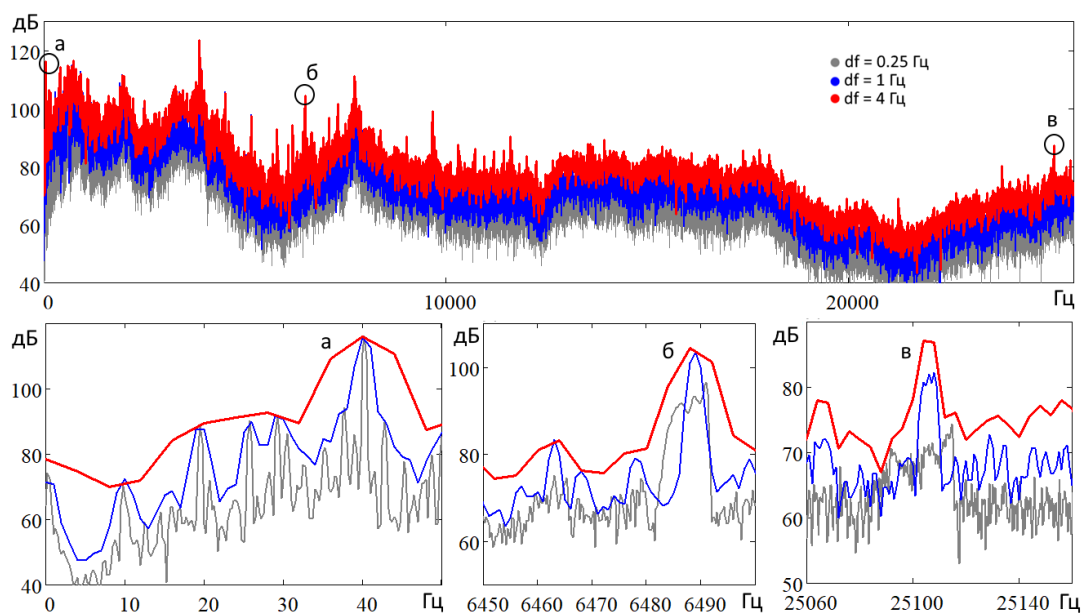


Рисунок 4.12 – Спектри суднового планетарного редуктора з різною частотною роздільною здатністю, виміряні одночасно
(Джерело: розроблено автором)

З рисунка 4.12 видно, що для поділу гармонік у низькочастотній ділянці підходить $df = 0,25$ Гц. Проте, при такому частотному розрізненні гармоніки у високочастотній та середньочастотній ділянці або сильно спотворюються (див. частоти близько 6 кГц), або «розтікаються» на фоні (див. гармоніку у районі 25,1 кГц). Для гармонік в районі 6 кГц при цьому цілком підходить $df = 1$ Гц, але для гармоніки близько 25,1 кГц ця частотна роздільна здатність також призводить до сильного спотворення форми. Тому у високочастотній ділянці потрібно $df = 4$ Гц.

Розглянемо графік залежності ширини ліній від частоти, побудовані за результатами обробки спектрів, наведених на рис. 4.12, запропонованим способом (рис. 4.13). Взявши до уваги допустиму відносну ширину гармоніки $Hg = 1,5$, відповідно отриману вище $dN = 2,5df$, можна зробити висновок, що гармоніки приблизно до 400 Гц допустимо ідентифікувати за спектром з $df = 0,25$ Гц, гармоніки приблизно до 7 кГц – за спектром з 6 Гц, гармоніки з вищою частотою спектру – з $df = 4$ Гц. Таким чином, для спектрів, крім останнього, достатньо обчислювати обмежену кількість смуг.

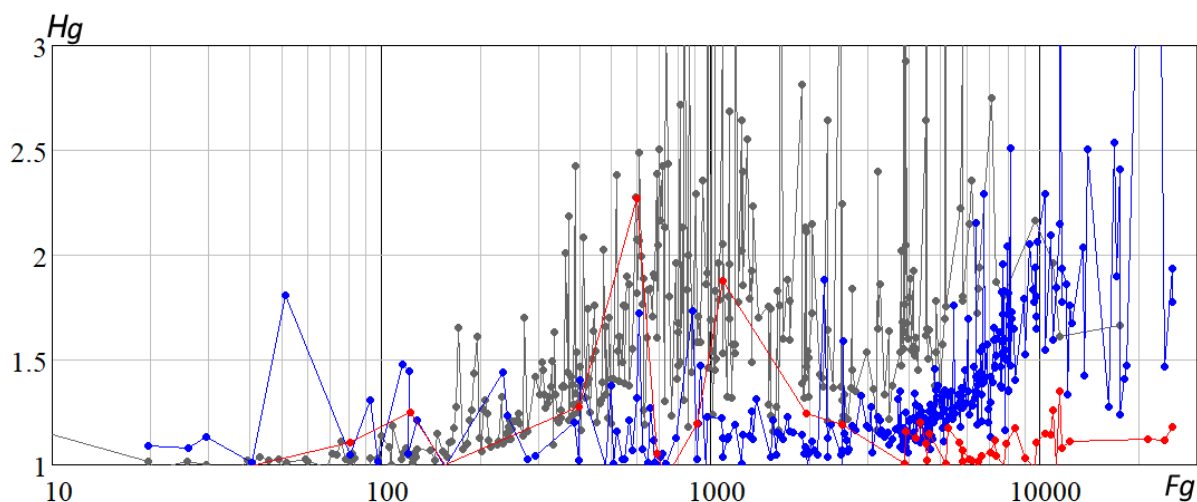


Рисунок 4.13 – Залежність Hg від Fg складових, виділених із спектрів суднового планетарного редуктора
(Джерело: розроблено автором)

Для агрегатів з аналогічною необхідною частотною роздільною здатністю і більшою нестабільністю частоти обертання необхідно знизити кількість усереднень і граничні частоти перших спектрів.

Аналогічний аналіз інших сигналів розглянутого редуктора та інших роторних машин, у тому числі тих, що входять до складу ГЕУ з різним спектральним складом, також засвідчив застосування запропонованого методу, який є альтернативою синхронним або порядковим спектрам і може використовуватися за відсутності датчика положення валу або наявності незв'язаних жорстких валів. При тому, що навіть за наявності можливості вимірювання положення валу, використання систем автоматичної стабілізації частоти обертання часто викликає різку зміну рівня та частоти, що призводить до розширення гармонійних складових при синхронній з положенням валу дискретизації.

В ході апробації методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів проведено дослідження залежності похибки визначення параметрів гармонійної компоненти спектра від перевищення її рівня над фоном та від рівня девіації частоти обертання за допомогою спектрів модельних сигналів та спектрів, виміряних на реальному роторному судновому обладнанні.

У результаті підтверджено ефективність запропонованого методу, доведено його перевагу перед контрольним методом, що використовує поправки в залежності від відношення величин двох максимальних спектральних відліків, отримано параметри алгоритму, що дозволяють проводити ідентифікацію гармонійних компонентів з похибкою, що вимагається з метою діагностики.

Також проведена апробація способу обробки групи одночасно виміряних спектрів з різним df , яка показала можливість ідентифікації параметрів компонент різної природи в умовах суттєвої нестабільності частоти обертання агрегату без застосування синхронного методу з положенням валу вибірки, недоступного або неефективного для деяких типів судових роторних машин.

Крім цього, розроблений метод показав ефективність при тестуванні в натурних умовах та експлуатації на реальних об'єктах систем із запровадженими запропонованими рішеннями.

4.2 Апробація та рекомендації до застосування методу автоматичної адаптації порогових значень

4.2.1 Порядок апробації розробленого методу

Перевірка ефективності методу побудови порогів, як частини методу адаптації порогових значень, описаного в попередньому розділі дисертації, проведена способом математичного моделювання перехідних процесів у вібраційному сигналі. Цей спосіб дозволяє розглянути широкий перелік можливих ситуацій, включивши моделі, які якісно відповідають часовим трендам, отриманим на реальному судовому та промисловому обладнанні.

З позиції вібраційного моніторингу ключовою відмінністю змін параметрів вібрації, пов'язаних з природними перехідними процесами, від

За заданими параметрами для кожної сукупності розраховуються граничні точки послідовності тенденцій. При цьому кожна наступна точка з ймовірністю p може бути побудована з урахуванням наявності перехідного процесу, спрямованого протилежно попередньому, або з ймовірністю $(1 - p)$ перехідний процес може бути відсутнім, при цьому гранична точка вибирається на рівні попередньої точки.

Точки будуються так, що їх відстані один від одного по осі часу відповідають нормальному розподілу із середнім \bar{T} та СКВ σ_T , а відхилення точок від середнього значення M по осі значень параметра відповідає нормальному розподілу із середнім значенням \bar{L} та СКВ σ_L .

За згенерованими точками відбувається інтерполяція проміжних точок з кроком часу dT_0 за допомогою кубічної сплайн-інтерполяції, в результаті чого для кожної сукупності перехідних процесів розраховується відповідний сигнал. Далі сигнали підсумовуються між собою та сигналом випадкових флуктуацій, відповідних нормальному закону розподілу із заданим СКВ σ_S , який характеризує природний випадковий розкид параметра.

Для імітації деградації стану можна задати експоненційне зростання з постійної τ із заданого часу T_0 . Швидкість деградації цього зростання порівнювалася зі швидкістю перехідних процесів шляхом оцінки відповідних постійних τ_0 часу. Для групи перехідних процесів τ_n оцінювалася як постійна часу експоненційного зростання від точки $(0; M - \bar{L})$ до точки $(\bar{T}; M + \bar{L})$:

$$\tau_n = \bar{T} \ln \left(\frac{M + \bar{L}}{M - \bar{L}} \right)^{-1}. \quad (4.2)$$

У ході апробації запропонованого методу за допомогою генератора перехідних процесів був сформований широкий перелік модельних сигналів (більше 100) з різним числом сукупностей перехідних процесів (до трьох) і параметрами перехідних процесів. Для кожного такого сигналу наприкінці задавалося зростання різної постійної часу.

Результати розробленого методу адаптації порогових значень (апробований метод) порівнювалися зі стандартним методом розрахунку порога (контрольний метод), який можна сформулювати так. Як базове значення використовується середнє, поріг встановлюється на рівень 3 СКВ від базового значення, при цьому середнє значення та СКВ визначаються за тривалий час спостереження, що включає всі можливі перехідні процеси (розглядався відрізок часу з початку спостереження до початку деградації).

Для адаптації порогових значень застосовувався метод, що повністю відповідає описаному в розділі 2 з наведеними далі налаштуваннями:

- кількість накопичувачів: 4;
- розмір накопичувачів: 64 значення;
- періодичність передачі: раз на 32 кроки;
- базове значення – середнє з 8 мінімальних;

Для контрольного методу та першого накопичувача апробованого методу (до якого потрапляють вихідні дані) застосовувався метод трьох збігів для виключення перевищень порога випадковим викидам у сигналі, тобто факт перевищення фіксувався за наявності трьох перевищень поспіль.

Відсутність подібної поправки призводить до появи значної кількості помилкових спрацьовувань. Причому при використанні контрольного методу з урахуванням підтверджень такі спрацьовування на сигналі з нормальним розподілом відбуваються приблизно в 7 разів частіше, ніж при використанні розробленого методу, що свідчить про завищення порогів апробованого методу і, отже, підвищення ефективності контрольного методу для гарантії коректності порівняльної оцінки

У результаті обробки широкого переліку модельних сигналів підібрано три типових ситуацій, що характеризуються певним якісним результатом порівняння апробованого та контрольного методу. Аналіз сигналів, відповідних даним типовим сигналам, наводиться нижче.

4.2.2 Апробація методу на типових сигналах

Типовий сигнал №1.

Особливості сигналу: перехідних процесів немає або рівень їх флуктуацій нижче за рівень випадкових. Як приклад сигналу з наведеними особливостями розглянуто сигнал з нормальним розподілом з $M=10 \text{ м/с}^2$, $\sigma_s=0,5 \text{ м/с}^2$ та зростанням з постійною $\tau_\theta = 4$ години з початком в $T_\theta=20\,000 \text{ с}$. За допомогою контрольного методу перевищення було виявлено в момент часу $T_k = 201\,349 \text{ с}$, а за допомогою апробованого $T_a = 200\,383 \text{ с}$, тобто приблизно 3 рази (на 71%) раніше від початку деградації (рис. 4.15, 4.16).

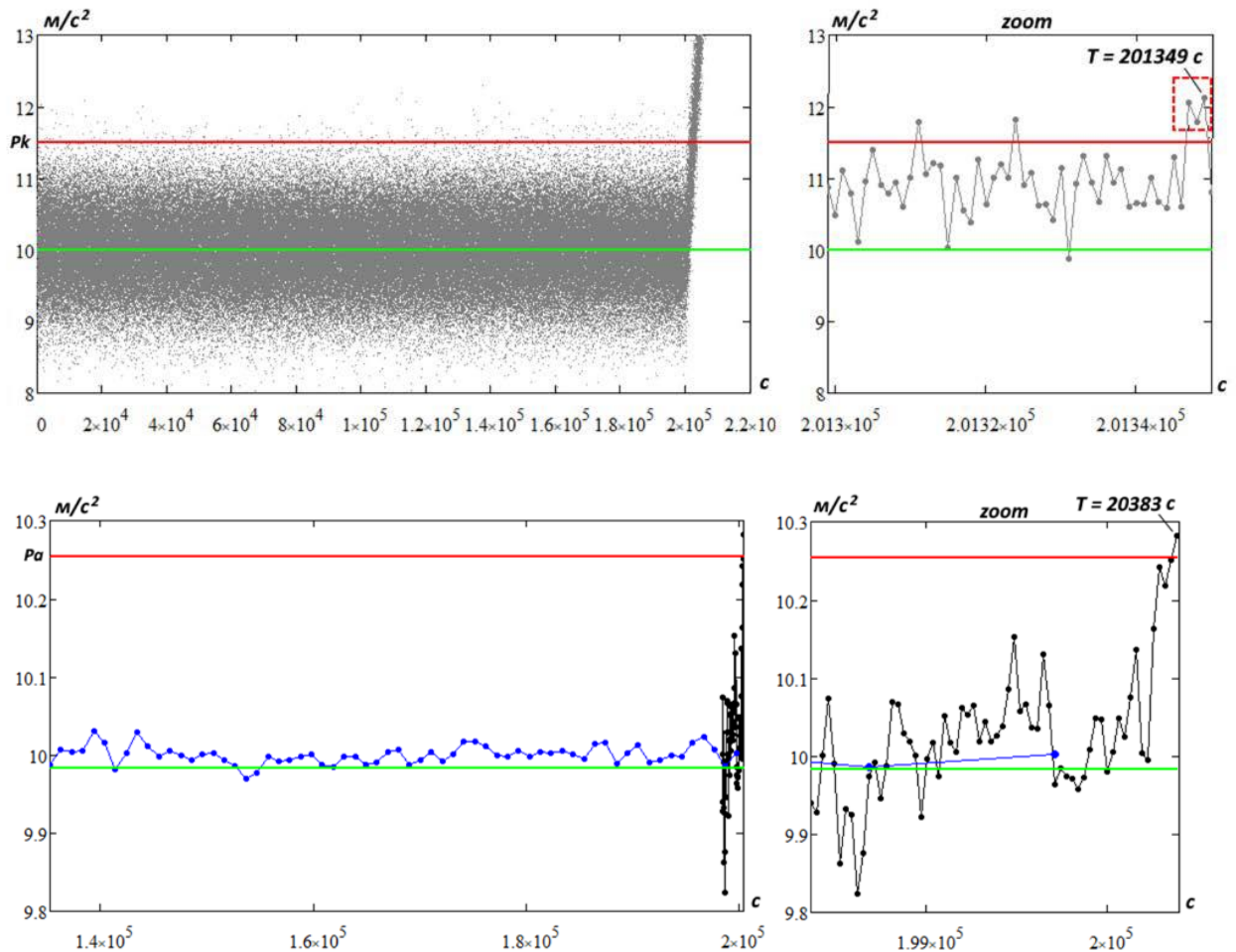


Рисунок 4.15 – Обробка сигналу з нормальним законом розподілу:

контрольний (згори) та апробований (знизу) метод

(Джерело: розроблено автором)

На даних рисунках зеленим позначені базові лінії, червоним – порогові значення, отримані за допомогою контрольного методу (Pk) та апробованого (Pa), сірим – вихідні дані, чорним та синім – дані в накопичувачах №2 та №3 відповідно в момент часу Ta .

За результатами аналізу результатів обробки сигналів з подібними якісними особливостями встановлено, що за допомогою запропонованого методу небезпечний стан виявляється значно раніше в залежності від характеру сигналу (рівня розкиду) та швидкості деградації. Це пов'язано з тим, що в усередненні випадкових флуктуацій розкид зменшується приблизно на порядок від накопичувача до накопичувача, що зумовлює збільшення точності виявлення зростання лише на рівні зниженого розкиду.

Подібна тенденція (відсутність значних перехідних процесів) спостерігається в сигналах обладнання при роботі в одному температурному режимі та з одним навантаженням без істотного впливу інших факторів і характерна більше для промислових умов, ніж суднових.

Типовий сигнал №2.

Особливість сигналу: швидкість деградації можна порівняти або вона є нижче швидкості перехідного процесу з найбільшим інтервалом флуктуацій, рівень яких перевищує рівень випадкового розкиду. Як приклад сигналу з наведеними особливостями розглянуто сигнал з такими параметрами генерації: $M = 10 \text{ м/с}^2$, $\sigma_s = 0,25 \text{ м/с}^2$; перша сукупність перехідних процесів: $\bar{L} = 1 \text{ м/с}^2$, $\sigma_L = 0,5 * \bar{L}$, $\bar{T} = 256 \text{ с}$, $\sigma_T = 0,1 * \bar{T}$; друга сукупність перехідних процесів: $\bar{L} = 0,5 \text{ м/с}^2$, $\sigma_L = 0,5 * \bar{L}$, $\bar{T} = 8192 \text{ с}$, $\sigma_T = 0,1 * \bar{T}$, деградація: $\tau d = 1 \text{ год}$, $Td = 20\,000 \text{ с}$.

У цьому сигналі швидкість деградації нижче середньої швидкості зміни першої сукупності перехідних процесів ($1/\tau_d < 1/\tau_n$) з максимальним інтервалом змін. У ході обробки даного сигналу за допомогою контрольного методу перевищення було виявлено в момент часу $Tk = 201\,322 \text{ с}$, а за допомогою апробованого $Ta = 201\,297$, тобто на 25 с раніше (рис. 4.16, 4.17), позначення такі самі, як на рисунках 4.14, 4.15. Дане значення часу становить близько 0,4% від постійного часу деградації, що є несуттєвою різницею.

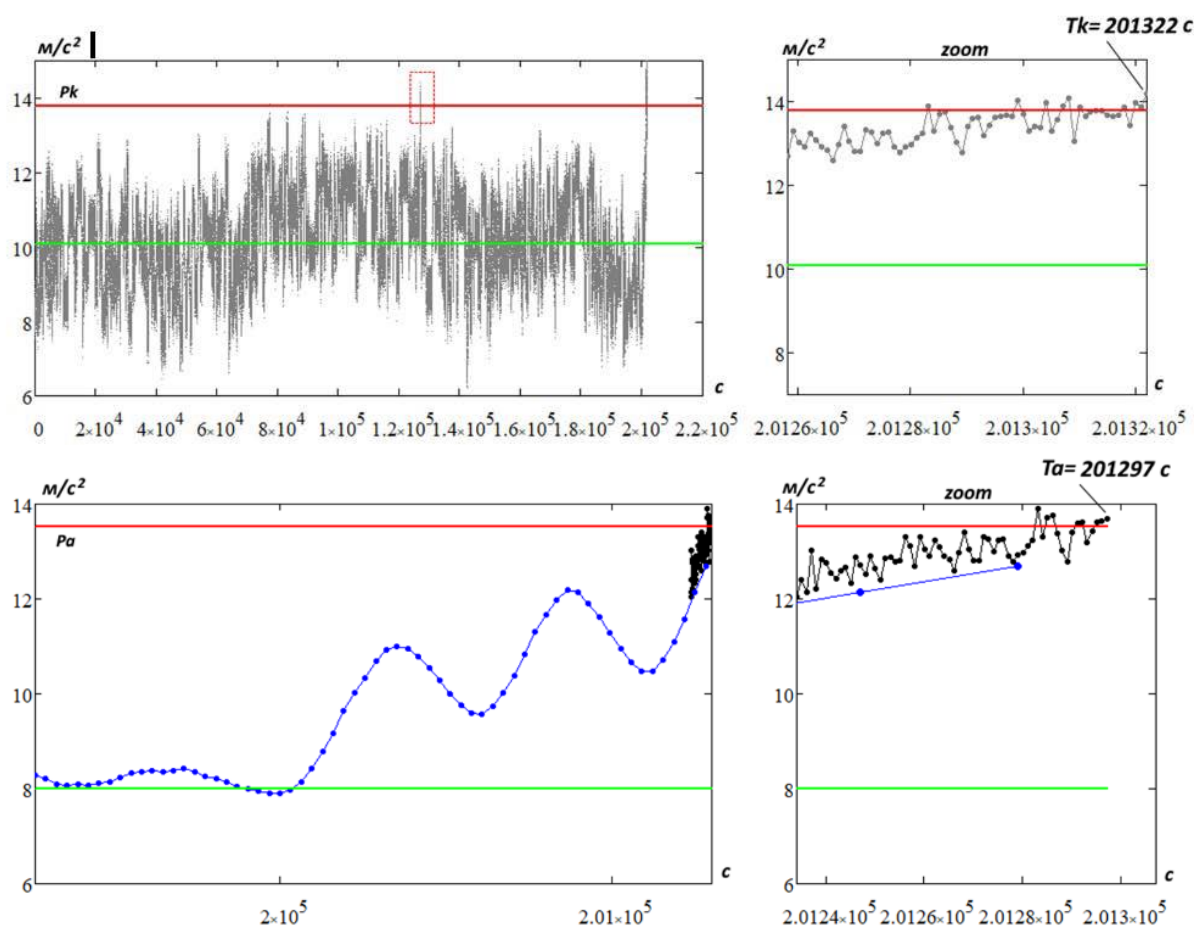


Рисунок 4.16 – Обробка сигналу зі швидкістю деградації меншої швидкості типового перехідного процесу з максимальним інтервалом флуктуацій:

контрольний (згори) та апробований (знизу) метод

(Джерело: розроблено автором)

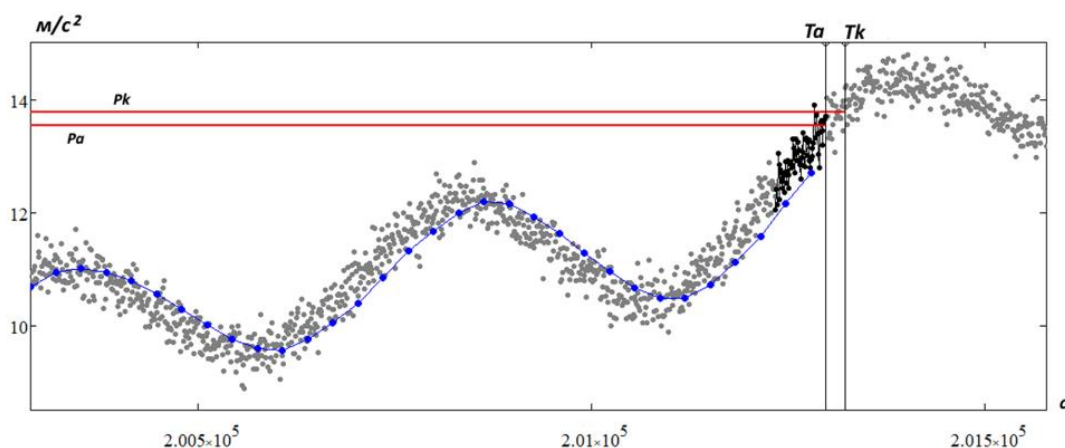


Рисунок 4.17 – Обробка сигналу зі швидкістю деградації меншою швидкості типового перехідного процесу з максимальним інтервалом флуктуацій:

порівняння контрольного та апробованого методів

(Джерело: розроблено автором)

Аналіз результатів обробки сигналів з такими якісними особливостями показав, що за допомогою запропонованого методу зміна стану виявляється приблизно в той же час, що і за допомогою контрольного. При ще нижчих швидкостях деградації спостерігається несуттєве запізнення методу, що апробується, порівняно з контрольним (до 2% τ_d), що пояснюється затримкою (зміщенням) сигналу при його усередненні (згладжуванні).

У деяких сигналах контрольний метод дає хибне визначення події, як це показано на рис. 3.17 (хибне перевищення позначено червоним прямокутником). Порівняний час реакції, характерний для подібних сигналів, пояснюється тим, що максимальні повільні флуктуації визначають загальний розкид сигналу, і, відповідно, призводять до аналогічних значень порогів.

Типовий сигнал № 3.

Особливості сигналу: швидкість деградації значно перевищує швидкість перехідного процесу з найбільшим інтервалом флуктуацій, причому рівень випадкового розкиду менше заданих монотонних флуктуацій.

Розглянемо сигнал, з такими параметрами:

$$M = 10 \text{ м/с}^2, \sigma_s = 0.25 \text{ м/с}^2;$$

перша сукупність перехідних процесів:

$$\bar{L} = 0.25 \text{ м/с}^2, \sigma_L = 0.5 \bar{L}, \bar{T} = 256 \text{ с}, \sigma_T = 0.1 * \bar{T};$$

друга сукупність перехідних процесів:

$$\bar{L} = 1 \text{ м/с}^2, \sigma_L = 0.5 * \bar{L}, \bar{T} = 8192 \text{ с}, \sigma_T = 0.1 * \bar{T}$$

деградація: $\tau_d = 2 \text{ год}$, $T_d = 20000 \text{ с}$.

У цьому сигналі швидкість деградації значно перевищує середню швидкість перехідних процесів ($1/\tau_d > 1/\tau_n$) з максимальним інтервалом флуктуацій (№2). При обробці даного сигналу за допомогою контрольного методу перевищення було виявлено в момент часу $T_k = 201\,765 \text{ с}$, а за допомогою апробованого $T_a = 200\,756$, тобто на 16 хвилин раніше (рис. 4.18, 4.19), позначення такі самі, як на рис. 4.16, 4.17. Ці значення становить близько 13% від постійної часу деградації та відповідає скороченню часу виявлення зміни стану з початку деградації більш ніж у 2 рази (на 57%).

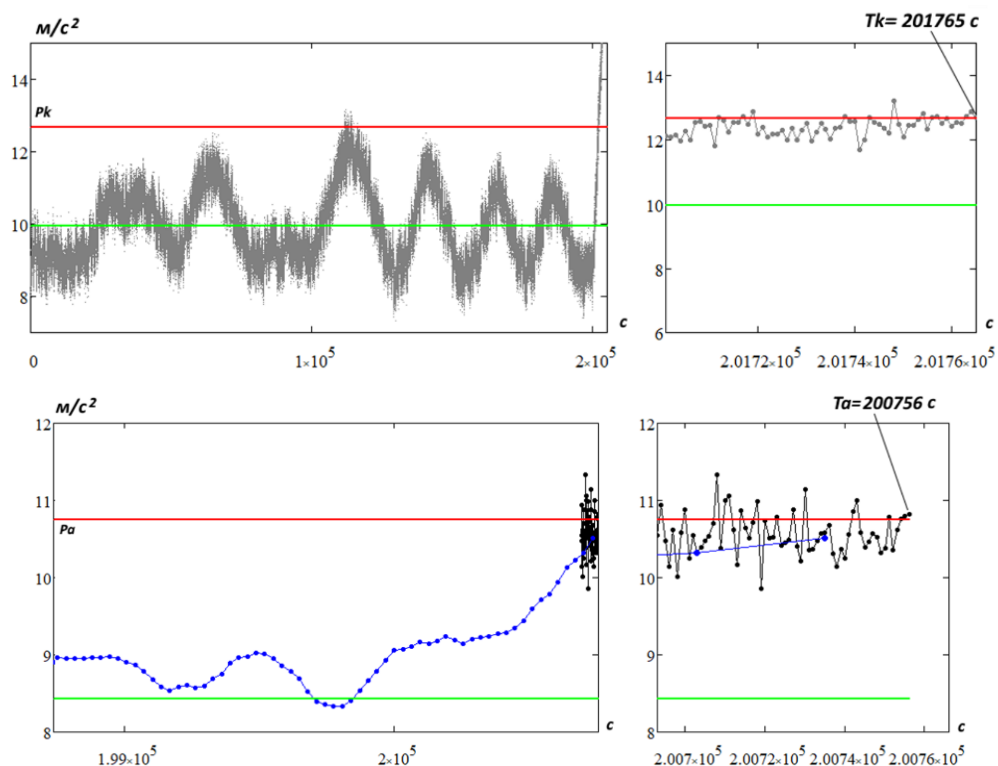


Рисунок 4.18 – Визначення зміни стану на сигналі зі швидкістю деградації більшої швидкості типового перехідного процесу з максимальним інтервалом флуктуацій: контрольний (згори) та апробований (знизу) метод
(Джерело: розроблено автором)

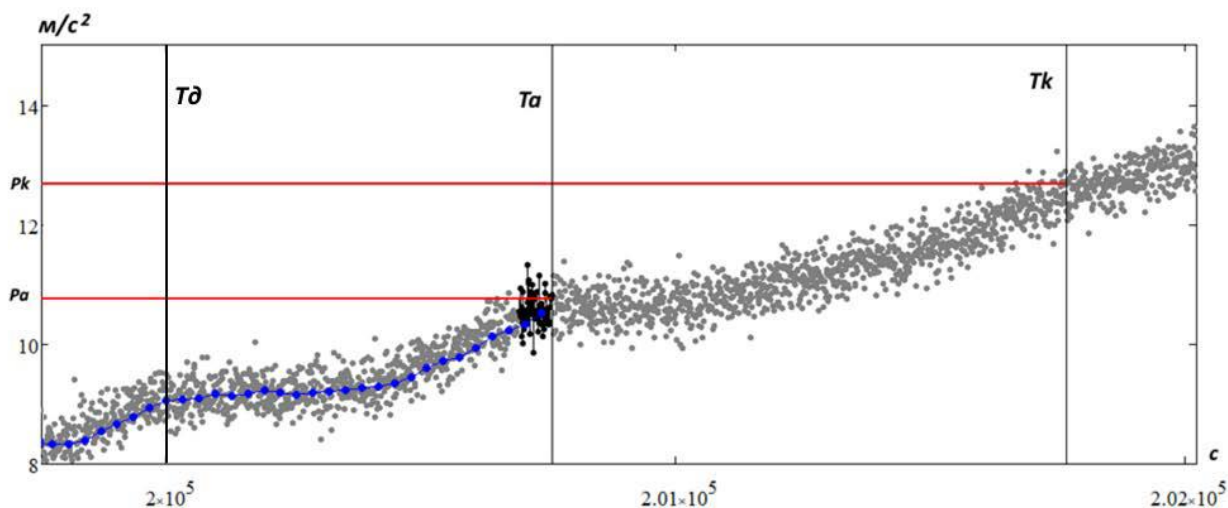


Рисунок 4.19 – Визначення зміни стану на сигналі зі швидкістю деградації більшої швидкості типового перехідного процесу з максимальним інтервалом флуктуацій: порівняння контрольного та апробованого методів
(Джерело: розроблено автором)

При обробці сигналів з подібними якісними особливостями встановлено, що за допомогою розробленого методу небезпечний стан виявляється раніше залежно від різних умов – швидкості деградації, співвідношення інтервалів змін перехідних процесів та рівня випадкових флуктуацій.

При швидкості деградації, що істотно перевищує середню швидкість перехідних процесів з максимальним інтервалом зміни, що значимо перевищує рівень природного розкиду, запропонований метод дозволяє підвищити швидкість реакції на зміну стану більш ніж у 2 рази, що є суттєвим результатом, який дозволяє заздалегідь прийняти управлінські рішення для запобігання аварійно небезпечним.

У ході порівняння стандартного та розробленого методу встановлено, що розроблений метод дозволяє виявляти зміну стану або в аналогічний момент часу або раніше, ніж стандартний підхід. Особливо ефективний результат отримано для сигналів без перехідних процесів та для високих швидкостей деградації, які перевищують швидкості максимальних за рівнем флуктуацій, що є важливим при оперативному контролі з метою управління відповідальним обладнанням.

4.2.3 Оцінювання ефективності прогнозу із застосуванням розробленого методу

Для перевірки ефективності способу прогнозування, що входить до складу методу адаптації порогових значень, використані часові тренди параметрів вібрації різного суднового та промислового обладнання.

Аналіз двох характерних часових трендів наведено далі, перший з яких отримано в ході випробувань підшипників суднового електродвигуна і взятий із стороннього незалежного джерела [14], другий часовий тренд отриманий на газотурбогенератор і відповідає деградації об'єкта аж до передаварійного стану, викликаного фарбуванням зуба редуктора.

Часовим трендам відповідають виміряні значення рівня вібрації, з характерними для контрольованих об'єктів смугами частот.

Апробованим є спосіб апроксимації з використанням ортогональних поліномів, наведений у п. 2.4 (включаючи визначення точки зміни тенденції, див. п. 2.3) як контрольні способи прогнозування використані такі способи, що зарекомендували себе, що застосовуються для прогнозування технічного стану суднового обладнання:

1) апроксимація за допомогою експонентів, метод найменших квадратів (МНК). Аргументація вибору: деградація технічного стану часто викликає близьке до експонентного зростання вібропараметрів. Численні акти руйнування різних механізмів агрегатів, досліджені шляхом аналізу трендів вібропараметрів, мають експоненційний характер розвитку [19];

2) апроксимація з використанням згладжування за допомогою І-оператора та L-оператора Соболева з кратністю інтегралів $k = 1$ або 2. Аргументація вибору: метод успішно застосовується для прогнозування технічного стану суднового енергомеханічного обладнання.

Для визначення точки зміни тенденції використовувалися такі параметри:

- 1) початкова довжина тренду $n_0 = 7$, крок перерахунок тренду $h_s = 1$;
- 2) перегин, $m_a = 5$, $P_a = 3$, див. формулу (4.3);
- 3) розкид, $m_b = 7$, $P_b = 3$, див. формулу (4.4);
- 4) стрибок, $m_v = 3$, $P_v = 6$, див. формулу (4.5).

Розглянемо перший експериментальний тренд, наведений у табл. 4.4. Оскільки відповідно до наведених у п. 3.2 критеріїв точку зміни тенденції не виявлено (з урахуванням налаштувань, зазначених вище), можна прийняти, що даний тренд включає одну тенденцію. Тому апроксимація апробованим та контрольним способами проведена по всій довжині тренду, результати наведені на рис. 4.20 та у табл. 4.5.

Як порівняльний критерій використано значення середнього квадратичного відхилення σ експериментальних даних від значень тренду. При

цьому для апроксимації з використанням операторів Соболева наводиться спосіб згладжування, що дає найкраще (тобто найменше) значення σ .

Таблиця 4.4 – Вимірювання віброприскорення підшипників суднового електродвигуна (Джерело: розроблено автором)

t_i , місяці	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$x(t_i)$, дБ	87	83	84	80	82	85	86	89	86
t_i , місяці	18	20	22	24	26	28	30	32	34
$x(t_i)$, дБ	88	85	90	87	91	91	94	96	96

Таблиця 4.5 – Результати апроксимації тренду віброприскорення підшипників ГЕУ (Джерело: розроблено автором)

Спосіб апроксимації	Апроксимуючий поліном	σ
Експонента, МНК	$81,763 e^{4,101 \times 10^{-3} t}$	2,31
Згладжування за допомогою операторів Соболева	$x(t)=82,98 ch(0,01651t)$ (I-оператор, $k = 2$)	1,95
Розроблений спосіб	$x(t)=84,24-0,131x+0,0145x^2$	1,89

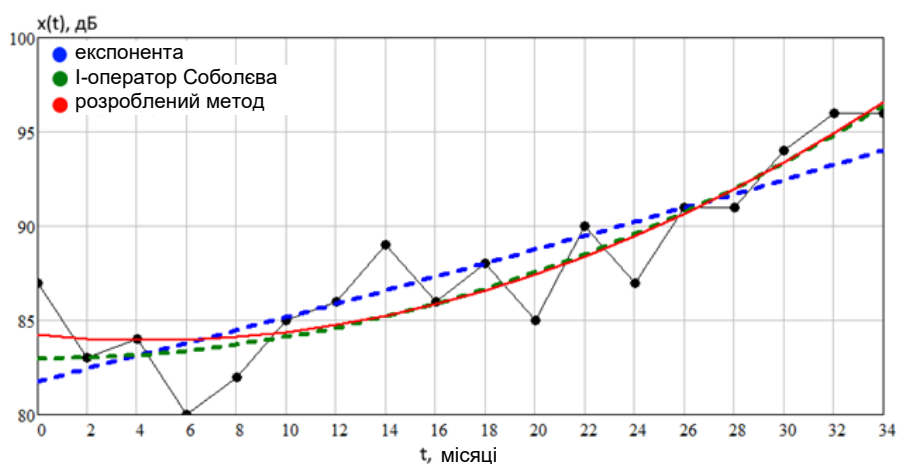


Рисунок 4.20 – Лінії трендів, отримані при апроксимації віброприскорення підшипників ГЕУ (Джерело: розроблено автором)

З проведеного аналізу даних випливає, що результат застосування розробленого способу прогнозування значно краще, ніж результат апроксимації експонентою та аналогічний результату, отриманий за допомогою операторів Соболева.

Розглянемо другий експериментальний тренд, отриманий за результатами дослідження газотурбогенератора з проміжним редуктором. На графічному представленні тренду, наведеному на рис. 4.21, чітко видно наявність зміни тенденції, якому відповідає відрив частини зуба коронки редуктора та її наступного викошування.

Відповідно до розробленого методу, точку зміни тенденції визначено за критерієм перегину, в момент часу $t = 19$ діб. Ділянка починаючи з зазначеної точки апроксимована апробованим та контрольними способами, результати наведені на рис. 4.21 та в табл. 4.6.

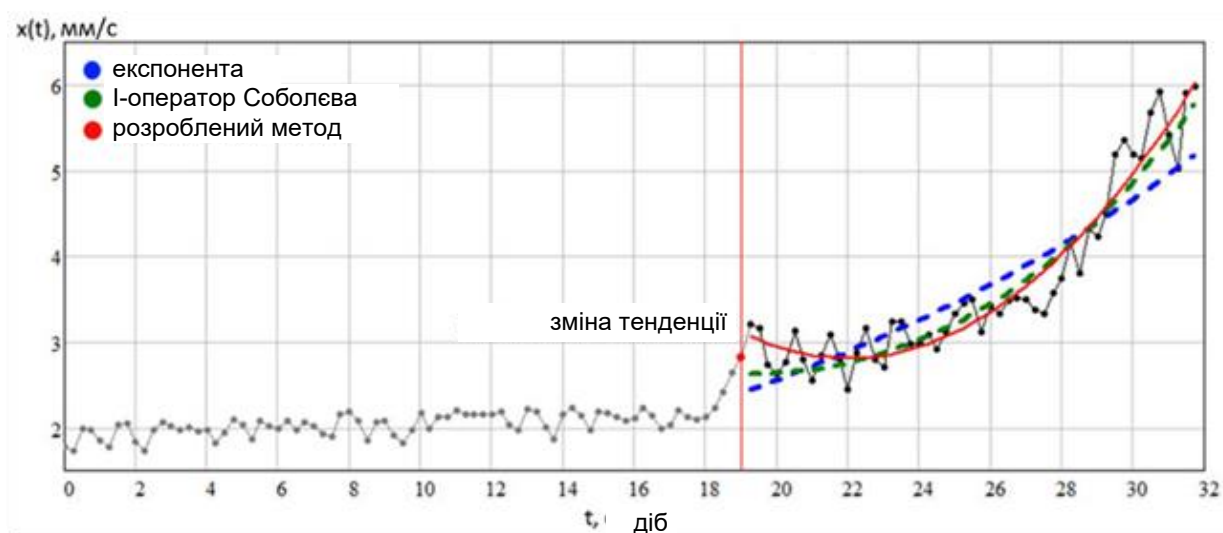


Рисунок 4.21 – Лінії трендів, отримані при апроксимації віброприскорення редуктора турбогенератора при відриві частини зуба корони редуктора та його подальшому викошуванні (Джерело: розроблено автором)

Таблиця 4.6 – Результати апроксимації тренду віброприскорення підшипників суднового електродвигуна (Джерело: розроблено автором)

Спосіб апроксимації	Апроксимуючий поліном	σ
Експонента, МНК	$0,7677e^{0,06019t}$	0,431
Згладжування за допомогою операторів Соболева	$x(t)=2,627ch(0,11411(t-t)_0)$ (I-оператор, $k=2$)	0,305
Апробований спосіб	$x(t)=19,21-1,491x+0,03386x^2$	0.266

Аналіз отриманих даних показує, що результат застосування апробованого способу значно краще, ніж результат апроксимації за допомогою експоненти і трохи краще результатів, отриманих за допомогою операторів Соболева.

Для перевірки доцільності апроксимації по ділянці даних від точки зміни тенденції зроблено порівняння результатів прогнозування апробованим способом, здійсненого на момент часу $x(t) = 26$ діб (приблизно середина інтервалу часу від початку деградації до аварійного зупинки) по всьому набору даних, що передують вибраному моменту часу (на рисунку 4.22 – синім) та за набором даних, починаючи від точки зміни тенденції до обраного моменту часу (на рис. 4.22 – червоним).

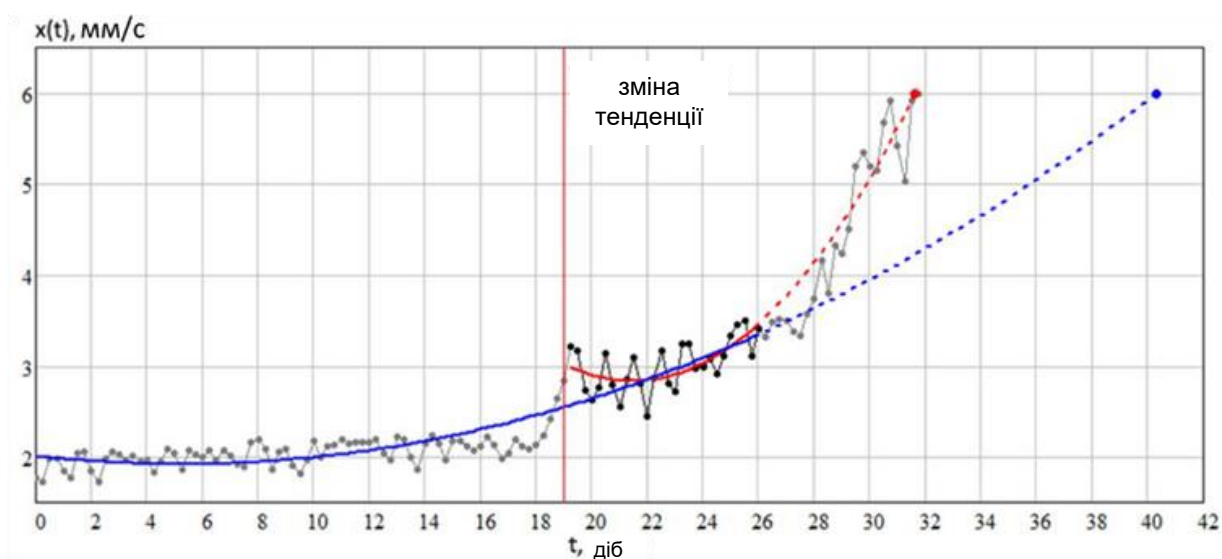


Рисунок 4.22 – Апроксимація даних з визначенням точки зміни тенденції (червоним) та без такого (синім)
(Джерело: розроблено автором)

В якості значення, відносно якого проведена оцінка відхилення прогнозу, використовується остання точка інтервалу, що розглядається. При цьому отримано такий результат: побудова тренду від точки зміни тенденції

дозволяє з високою точністю спрогнозувати час досягнення рівня останньої точки (помилка менше доби), а при побудові тренду за всією ретроспективною даних помилка становить більше 8 діб, причому прогноз є запізнілим, що може призвести до аварійно-небезпечної ситуації.

Ефективність запропонованого методу автоматичної адаптації порогових значень підтверджена, оскільки запропонований спосіб побудови порогів дозволяє істотно підвищити швидкість реакції на зростання, пов'язану з прискореною деградацією, а спосіб прогнозування дає кращий результат, ніж аналогічні способи.

При цьому доведено перевагу апроксимації на інтервалі, що відповідає останній тенденції. Крім зазначених результатів, метод довів ефективність при тестуванні в натурних умовах та експлуатації на реальних об'єктах систем із впровадженими запропонованих рішень.

4.3 Апробація комплексного методу вібродіагностики та обґрунтування конфігурації діагностичного модуля

4.3.1 Опис дефектів та формування діагностичної матриці

У п.п. 3.3 наведено опис методу реалізації автоматичного діагностування. Розробка діагностичних матриць для широкого переліку суднових типових агрегатів достатньо складне завдання.

Далі, як приклад, розглянемо складання діагностичної матриці дефектів для типового агрегату – повітродувки, що представляє собою осьовий консольний вентилятор у двох опорах, з'єднаний з приводним асинхронним двигуном за допомогою муфти.

Схема агрегату наведена на рис. 4.23, всі підшипники – ковзання.

З метою діагностування даного агрегату достатньо використовувати 4 точки контролю, встановлені на підшипникових щитах у радіальному

напрямку: підшипник вентилятора зі зворотного боку від муфти (T1), підшипник вентилятора з боку муфти (T2), підшипник двигуна з боку муфти (T3), підшипник двигуна зі зворотного боку від муфти (T4). Для контролю вібраційного стану за діючими стандартами та уточнення діагнозу в цих точках можуть використовуватися вимірювання в інших напрямках.

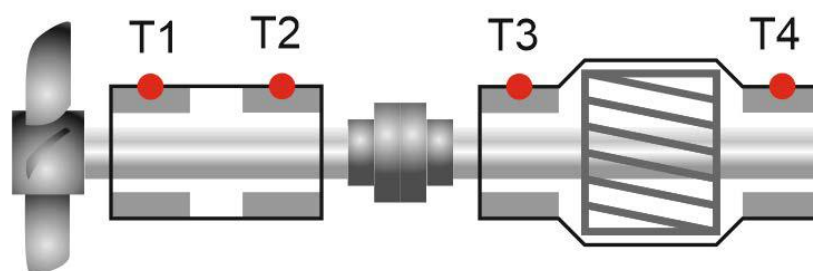


Рисунок 4.23 – Схема об'єкта контролю, із зазначенням точок контролю
(Джерело: розроблено автором)

Далі наведемо опис кожного з типових дефектів, обґрунтування конфігурації їх ознак. Цей опис є узагальненим і слугує для демонстрації простоти способу конфігурації діагностичних ознак. При цьому використовується обмежений перелік дефектів та мінімальний необхідний перелік діагностичних параметрів, а саме гармонійні ряди з характерними базовими частотами та 1/3-октавний спектр фону, параметри яких можуть бути отримані за допомогою способу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів, а також найпростішу реалізацію методу ударних імпульсів – обчислення пік-фактору.

Визначення порогових значень для зазначених параметрів та прогнозування їх досягнення має здійснюватися за допомогою методу автоматичної адаптації порогових значень.

Дисбаланс ротора (дефект №1) призводить до виникнення при обертанні відцентрової сили, що створює вимушені коливання роторів із деякою частотою обертання.

Тому дисбаланс визначається зростанням гармонійної складової

вібрації, що відповідає частоті обертання агрегату у всіх точках контролю.

При цьому деякі з дефектів, описаних далі, також можуть викликати зростання першої гармоніки частоти обертання в декількох точках контролю, тому для них ця ознака дисбалансу вказується як додаткова, у разі підтвердження високої ймовірності даних дефектів, ймовірність дисбалансу знижується відповідно до алгоритму діагностування.

Неспіввісність валів (дефект №2) призводить до появи і зростання обертальних навантажень, принаймні, двох опор обертання, в результаті яких з'являються полігармонічні коливання з частотами, кратними частоті обертання. При великій неспіввісності обертальних валів, навантаження можуть багаторазово перевищувати статичне, створюване силою тяжіння ротора, приводячи до зростання середньочастотної та високочастотної вібрації декількох перевантажених підшипникових вузлів. Отже, основною ознакою неспіввісності валів, що з'єднуються муфтами, є зростання вібрації відразу на кількох гармоніках частоти обертання. Додатковими ознаками є зростання середньочастотної випадкової вібрації та зростання вібрації на частоті обертання, оскільки дані ознаки можуть з'являтися через дефекти потоку або дефекту конкретного підшипника, а зростання вібрації на частоті обертання також є ознакою дисбалансу.

Дефекти потоку (дефект №3) призводять до підвищення сил аеродинамічного походження, що виникають внаслідок взаємодії елементів машини (робочого колеса та корпусу) з неоднорідним потоком.

Проходження лопатями неоднорідного потоку призводить до сильних флуктуацій підйомної сили лопаті, що призводить до зростання коливальних сил з частотами, кратними частоті лопаті.

Ці сили призводять до зростання навантажень на підшипникові вузли, що може призвести до зростання середньочастотної та високочастотної вібрації підшипників вентилятора.

Також при дефектах окремих лопатей та зміни характеру їх обтікання може з'являтися газодинамічна невірноваженість з ознакою, що відповідає

механічному дисбалансу. Тому зростання лопатевих гармонік є основною діагностичною ознакою, а зростання середньочастотної та високочастотної випадкової вібрації й вібрації на частоті обертання – додатковими ознаками.

Дефекти електромагнітної системи (дефект №4) впливають на електромагнітне поле в зазорі машини, змінні складові якої створюють коливальні сили та моменти, збуджуючі вібрацію статора та ротора.

Статичний ексцентриситет зазору, дефекти статора та несиметрія напруги живлення призводить до зростання коливальних сил на подвійній частоті напруги живлення. Динамічний (обертальний) ексцентриситет зазору призводить до зростання складових коливальних сил на зубцевих (пазових) частотах та їх модуляції частотою обертання двигуна. Часткове магнітне насичення активного сердечника через перевантаження двигуна та нелінійні спотворення напруги живлення призводить до зростання складових, кратних шостій гармоніці напруги живлення. Усі ці ознаки враховуються як основні.

Дефекти електромагнітної системи також можуть призводити до зростання обертальної складової в точках двигуна через електродинамічну нерівноваженість ротора. Ця ознака враховується як додаткова.

Дефект підшипника ковзання (дефекти № 5-8), насамперед, викликає:

- зміну властивостей сил тертя через зміну форми поверхонь тертя (вкладишів) або порушення умов подачі мастила в підшипник;
- виникнення мікроударів через розриви в масляному шарі підшипника та «сухими» ударами в підшипнику через зачеплення шийки валу за поверхню тертя вкладишів.

Подібні ознаки можуть бути викликані дефектами потоку та неспіввісності, але в їх виявленні використовується просторова ознака – наявність як основних, так і додаткових ознак на опорах обертання. При надійному виявленні даних дефектів дефекти підшипника нівелюються відповідно до алгоритму діагностування.

При значному зношуванні поверхонь кочення підшипників з'являється низькочастотна вібрація на гармоніках частоти обертання, причому

коливання можуть поширюватися на другий підшипник, розташований на цьому ж валу. Оскільки високочастотна вібрація різко згасає під час поширення, пік-фактор і випадкова високочастотна вібрація враховуються як основні ознаки, інші – як додаткові.

Усі ознаки описаних вище дефектів наведені у табл. 4.7. Коефіцієнти впливу за замовчанням дорівнюють одиниці та не вказуються, дані значення коригуються на реальному об'єкті з урахуванням досвіду діагностування його (або групи однотипних об'єктів) та впливу близько розташованих об'єктів.

Таблиця 4.7 – Діагностична матриця (Джерело: розроблено автором)

Ознака	Вентилятор		Двигун	
	T.1	T.2	T.3	T.4
1*Fобер	O1 Д2 Д3 Д5	O1 Д2 Д3 Д5	O1 Д2 Д4	O1 Д2 Д4
k * Fобер, k = 2 ... 6	O2 Д5	O2 Д5	O2	O2
k * Fл, k = 1 ... 3	O3		-	-
k*2*Fжив, k=1...3	-	-	O4	O4
k * Fзуб, k = 1 ... 3	-	-	O4	O4
1/3-октавний спектр фону 0.5 – 4 кГц (середньочастотна випадкова вібрація)	Д2 Д3 О5	Д2 Д3	Д2	Д2
1/3-октавний спектр фону (5 кГц-10 кГц) (високочастотна випадкова вібрація)	Д3 О5	Д3 -	-	-
Пік-фактор у октавній смузі 32 кГц	О5	-	-	-

Примітка: У таблиці 4.7 використовуються такі позначення характерних частот агрегату: Fобер – частота обертання валу, Fжив – частота мережі живлення, Fл – лопатева частота, Fз – зубцова частота двигуна. Основні ознаки позначаються буквою "О", додаткові - буквою "Д" із зазначенням номера дефекту.

Наведена діагностична конфігураційна таблиця в сукупності з розробленим способом автоматичної діагностики дозволяє враховувати як параметричні ознаки, так і просторовий вплив дефектів, а за рахунок поділу на основні й додаткові ознаки дозволяє ефективно виділяти більш ймовірні з

дефектів з простору станів, діагностичних ознак і значно спростити конфігурацію правил.

4.3.2 Рекомендації щодо впровадження розроблених рішень

Запропоновані у дисертаційній роботі рішення були впроваджені при створенні стаціонарних систем захисного моніторингу та оперативної діагностики ГЕУ водного транспорту. Дані системи адаптовані для суднового застосування та призначені для роботи на комп'ютерах з різними операційними системами (Windows, Linux та ін.), для яких доступна установка віртуальної машини Java.

Система моніторингу та діагностики є диспетчерською інформаційною системою, яка виконує такі функції як при установці на борту судна, так і при використанні в промислових умовах:

- безперервний моніторинг технічного стану обладнання в встановлених та перехідних режимах роботи;
- оперативна діагностика дефектів та прогноз залишкового ресурсу;
- надання інформації обслуговуючому персоналу у зручному для сприйняття вигляді.

Під час створення системи вирішено такі завдання:

- мінімізація кількості первинних датчиків, встановлюваних на агрегат;
- забезпечення автоматичного самоконтролю системи, аж до калібрування вимірювальних трактів;
- забезпечення онлайн доступу до результатів діагностики для екіпажу, а також експертів у будь-якій точці світу за наявності зв'язку через Інтернет;
- можливість обміну даними з іншими системами, логічне керування зовнішніми пристроями;
- робота системи без обслуговування під час плавання.

До складу системи входять вимірювальні перетворювачі вібрації,

датчики обертів, які також можуть використовувати сигнали інших первинних перетворювачів, таких як датчики струму і температури (рис. 4.24). Сигнали з первинних перетворювачів за допомогою модулів аналого-цифрового перетворення (МАЦП) оцифровуються та передаються у програмний модуль (ПМ) “Вимірювальна станція” для обчислення всіх необхідних параметрів. Набір МАЦП та комп'ютер із програмним забезпеченням (ПЗ) “Вимірювальна станція” утворюють модуль БІАС (блок аналізу електричних сигналів) для вимірювання параметрів.

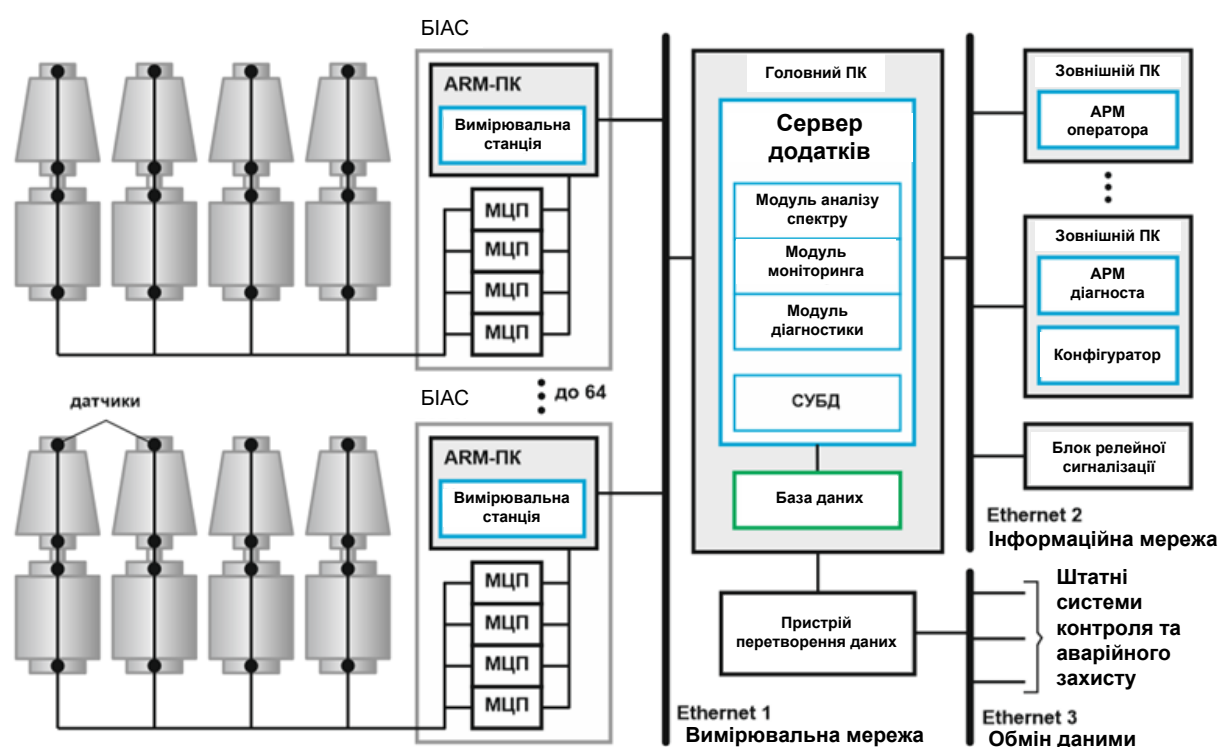


Рисунок 4.24 – Структура розподіленої системи контролю
(розроблено автором за матеріалами [44])

БІАС є вимірювально-обчислювальним пристроєм, здатним із заданою періодичністю (від 0,25 секунди) паралельно по всіх каналах проводити широкий перелік вимірювань – рівнів сигналу в стандартних смугах частот, широкосмугових спектрів, вузькосмугових спектрів сигналу та його огибаючої, пік-фактора та інших параметрів. Загальна кількість вимірювальних каналів у блоці – до 20, їх до 16 – канали виміру вібрації чи

струму, до 4 – канали виміру кута повороту ротора об'єкта контролю [44].

Обчислені параметри передаються в головне ПЗ системи “Сервер додатків”, де відбувається їх обробка. Програмний модуль “Сервер додатків” може встановлюватися як у комп'ютер БІАС у разі організації зосередженої системи обмежену кількість вимірювальних каналів, так і в окремий головний комп'ютер, а результати вимірювань передаються пакетами.

Програмний модуль “Сервер додатків” має два компоненти для аналізу діагностичних параметрів – модуль моніторингу і модуль діагностики. У модулі моніторингу здійснюється ідентифікація технічного стану за виявленими перевищеннями контрольованими параметрами порогових значень, для побудови яких використовується метод автоматичної адаптації порогових значень, типова кількість накопичувачів – чотири або п'ять зі швидкостями зміни стану порядку декількох хвилин, кількох годин, діб. Розмір та кількість накопичувачів підбирається виходячи зі специфіки умов експлуатації конкретного агрегату.

Ще одна функція модуля моніторингу – прогноз подальших змін стану за трендами контрольованих параметрів, яка також базується на запропонованому способі апроксимації з використанням ортогональних поліномів та знаходженням часових інтервалів, що характеризуються однією тенденцією (рис. 4.25). При виявленні події (перевищення порога) вся супутня їм інформація зберігається в окремому архіві, що дозволяє оцінювати характер локальних (неналагоджених) значень за весь час роботи системи.

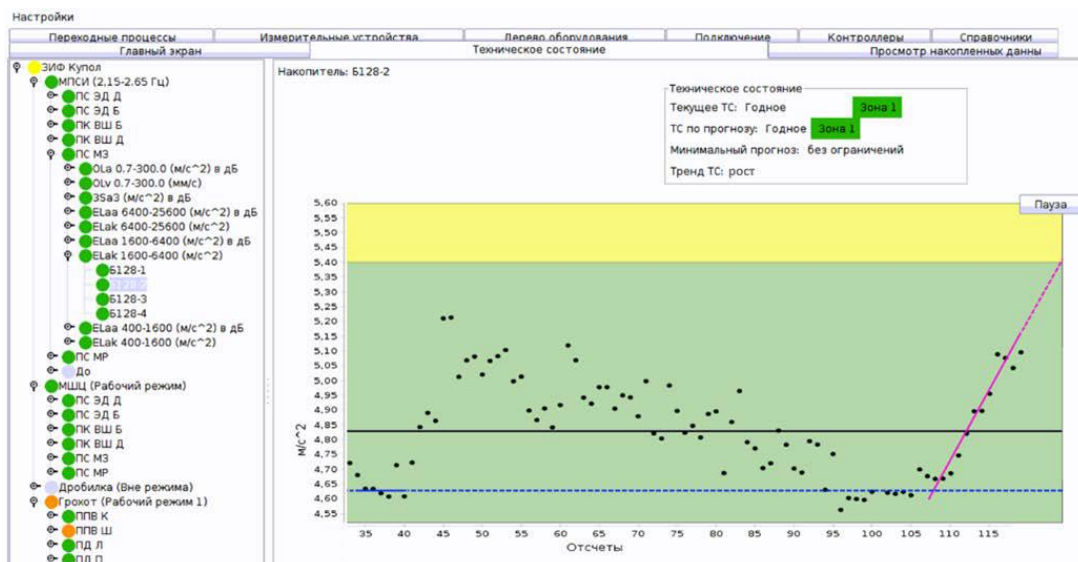


Рисунок 4.25 – Аналіз часового тренду в накопичувачі даних із побудовою лінії тренду за останньою тенденцією (Джерело: розроблено автором)

У модулі обробки спектрів проводиться виділення компонентів різної природи та оцінка їх параметрів, даний модуль побудований на базі методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів та доповнений алгоритмами з ідентифікації гармонійних рядів (рис. 4.26).

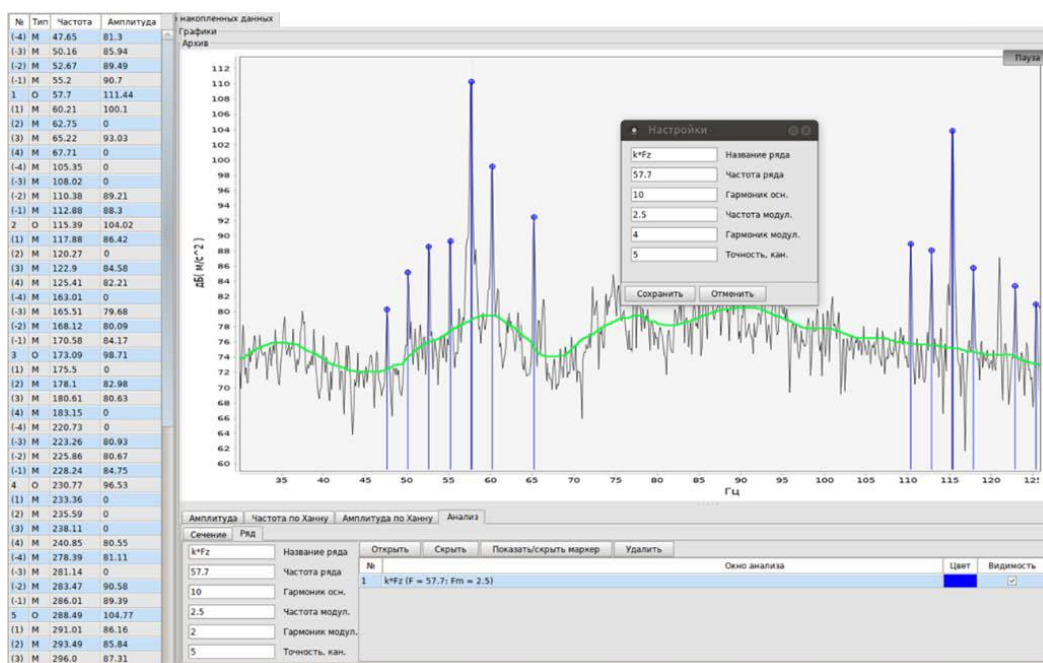


Рисунок 4.26 – Результати аналізу вузькосмугового спектру з визначенням параметрів заданого гармонійного ряду (Джерело: розроблено автором)

Виділені параметри гармонійних, випадкових та імпульсних компонент передаються далі в модуль моніторингу для накопичення, оцінки зон їхнього стану та прогнозування.

Модуль діагностики побудований на основі розробленого в другому розділі методу автоматичного діагностування та відповідає за визначення найбільш ймовірної причини виявленої зміни стану агрегату, тобто виду та місця виникнення дефекту. Модулі для різних рівнів системи та різної кількості точок контролю на агрегаті можуть здійснювати діагностику різної глибини. Усі не включені в групу дефектів, що розпізнаються конкретним діагностичним модулем, або групи дефектів система відносить до непізнаних змін стану агрегату, а ступінь їх небезпеки для продовження експлуатації визначається модулем моніторингу стану.

Режим ідентифікації дефектів запускається із заданою періодичністю або за подією. При цьому для діагностування використовуються зони стану та прогнози їх зміни, які формуються блоком моніторингу, а основними діагностичними параметрами є компоненти, виділені з вузькосмугових спектрів.

ПЗ «АРМ оператора» та «АРМ діагноста» можуть розташовуватися на тому ж комп'ютері, що й ПЗ «Сервер додатків» або на будь-якому комп'ютері локальної мережі та дозволяють отримати доступ до вихідної інформації системи. ПЗ «АРМ оператора» слугує для відображення обмеженого обсягу інформації для швидкого сприйняття та прийняття рішень.

До такої інформації відноситься мнемосхема контрольованого обладнання з кольоровими індикаторами стану (рис. 4.27), а також узагальнена інформація про результати моніторингу та діагностики.

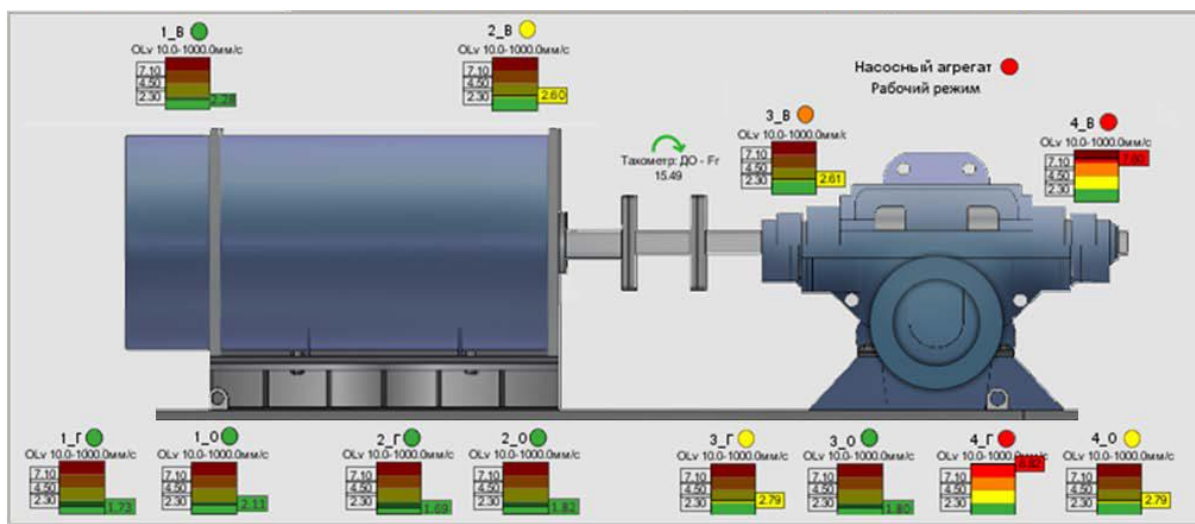


Рисунок 4.27 – Головной экран системы диагностики с мнемосхемой контролируемого оборудования та індикаторами стану
(Джерело: розроблено автором за матеріалами [44])

За допомогою ПЗ «АРМ діагноста» можна отримати весь обсяг інформації як узагальненої, так і детальної. Зокрема, доступна інформація про ретроспективу будь-якого параметра, який вимірюється системою, параметри виявлених трендів, результати аналізу спектрів, а також інша інформація в різній формі – табличній, графічній, текстовій.

Для прив'язки системи до об'єктів контролю необхідно для кожної машини:

- налаштувати дерево її елементів (вузли, точки контролю);
- налаштувати види вимірювань діагностичних параметрів;
- задати параметри їх накопичення та обробки;
- вказати режими роботи та способи їх визначення, встановити зв'язки точок контролю з каналами підключених вимірювальних пристроїв;
- підключити готовий або розробити новий діагностичний модуль за допомогою розробленого способу конфігурації діагностичних вирішальних правил з урахуванням параметричних і просторових ознак (рис. 4.28).

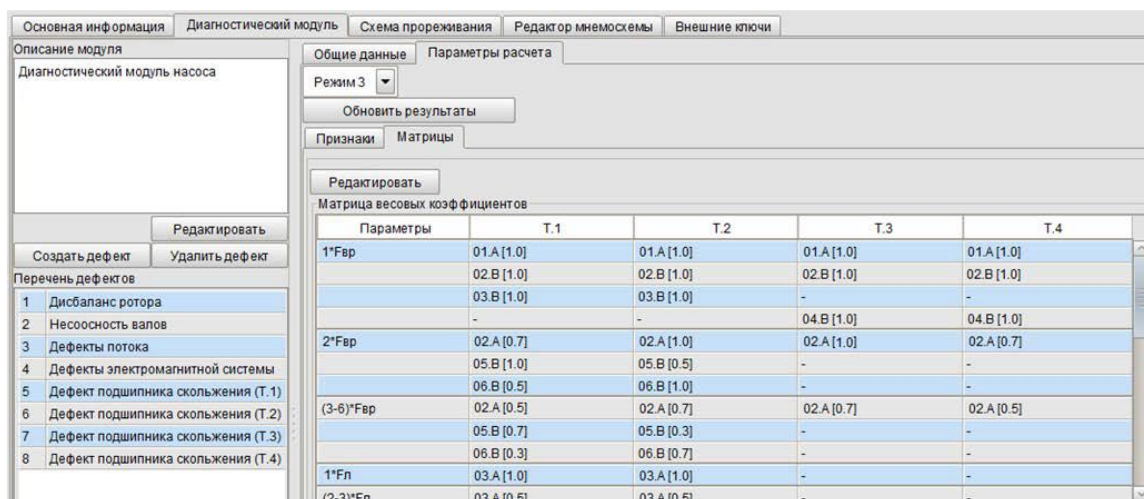


Рисунок 4.28 – Конфігурація діагностичного модуля у системі
(Джерело: розроблено автором)

До складу діагностичної системи можуть включатися виконавчі пристрої різного призначення, зокрема контролери аварійної сигналізації або управління агрегатами. Виконавчі пристрої підключаються до інформаційної мережі або для їх підключення формується додаткова (керуюча) мережа. Також система має можливість обміну даними із зовнішніми системами за допомогою пристрою перетворення даних.

Використані в наведених системах алгоритми виділення та обробки діагностичних параметрів з метою детальної оцінки технічного стану об'єктів контролю відпрацьовувалися на багатьох типах машин як загального застосування, в енергетиці та на залізничному транспорті, так і суднових, зокрема на турбогенераторах, планетарних редукторах, насосах, вентиляторах.

Система діагностики пройшла успішну дослідну експлуатацію на автономній газотурбінній енергетичній установці потужністю 7 мВ. У ході випробувань та практичного застосування розглянутих вище систем було підтверджено ефективність розроблених у дисертаційній роботі рішень.

Висновки до розділу 4

1. Проведено апробацію удосконаленого методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів вібрації на модельних сигналах та сигналах вібрації різних типів агрегатів, що використовуються в різних галузях промисловості та на суднах. У ході апробації доведено більш високу точність визначення параметрів гармонійних складових запропонованим методом порівняно з контрольним, який використовує виправлення залежно від співвідношення двох максимальних спектральних відліків.

2. Розроблений метод дозволяє більш ніж у 3 рази знизити похибку визначення частоти та рівня гармонійної складової за різної зміни її частоти. У ході апробації отримані пороги для визначення значущості перевищення відліками спектра лінії фону, які забезпечують ймовірність 95% ідентифікації параметрів гармонійних складових з обґрунтованою допустимою для цілей діагностики похибкою визначення частоти не більше $0,25df$ та рівня не більше 30%. Це дозволяє отримати необхідну точність вимірювання параметрів нестабільних гармонійних складових, що навіть трохи перевищує рівень фону, які можуть характеризувати вид і ступінь розвитку, у тому числі і небезпечних дефектів.

3. Проведено апробацію удосконаленого методу автоматичної адаптації порогових значень за допомогою широкого переліку модельних сигналів, що містять перехідні процеси з різною швидкістю та рівнем флуктуацій. У ході апробації показано перевагу запропонованого методу побудови порогових значень порівняно зі стандартним підходом, який використовує завищення порогів за умов монотонних флуктуацій віброактивності, притаманних судновим умовам.

4. Розроблений метод дозволяє виявляти зміну технічного стану за аналогічний момент часу або раніше, ніж стандартний. Показано, що максимальний ефект від використання запропонованого методу досягається за відсутності перехідних процесів та при високих швидкостях деградації дефекту, що перевищують швидкості перехідних процесів, коли час реакції на небезпечний дефект може бути скорочено більш ніж у 2 рази.

5. Ефективність розробленого методу прогнозування досягнення порогових значень підтверджена у процесі дослідної експлуатації систем діагностики, що впроваджуються шляхом його порівняння зі способами прогнозу технічного стану, що використовують експоненційний тренд або оператори Соболева при обробці різних експериментальних трендів параметрів вібрації, в тому числі суднових агрегатів.

6. Апробований спосіб порівняно з контрольними показав аналогічний або найкращий результат оцінки середнього квадратичного відхилення експериментальних даних від значень лінії тренду. У ході апробації показано доцільність вибору інтервалу апроксимації шляхом визначення точки зміни тенденції, зокрема, на розглянутому тренді деградації реальної машини помилка прогнозу на ділянці від точки зміни тенденції виявилася в межах доби, а при апроксимації всього часового тренду, що розглядається, – більше 8 діб.

7. Апробовано розроблений метод автоматичної діагностики шляхом складання діагностичної конфігураційної таблиці типової суднової роторної машини з урахуванням параметричних та просторових ознак різних дефектів, шляхом випробування діагностичних модулів з аналогічно складеною конфігурацією в процесі дослідної експлуатації систем моніторингу і діагностики.

8. Доведено простоту конфігурації діагностичних вирішальних правил з урахуванням можливості перетинів просторів діагностичних ознак та використання просторових ознак дефектів.

9. Ефективність розроблених рішень, необхідних для реалізації поставлених завдань, підтверджена методами математичного моделювання, експериментальними дослідженнями за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення і результатами випробувань та експлуатації на промислових об'єктах та водному транспорті, розроблених з використанням розроблених рішень зразків, систем моніторингу та діагностики.

Основні результати, отримані у розділі наведені у роботах здобувача [101, 104].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано *актуальне наукове завдання*, яке полягало у розробці методів діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу. При цьому отримано такі наукові та практичні результати.

1. Результати *проведеного аналізу* силової енергетичної установки засобів водного транспорту дозволили виділити технологічні контури і визначити параметри, які підлягають діагностиці. Аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку методів та засобів контролю технічного стану та діагностики показав високу ефективність автоматичних методів виділення та обробки параметрів сигналів вібрації. Дослідження гармонік спектру вихідного сигналу вібрації є дієвим індикатором виникнення та тенденцій розвитку дефектів в агрегатах і визначає необхідність розробки комплексного методу для автоматичного виділення діагностичних компонентів з вузькосмугових спектрів вібрації в умовах флуктуації частоти обертання та високому рівні фону, властивих обертальним судновим машинам.

2. *Сформульовано комплексне завдання* щодо виділення діагностичних компонентів з вузькосмугових спектрів вібрації в умовах флуктуації частоти обертання та високому рівні фону, яке складається з:

- подальшого розвитку методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів;
- удосконалення методу автоматичної адаптації порогових значень для своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для судових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів;
- вперше розробленого методу автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій.

3. *Одержав подальший розвиток метод* автоматичної обробки вузькосмугових спектрів, який, на відміну від існуючих, використовує

одночасно виміряні в одній точці спектри з різною частотною роздільною здатністю для мінімізації спотворень форми гармонійних складових при нестабільності їх параметрів та дозволяє підвищити точність визначення параметрів слабких гармонійних компонентів, які можуть характеризувати вид та ступінь розвитку небезпечних дефектів в умовах характерної для суднових умов нестабільності частоти обертання без необхідності використання синхронної з положенням валу вибірки, неефективної або недоступної для багатьох суднових машин.

Даний метод дозволяє більш ніж у 3 рази знизити похибку визначення частоти та рівня гармонійної складової за різної зміни її частоти.

При апробації отримані пороги для визначення значущості перевищення відліками спектра лінії фону, які забезпечують 95% ідентифікацію параметрів гармонійних складових з обґрунтованою допустимою для цілей діагностики похибкою визначення частоти не більше $0,25df$ та рівня не більше 30%.

Це дало можливість отримати необхідну точність вимірювання параметрів нестабільних гармонійних складових, що навіть трохи перевищують рівень фону, які можуть характеризувати вид і ступінь розвитку, у тому числі і небезпечних дефектів.

4. *Удосконалено метод* автоматичної адаптації порогових значень для вирішення завдання своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів, який, на відміну від існуючих, заснований на організації накопичення усереднених вібродіагностичних параметрів та величин їх зміни у буферах різної часової тривалості, що дозволяє виявляти та прогнозувати небезпечну зміну технічного стану без необхідності стандартного завищення порогів при нестабільній віброактивності.

У ході апробації показано перевагу запропонованого методу побудови порогових значень порівняно зі стандартним підходом, який використовує завищення порогів за умов монотонних флуктуацій віброактивності, притаманних судновим умовам.

Удосконалений метод дозволяє виявляти зміну технічного стану за аналогічний момент часу або раніше, ніж стандартний. Показано, що максимальний ефект від використання запропонованого методу досягається за відсутності перехідних процесів та при високих швидкостях деградації дефекту, що перевищують швидкості перехідних процесів, коли час реакції на небезпечний дефект може бути скорочено більш ніж у 2 рази.

5. Вперше розроблено метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій, який є інваріантним до типу об'єкта діагностування з прив'язкою до конкретного агрегату за допомогою складання конфігураційної матриці.

Проведено апробацію розробленого методу автоматичної діагностики шляхом складання діагностичної конфігураційної таблиці типової суднової роторної машини з урахуванням параметричних та просторових ознак різних дефектів шляхом випробування діагностичних модулів з аналогічно складеною конфігурацією в процесі дослідної експлуатації систем моніторингу та діагностики.

Доведено простоту конфігурації діагностичних вирішальних правил з урахуванням можливості перетинів просторів діагностичних ознак та використання просторових ознак дефектів.

6. Реалізація запропонованого в дисертаційній роботі підходу щодо діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу дозволяє:

- отримати необхідну точність вимірювання параметрів нестабільних гармонійних складових, які можуть характеризувати вид і ступінь розвитку небезпечних дефектів;
- виявляти зміну технічного стану об'єкту контролю за аналогічний момент часу або раніше, ніж стандартний;
- складати діагностичну конфігураційну таблицю типової суднової роторної машини з урахуванням параметричних та просторових ознак різних дефектів.

Запропоновані теоретичні методи мають високий ступінь готовності до використання і доведені до їх практичної реалізації.

Застосування методу автоматичної обробки вузькосмугових спектрів вібрації на модельних сигналах та сигналах вібрації різних типів агрегатів на суднах дозволяє більш ніж у 3 рази знизити похибку визначення частоти та рівня гармонійної складової за різної зміни її частоти; отримати пороги для визначення значущості перевищення відліками спектра лінії фону, які забезпечують 95% ідентифікацію параметрів гармонійних складових з обґрунтованою допустимою для цілей діагностики похибкою визначення частоти не більше $0,25df$ для отримання необхідної точності вимірювання параметрів нестабільних гармонійних складових.

Застосування удосконаленого методу автоматичної адаптації порогових значень за допомогою модельних сигналів дозволяє при високих швидкостях деградації дефекту, що перевищують швидкості перехідних процесів, скоротити час реакції на небезпечний дефект більш ніж у 2 рази.

Застосування вперше розробленого методу автоматичної діагностики порівняно з контрольними показало аналогічний або кращий результат оцінки середнього квадратичного відхилення експериментальних даних від значень лінії тренду: на ділянці від точки зміни тенденції – до 1 доби, а при апроксимації всього часового тренду, що розглядається, – більше 8 діб.

7. Значення вирішеного у дисертації завдання для науки полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ експлуатації за станом головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу для виявлення і діагностики дефектів, що розвиваються.

8. Практичне значення отриманих результатів полягає у подальшому удосконаленні системи діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на базі розроблених моделей і методів вібраційного аналізу, що дозволяють підвищити ефективність діагностування елементів із застосуванням методів вібродіагностики та обробки сигналів вібрації.

9. Дослідження базується на методах теоретичного та емпіричного

дослідження сигналів вібрації різних роторних машин, методах і математичному апараті кореляційної теорії випадкових процесів, цифрової обробки сигналів (перетворення Фур'є, перетворення Гілберта, метод Уелша), статистики, комп'ютерного моделювання і математичному апараті теорії матриць.

10. *Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій* підтверджується грамотною постановкою наукового завдання дослідження, правильним використанням методів теоретичного та емпіричного дослідження сигналів вібрації, методів і математичного апарату кореляційної теорії випадкових процесів, цифрової обробки сигналів, статистики, комп'ютерного моделювання і математичного апарату теорії матриць на етапах моделювання й аналізу результатів досліджень, збігом отриманих результатів з відомими експериментальними даними у даній області наукових знань, відкритим обговоренням результатів на наукових семінарах і конференціях і їх публікацією у рекомендованих наукових виданнях.

11. *Наукові та прикладні результати досліджень*, отримані в дисертації, доцільно використовувати при розробці технологій експлуатації за станом головної енергетичної установки засобів водного транспорту й елементів програмного забезпечення автоматизованих систем діагностування на основі вібраційного аналізу для виявлення і діагностики дефектів; у науково-дослідних організаціях – для обґрунтування напрямків удосконалення технологій автоматизованого діагностування головної енергетичної установки засобів водного транспорту; у вищих навчальних закладах – для вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

Результати дисертаційного дослідження будуть корисними при вдосконаленні існуючого та розробці перспективного програмного забезпечення автоматизованих систем діагностування систем, агрегатів та вузлів засобів водного транспорту.

12. Теоретичні результати дисертаційних досліджень впроваджені у навчальному процесу Державному університету інфраструктури та

технологій факультету експлуатації технічних система на водному транспорті на кафедрі суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації при викладанні дисциплін «Суднові двигуни внутрішнього згорання», «Теорія автоматичного управління та автоматизація суднових енергетичних установок» та «Технічне обслуговування та ремонт суднових технічних засобів» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт

Таким чином, послідовне рішення поставлених наукових завдань дослідження, отримання нових наукових результатів, перевірка їх на практиці та доведення ефективності дозволяє стверджувати про завершеність дисертаційної роботи і досягнення мети дослідження, яка полягала у підвищенні ефективності діагностування елементів головної енергетичної установки водного транспорту із застосуванням методів вібродіагностики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альтман, Е.А. Совершенствование алгоритма определения параметров гармоник сигналов в электрической сети для оценки качества электроэнергии / Е.А. Альтман, Д.А. Елизаров, С.Н. Чижма // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – N 4 (28). – С. 5 - 9.
2. Бабак С.В., Мыслович М.В., Сысак Р.М. Статистическая диагностика электротехнического оборудования: Монография. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. – 456 с.
3. Байцур А.И., Молчанов Л.Г. Проектирование фундаментов под оборудование промышленных предприятий. Киев, 2010. - 172 с.
4. Берегун В.С., Красильников О.І. Дослідження чутливості коефіцієнта ексцесу діагностичних сигналів для контролю стану електротехнічного обладнання // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 4. – С. 79–85.
5. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Децюра О. Я., Черняєв Д. В. (ДПТ). Методи нерозбірного діагностування дизелів при експлуатації рухомого складу. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2012. Вип. 41. С. 56-60.
6. Варбанец Р. А. Параметрическая диагностика дизелей SBV6M540 и Pegaso 9156 // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Харків : ХАІ. 2006. – № 8(34). – с 144–148.
7. Варбанец Р.А. Метод аналитической синхронизации данных мониторинга рабочего процесса транспортных дизелей в эксплуатации / Варбанец Р.А., Залож В.И., Тарасенко Т.В., Белоусова Т.П., Ерыганов А.В. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – Вип. № 7. – С 118-128.
8. Варбанець Р.А. Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації / Варбанець Р.А., Залож В.І., Тарасенко Т.В., Кучеренко Ю.М., Клименко В.Г. // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2020. – № 1. – С 14-21.

9. Васильєв Є. А., Прокопенко А. С. Методика діагностування поршневих двигунів внутрішнього згорання за результатами їх непрямого відображення. Збірник наукових праць студентів електромеханічного факультету. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. Вип. 6. С. 184-192.

10. Вібраційні машини сільськогосподарського виробництва: Монографія. / В. М. Булгаков, М. О. Свірень, І. П. Паламарчук, В. В. Дрига, О. М. Черниш, В. В. Яременко. – Кіровоград: КОД, 2012. – 512 с.

11. Водка А.А. Виброизмерительный комплекс на основе микроэлектромеханического сенсора / А.А. Водка, А.И. Трубаев, Ю.Н. Ульянов // Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля. – Луганськ, 2012.– № 9 (180). Ч.1. – С. 140-147.

12. Войтов В.В. Безконтактна діагностика технічного стану клапанного механізму двигуна внутрішнього згорання / В.В. Войтов, Ю.В. Чепурний, А.В. Статигін // Системи озброєння і військова техніка. – 2020. – № 4(64). – С. 49-53.

13. Гаврилин А.Н. Метод снижения уровня вибраций при механической обработке / А.Н. Гаврилин // Контроль. Диагностика. – No 11. –2013. – С. 23-26.

14. Гайдамака А. В. Підшипники кочення. Базові знання та напрямки вдосконалення: навч. посіб. – Х.: НТУ «ХП», 2009. – 248 с.

15. Гетманов В.Г. Применение технологии обобщенного Фурье-анализа для цифровой обработки структурно-сложных нестационарных колебательных сигналов / В.Г. Гетман, В.Н. Гридин, Е.Б. Царева // Информационные технологии. – 2005. – № 5. – С. 18-20.

16. Гуров А.П. Вібродіагностика: навчальний посібник / А.П. Гуров, Д.Ю. Шарейко. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 116 с.

17. Дудченко О. А. Технічне обслуговування і ремонт рухомого складу: підруч. / О. А. Дудченко - К.: Знання, 2004. – 478 с.

18. Задворнов Я. М., Рязанцев В. В. Особливості віброакустичного діагностування технічного стану спряжень деталей дизельних двигунів. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2016. 4. – Р.175-185.

19. Занько О. Н. Технология использования рабочих веществ в судовых энергетических установках / О. Н. Занько, В. Н. Калугин, И. В. Логишев. – Одесса : Фенікс, 2005. – 508 с.

20. Зебров В.В. Анализ конструкций виброизолирующих опор металлорежущих станков / В.В. Зебров, Т.С. Балакина, Е.А. Владецкая // Прогрессивные направления развития машиноприборостроительных отраслей и транспорта: материалы междунар. научн.-техн. конф. студ., асп. и мол. учёных, г. Севастополь, 12-16 мая 2008г.- г. Севастополь: Изд-во Сев НТУ, 2008.- С. 124-125.

21. Іскович–Лотоцький, Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування: Монографія. [Текст] / Р. Д. Іскович–Лотоцький – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 338 с. – ISBN 966–641–178–4.

22. Кардаш В. П., Худенко Г. О. Підвищення ефективності експлуатації судових пристроїв морських суден // Суднові енергетичні установки: навч. – техн. сб. Одеса: НУ «ОМА», 2018. Вип. 38. -С. 98-100.

23. Козицький С. В. Підвищення експлуатаційної надійності демпферів крутильних коливань судових дизелів / С. В. Козицький, Кіріян С. В. // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник.–Одеса: ОНМА, 2012. – №30. – С. 122–128.

24. Козицький С. В. Порівняння ефективності демпферів крутильних коливань колінчастого валу судового дизеля при використанні рідин з різними реологічними властивостями / С. В. Козицький, Кіріян С. В., Швець О. І. // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. –Одеса: НУ «ОМА», 2019. – №38. – С. 107–115

25. Колобов К. С. Дослідження впливу несправностей систем та механізмів дизеля на його екологічні, енергетичні показники та температуру відпрацьованих газів. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. 29 (68). № 1 (3). Р. 103-108.

26. Ланчуковский В.И. Безопасное управление судовыми энергетическими установками. Учебник, - Одесса: Астропринт, 2004. -232 с.
27. Марченко А.П. Особенности процесса сгорания в дизеле при работе на водотопливной эмульсии / Марченко А.П., Парсаданов, И.В., Прохоренко, А.А., Савченко, А В., Осетров, А.А. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2016. – №. 1. – С. 3-10.
28. Міхалков С.В. Удосконалення технології діагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів за вібраційними характеристиками. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/ Українська державна академія залізничного транспорту. – Харків: 2007 – 20 с.
29. Наконечний А. Й., Гетьман О. Л. Методи та засоби діагностування роботи двигуна автомобіля за оцінкою його віброакустичних характеристик. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Автоматика, вимірювання та керування. 2018. 907. 38-43.
30. Наливайко В.С. Суднові двигуни внутрішнього згорання / В.С. Наливайко, Б.Г. Тимошевський, С.Г. Ткаченко // Підручник – Миколаїв: Торубара, 2015. –331с.
31. Оптимізація вузлів і деталей верстатів та машин за допомогою модуля "Анализ напряжений" Autodesk Inventor: навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / В.М. Гейчук, К.М. Рудаков. – К.: НТУУ "КПІ", 2016. – 176 с.
32. Основи технічної діагностики колісних транспортних засобів :навчальний посібник / В.В. Біліченко, В.Л. Крещенецький, Ю.Ю. Кукурудзяк, С. В. Цимбал. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 118 с.
33. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Є. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Є.С. Уманський. – К.: Вища школа, 1993. – 655 с.
34. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання : навч. посіб. / В. О. Повідайло. – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 248 с.
35. Попов В. И., Локтев В. И. Динамика станков. – Киев: Техника, 1975.- 136 с.

36. Резник Д. О., Поліщук І. А. Система вібродіагностики, прогнозування відмов та оцінки стану турбогенератора. Молодий вчений. 2019. № 11 (75). С. 694–697.

37. Россомеха О. І. Концептуальна модель системи технічного обслуговування і ремонту складних технічних систем // Розвиток транспорту – 2020. - №1(6). – С. 56 – 70.

38. Сараєва, І.Ю. Удосконалення процесу діагностування циліндро-поршневої групи та герметичності клапанів бензинового двигуна автомобіля [Текст]: автореф. дис... канд. тех. наук: 05.22.20 / І.Ю. Сараєва. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2006. – 23 с.

39. Сілевич В.Ю. Аналіз стану поршневого двигуна та його агрегатів за акустичним сигналом їх роботи. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського, 2019. № 30(69). № 6. С. 170–175. DOI: 10.32838/2663-5941/2019.6-2/30.

40. Скалозуб В. В. Автоматизований експертний комплекс із дослідження та прогнозування параметрів силових енергетичних установок локомотивів / В. В. Скалозуб, О. Б. Очкасов, Д. В. Кібець // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2020. - № 2. - С. 8-18.

41. Суворов П.С. Динамика дизеля в судовом пропульсивном комплексі. / П.С. Суворов. – Одеса:ОНМА, 2004. – 304 с.

42. Тарапата В.В. Підвищення довговічності трибосопрямлений судових дизелів як процес оптимізації масопереносу при їх експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті // Суднові енергетичні установки: науково - технічний збірник.- 2003. - № 8. - Одеса: ОДМА.- С. 148-156

43. Тэттер В.Ю., Тэттер А.Ю., Барайщук В.С. Диагностирование подшипниковых и редукторных узлов на переходных режимах // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, – 2005. – С. 236-239.

44. Ульянов Ю.Н. Комплекс для измерения виброускорений на основе микроэлектромеханического сенсора / А.А. Водка, А.И. Трубаев, Ю.Н. Ульянов // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції

«Проблеми розвитку транспортних систем і логістики», Євпаторія, 3-8 травня 2012 року. – 2012. – С. 191.

45. Чепурний Ю.В. Експериментальне дослідження віброакустичним методом клапанного механізму двигуна внутрішнього згорання / Ю.В. Чепурний, К.Г. Яценко, М.О. Блещенко, Г.Л. Коростильов // Системи озброєння і військова техніка. – 2020. – № 1(61). – С. 177-182.

46. Черниш І.І., Колегаєв М.О. Експлуатація сучасних суднових малообертових дизелів. – Одеса: НУ «ОМА», 2016. – 198 с.

47. Черниш І.І., Колегаєв М.О. Конструкція сучасних суднових малообертових дизелів. Навчальний посібник. – Одеса: Фенікс, 2016. – 142 с.

48. Четвержук Т. І. Вібродіагностика верстата з використанням мереж Байєса / О. Ф. Гордєєв, Р. М. Полінкевич, Н. Т. Зубовецька, Т. І. Четвержук // Наукові нотатки: міжвуз. зб.наук. праць. – Луцьк, 2013. – Вип. 40. – С. 62-70.

49. Шатохин В. М. Анализ и параметрический синтез нелинейных силовых передач машин: Монография / В. М. Шатохин.– Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 456 с.

50. Шахов А. В., Россомаха О. І., Россомаха О. А. Річковий транспорт в Україні // Розвиток методів управління та господарювання на транспорті – 2019. –№ 3(68). – С. 5–15.

51. Шкрегаль О. М., Лимаренко В. О., Рильський Д. О. Застосування сучасних діагностичних методів та засобів підвищення технічного рівня машин. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2014. 145. 174-178.

52. Шліхта О.М., Кардаш В.П. Підвищення енергоефективності робочого процесу суднового двигуна. Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 21.03.2019-22.03.2019.-Одеса: НУ ОМА – 2019.- 232-237.

53. Юр Т. В. Исследование фильтрующих свойств вейвлет преобразования / Т. В. Юр, В. И. Дубровин, В. Н. Харитонов // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – Запорожжє, 2010. – N2. – С. 157-165.

54. Allen J.B. Short Time Spectral Analysis, Synthesis, and Modification by Discrete Fourier Transform / Jont B. Allen // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. ASSP-25 (3), 1977, Pp. 235–238.

55. AMC, MECANOCAUCHO// Anti-Vibration Mount. Pp – 108. Andrzej Flaga, Jacek Szulej, Piotr Wielgos // Comparison of determination methods of vibration's damping coefficients for complex structures// Budownictwo i Architektura 3 (2008) 53- 61.

56. Andrzej Flaga, Jacek Szulej, Piotr Wielgos // Comparison of determination methods of vibration's damping coefficients for complex structures// Budownictwo i Architektura 3 (2008) 53-61.

57. Angheluță, Cristi-Marian, Silviu Perijoc, and Adrian Presura. Retrofitting of Danube Vessels for a Green and Efficient Fleet. Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XI Ship-building 42 (November 26, 2019): 175-182. Accessed March 14, 2021.

58. Barkova, N. A. Bearing diagnostics of slow speed industrial rotating equipment by shock pulses / N A Barkova, A V Barkov, V V Fedorishchev, D V Grishchenko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 643.

59. Barkova, N. A. Vibration diagnostics of equipment units with gas turbine engines /Natalia Barkova, Aleksey Barkov, Dmitriy Grishchenko // Vibroengineering Procedia. – 2019. – Vol. 25. – P. 89 – 94. – ISSN 2345-0533.

60. Bently, D. E. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics / Donald E. Bently. – Minden: ASME, Bently Pressurized Bearing Company, 2002. – 721 p. – ISBN 0-9714081-0-6.

61. Beregun, V. S. Research of excess kurtosis sensitiveness of diagnostic signals for control of the condition of the electrotechnical equipment / V. S. Beregun, A. I. Krasilnikov // Technical Electrodynamics. – 2019. – Vol. 4. – P. 79 – 85. – ISSN 1607-7970.

62. Bohdan Diveyev, Ihor Vikovych, Viktor Martyn, Ihor Dorosh, Optimization of the impact and particle vibration absorbers, Proceeding of

ICSV21, Florence, Italy, 2, (2015). (Electronic edition)

63. Bohdan Diveyev. Impact and particle buffered vibration absorbers optimization and design. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Material Science. Vol.1., 2016, № 2

64. Brigham E.O. The fast Fourier transform and its applications / Brigham E. Oran. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1988, 448 p.

65. Brockmann T. H. Theory of Adaptive Fiber Composites. From Piezoelectric Material Behavior to Dynamics of Rotating Structures / Tobias H. Brockmann / Springer Science+Business Media B.V., 2009. 230 p.

66. Chepurnyi Y.V. The Method of Controlling the Valve Mechanism of the Engine for Exhaust Pulsation Study / Y.V. Chepurnyi, O.M. Leonenko // International Journal on Emerging Technologies. – 2020. – № 11(3). – P. 91- 95.

67. Chirica I. Retrofit Solutions for Green and Efficient Inland Ships / Chirica I., Presura A., Anghelută C.M. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019 – Volume 1297, 5th International Scientific Conference SEACONF. p.p. 17-18.

68. Chomphan, S., Kingrattanaset, Th. An analysis of sound for fault engine. American Journal of Applied Sciences, 2014. № 11(6), pp. 1005–1009. DOI: 10.3844/ajassp.2014.1005.1009.

69. Cooley, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series / Cooley James W., Tukey John W. // Mathematics of Computation. – 1965. – Vol. 19 (90). – P. 297–301. – ISSN 0025-5718.

70. Deery, J. The ‘Real’ History of Real-Time Spectrum Analyzers. A 50-Year Trip Down Memory Lane / Joe Deery // Sound & vibration. – 2007. – Vol. 41(1). – P. 54-59.

71. Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., Mitescu C.D. Physical Hydrodynamics. – Oxford University Press, 2001. – 505 P.

72. Hennadiy Cherchuk, Diveyev, Viktor Martyn, Roman Sava, «Parameters identification of particle vibration absorber for rotating machines», Proceeding of ICSV-21, Beijing, China, 2014.

73. Heywood. Internal combustion engine fundamentals / Heywood, B. John. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 930 p.
74. Jacobsen. Service Experience of MAN B&W Two Stroke Diesel Engines [Електронний ресурс] / Jacobsen, S. Baungaard, C. Egeberg // CIMAC Technical Paper Database. – 2014.
75. M Jurevicius, V Vekteris, G Viselga, V Turla, A Kilikevicius and I Iljin // Dynamic research on a low-frequency vibration isolation system of quasi-zero stiffness //Journal of Low Frequency Noise,Vibration and Active Control 2019, Vol. 38(2) 684– 691.
76. Marynowski K., Kapitaniak T. Kelvin-Voigt versus Bürgers internal damping in modeling of axially moving viscoelastic web. International Journal of NonLinear Mechanics. 2002. 37. P. 1147–1161.
77. Minasyan M.A., Kiaw Thet Naing, Methodology for calculating the depreciation of a marine diesel generator unit taking into account the influence of thrust side, bow and stern vibration isolators. – 2021, P. 76.
78. Mitchell, J.S. From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance. Seventy Years of Continuous Progress / J.S. Mitchell // Sound & vibration. – 2007. – Vol. 41(1). – P. 62-78.
79. N.S.Ahirrao, Dr.S.P.Bhosle, Dr.D.V.Nehete // Dynamics and Vibration Measurements in Engines// 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering, 2018.
80. Nasha Wei, James Xi Gu, Fengshou Gu, Zhi Chen, Guoxing Li, Tie Wang, Andrew D. Ball. An Investigation into the Acoustic Emissions of Internal Combustion Engines with Modelling and Wavelet Package Analysis for Monitoring Lubrication Conditions. Energies, № 12(4)-640, 2019. DOI:10.3390/en12040640.
81. Neumann S. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data / S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash та ін. // Diagnostyka. – 2019. – №20(2)–P.19–26.

82. Oppenheim A.V. Discrete-time signal processing / Alan V. Oppenheim, R. W. Schaefer and, J. R. Buck. – Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 3rd edition, 2009, 1120 p.

83. Renaud F., Dion J.-L., Chevallier G., Tawfiq I., Lemaire R. A new identification method of viscoelastic behavior: Application to the generalized Maxwell model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier. 2011. 25. P. 991–1010.

84. S. Daley, J. Hätönen & D. H. Owens // Department of Automatic Control & Systems Engineering, University of Sheffield, Sheffield, S1 3JD, UK //Active vibration isolation in a “smart spring” mount using a repetitive control approach// 2005, p - 6.

85. Sagin A. S., Zablotskyi Yu. V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8. – P. 14 - 17.

86. Scheffer C. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance / C. Scheffer, C. Girdhar. – Elsevier: Newnes, 2004. – 272 p.

87. Shahsavari R., Ulm F.-J. Indentation analysis of fractional viscoelastic solids. *Journal of mechanics of materials and structures*. 2009. Vol. 4, No. 3. P. 523–550.

88. Tarasenko T. The Ways to Improve Energy Efficiency and Eco-friendliness of the Specific Danube Inland Vessels. First Stage / Tarasenko T, Zalozh V and Maksymov S. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1297, conference 1. P. 1-8.

89. V Clarence W. de Silva // *Vibration and Shock Handbook (Mechanical Engineering)*. 2005, pp -1771.

90. Varbanets R.A. Determination of top dead center location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis / Varbanets R.A., Zalozh V.I., Shakhov A.V., Savelieva I.V., Piterska V.M. *Diagnostyka* // Polish society of technical diagnostics. – 2020. №21(1). P. 51–60.

91. W.Ker Wilson, DSc, PhD, WhEx, CEng, FIMechE // Some early experiences of mechanical vibration in marine engine systems// James Clayton Lecture, pp - 68.

92. Wail, M. Adaileh. Engine Fault Diagnosis Using Acoustic Signals. Progress in Environmental Protection and Processing of Resource, 2013. pp. 295–298. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.295-298.2013.

93. Wenske W. Zur Ableitung der dynamischen Kennlinie des Asynchronmotors in Hinblick auf die Berechnung von Schwingungserscheinungen in Autriebsanlagen. // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule O. Guericke. – Magdeburg. – 1970. – jg.14. – Heft 5/6.– S. 517–523.

94. Wicek J., Molenda M. Moisture-dependent physical properties of rapeseed – experimental and DEM modeling. International Agrophysics. 2011.

95. Xiao R., Sun H., Chen W. An equivalence between generalized Maxwell model and fractional Zener model. Mechanics of Materials. 2016. 100. P. 148–153.

96. Xiongfeng, Liyan, Wangyingchun //Review on vibration isolation technology// Journal of Physics: Conference Series. 2021, pp – 6.

97. Сорока В. В., Гаталяк М. Я., Мельник О. В. Методи зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів суднових дизелів. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. *«Водний транспорт»*. 2021. № 1(32). С. 64–74. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2021.1.32.08>.

98. Сорока В. В. Контроль та оцінювання стану підшипників суднового валопроводу. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. *«Водний транспорт»*. 2021. № 3(34). С. 31–38. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2021.3.34.04>.

99. Сорока В. В., Мельник О. В., Довгаль І. І. Математична модель оцінювання змащувальної здатності суднових дистилатних палив. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. *«Водний транспорт»*. 2023. № 2(36). С. 120–134. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.10>.

100. Сорока В., Мельник О. Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів. *Вісник Приазовського Державного технічного університету*. 2023. № 47. С. 349-359. doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300121

https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/300121/292598

101. Сорока В., Гороховська О. Практичне застосування методу автоматичної адаптації сигналів вібродіагностики до порогових значень. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій «Водний транспорт». 2024. №. 39 (1). С. 83–92. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.08

<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/321/278>

102. Soroka V., Herasymov S., Milevskyi S., Pohasii S., Yevseiev S. Phase-Modulated signals synthesis method to control information transmission channels. 2023 *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2–6 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312859>. (Scopus)

103. Soroka V., Herasimov S., Tkachov A., Milevska T., Dunaiev S. Method for assessing meter error characteristics of random signals. 2023 *7th International symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkiye, 26–28 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ismsit58785.2023.10304988> (Scopus).

104. Soroka V., Herasimov S., Yevseiev S., Tkachov A., Milevska T., Dunaiev S. Development of a method for digital synthesis of electrical signals with a normalized harmonic coefficient. 2023 *5th International congress on human-computer interaction, optimization and robotic applications (HORA)*, Istanbul, Turkiye, 8–10 June 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/hora58378.2023.10156678> (Scopus).

105. Viacheslav S., Herasimov S., Yevseiev S., Milevskyi S., Bondarenko K. Development of a method for measuring small nonlinear distortions of periodic electrical signals. 2022 *International symposium on*

multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey, 20–22 October 2022. 2022.
URL: <https://doi.org/10.1109/ismsit56059.2022.9932685> (Scopus).

106. Сорока В.В., Кукалець Л.М., Гусєв В.С., Далаков О.І. Аналіз резерву протизносних властивостей низькосірчистих суднових дистилятних палив. *Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські Читання-2022»*: матеріали III Міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 8 груд. 2022 р.

ДОДАТОК А



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
(ДУІТ)

Вул. Кирилівська, 9 м. Київ, 04071 тел./факс: (044) 463-74-70, 482-51-26

E-mail: duit@duit.edu.ua Код ЄДРПОУ 41330257

«28» 02 2024 № 187/01-18

УЗГОДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи

Юрій ДУДНИК

ЗАТВЕРДЖУЮ



Натія БРАЙКОВСЬКА

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
**СОРОКИ В'ячеслава на тему «Розробка методів діагностики головної енергетичної
 установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу»**

Цей акт складено про те, що наукові дослідження за темою дисертаційної роботи
**СОРОКИ В'ячеслава на тему «Розробка методів діагностики головної енергетичної
 установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу»**
 використовуються в навчальному процесу факультету експлуатації технічних система
 на водному транспорті на кафедрі суднових енергетичних установок, допоміжних
 механізмів суден та їх експлуатації при викладанні дисциплін «Суднові двигуни
 внутрішнього згорання», «Теорія автоматичного управління та автоматизація суднових
 енергетичних установок» та «Технічне обслуговування та ремонт суднових технічних
 засобів» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю
 271 Морський та внутрішній водний транспорт.

**Директор Київського інституту водного
 транспорту імені гетьмана
 Петра Конашевича-Сагайдачного,
 доктор технічних наук, професор**

Олена ТИМОЩУК

**Декан факультету експлуатації
 технічних система на водному транспорті,
 кандидат технічних наук**

Олексій СЬОМІН

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1.1. Сорока В. В., Гаталяк М. Я., Мельник О. В. Методи зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів суднових дизелів. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. *«Водний транспорт»*. 2021. № 1(32). С. 64–74. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2021.1.32.08>.

1.2. Сорока В. В. Контроль та оцінювання стану підшипників суднового валопроводу. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. *«Водний транспорт»*. 2021. № 3(34). С. 31–38. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2021.3.34.04>.

1.3. Сорока В. В., Мельник О. В., Довгаль І. І. Математична модель оцінювання змащувальної здатності суднових дистилятних палив. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. *«Водний транспорт»*. 2023. № 2(36). С. 120–134. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.10>.

1.4. Сорока В., Мельник О. Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів. *Вісник Приазовського Державного технічного університету*. 2023. № 47. С. 349–359. doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300121
https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/300121/292598.

1.5. Сорока В., Гороховська О. Практичне застосування методу автоматичної адаптації сигналів вібродіагностики до порогових значень. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій *«Водний транспорт»*. 2024. № 39 (1). С. 83–92. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.08

<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/321/278>.

Опубліковані праці апробаційного характеру::

1. Soroka V., Herasymov S., Milevskyi S., Pohasii S., Yevseiev S. Phase-Modulated signals synthesis method to control information transmission channels. 2023 *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2–6 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312859>. (Scopus)
2. Soroka V., Herasimov S., Tkachov A., Milevska T., Dunaiev S. Method for assessing meter error characteristics of random signals. 2023 *7th International symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkiye, 26–28 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ismsit58785.2023.10304988> (Scopus).
3. Soroka V., Herasimov S., Yevseiev S., Tkachov A., Milevska T., Dunaiev S. Development of a method for digital synthesis of electrical signals with a normalized harmonic coefficient. 2023 *5th International congress on human-computer interaction, optimization and robotic applications (HORA)*, Istanbul, Turkiye, 8–10 June 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/hora58378.2023.10156678> (Scopus).
4. Viacheslav S., Herasimov S., Yevseiev S., Milevskyi S., Bondarenko K. Development of a method for measuring small nonlinear distortions of periodic electrical signals. 2022 *International symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkey, 20–22 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/ismsit56059.2022.9932685> (Scopus).
5. Сорока В.В., Кукалець Л.М., Гусєв В.С., Далаков О.І. Аналіз резерву протизносних властивостей низькосірчистих суднових дистилатних палив. *Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські Читання-2022»*: матеріали III Міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 8 груд. 2022 р.

Додаток Б

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «ДУНАЙСУДНОРЕМОНТ»

Україна, 68607, Одеська область, м. Ізмаїл, вул. Судноремонтників, 1
р/р 26003010016987 Акціонерний Банк «Південний», МФО 328209, ЄДРПОУ 35855645
телефон (04841)2-50-05; 2-50-04; телефакс: (04841) 2-50-05; 2-50-04; e-mail: izmsrz@gmail.com

Всх. №51 22.03.24р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Сороки В'ячеслава Володимировича
на тему «Розробка методів діагностики головної енергетичної установки
засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу»
на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності
271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Результати дисертаційної роботи Сороки В.В. на тему «Розробка методів діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу» за згодою автора використані Приватним акціонерним товариством «Українське Дунайське пароплавство».

Автором, зокрема, удосконалено метод автоматичної адаптації порогових значень для вирішення завдання своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів. Зазначений метод заснований на організації накопичення усереднених вібродіагностичних параметрів та величин їх зміни у буферах різної часової тривалості, що дозволяє виявляти та прогнозувати небезпечну зміну технічного стану без необхідності стандартного завищення порогів при нестабільній віброактивності.

Також автором показано перевагу запропонованого методу побудови порогових значень порівняно зі стандартним підходом, який використовує завищення порогів за умов монотонних флуктуацій віброактивності, притаманних судновим умовам

Впровадження даних результатів дослідження дасть змогу підвищення ефективності діагностування елементів головної енергетичної установки водного транспорту з застосуванням методів вібродіагностики.

**Виконавчий директор
ПрАТ «Дунайсудноремонт»**



Віталій Купрієнко