

6. T. Aven, «Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation», *European Journal of Operational Research*, vol. 253, pp. 1-13, 2016. doi: **10.1016/j.ejor.2015.12.023**.
7. *Risk management – Guidelines*, ISO 31000:2018, 2018.
8. Risk focus: loss of power [Online]. Available: <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2022/03/Main-engine-Risk-Focus-Loss-of-Power.pdf>. Accessed on: April 15, 2023.
9. O.O. Larin, O.O. Vodka, and K.Ie. Potopalska, *Kompiuterne ta matematychni modeliuvannia v zadachakh prohnozuvannia nadiinosti pry postupovykh vidmovakh : monohrafiia* [Computer and mathematical modeling in the problems of predicting reliability with gradual failures: monograph]. Kharkiv, Ukraine: Yurait Publ., 2020. (Ukr.)
10. *Modeliuvannia skladnykh system : monohrafiia* [Modeling of complex systems: monograph], V.M. Soloviov, Ed., Cherkasy, Ukraine: Tretiakov O.M. Publ., 2015. (Ukr.)
11. S. Lu, and V. Pereverzev, Numerical differentiation from the view point of regularization theory, *Mathematics of Computation*, vol. 75, no. 256, pp. 1853-1870, 2006. doi: **10.1090/S0025-5718-06-01857-6**.

Рецензент: А.І. Головань
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 15.08.2023
Стаття прийнята 19.09.2023

УДК 629.5.05

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300121

© Мельник О.В.¹, Сорока В.В.²

ВІБРОДІАГНОСТИКА ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ СУДЕН: ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ

Дослідження присвячено розробці комплексного підходу вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту. Удосконалюється метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів. Удосконалюється метод автоматичної адаптації порогових значень для своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів. У ході дослідження сформульовані особливості спектрів вібраційних сигналів роторного обладнання та проведено їх аналіз з точки зору оцінки параметрів діагностично значимих компонентів. 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. 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.

¹ канд. техн. наук, доцент, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-0089-6535, melnik81@ukr.net

² здобувач ступеня доктора філософії, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-7581-7141

Ключові слова: суднова енергетична установка, судно, засоби водного транспорту, вібродіагностика, підшипник, вал, вібраційний сигнал, роторна машина, спектр, машина, обладнання, експлуатація.

O.V. Melnik, V.V. Soroka. Vibration diagnostics of the main power plant of vessels: improvement and integration of methods. The study is devoted to the development of a comprehensive approach to vibration diagnostics of the main power plant of water transport vehicles. The method of automatic processing of narrowband spectra is being improved. The method of automatic adaptation of threshold values for timely detection of changes in technical condition against the background of natural monotonous changes in vibration parameters characteristic of ship conditions is being improved. In the course of the study, the peculiarities of the spectra of vibration signals of rotary equipment were formulated and their analysis was carried out from the point of view of evaluating the parameters of diagnostically significant components. Automatic systems of centralized control and management are traditionally used to assess the current performance of SEU on ships. Their main purpose is to assess the quality of the SEU performance of the specified operating modes. But these systems do not allow solving the task of early prediction of the loss of performance of the most loaded and failure-prone SEU elements - rotary machines, because the controlled parameters of technological processes are either inertial and do not change synchronously with the development of faults, or do not react to the development of a number of dangerous defects until the onset irreversible consequences. The method of automatic diagnostics was further developed based on the results of monitoring vibration parameters of various nature and the assessment of the diagnostic significance of their changes against the background of natural monotonous fluctuations.

Key words: ship power plant, ship, means of water transport, vibration diagnostics, bearing, shaft, vibration signal, rotary machine, spectrum, machine, equipment, operation.

Постановка проблеми: 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 нецільне 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.

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.

Ці методи можна використовувати як у інформаційних системах для підтримки прийняття рішень оператором та організації обслуговування за фактичним станом, так і у автоматичних системах керування технічними засобами на основі фактичних даних. Тому розвиток методів автоматичного аналізу та обробки вібраційних параметрів з метою підвищення ефективності

діагностики головних енергетичних установок в умовах складної експлуатації є важливою темою для наукових досліджень.

Метою даної статті є дослідження методів підвищенні ефективності діагностування елементів головної енергетичної установки водного транспорту із застосуванням методів вібродіагностики.

Аналіз останніх досліджень. Останні десятиріччя характеризуються активними дослідженнями застосування вібраційних методів для контролю технічного стану СЕУ, оскільки вібрація постійно супроводжує працюючий механізм з рухомими частинами. Зміни у вібрації у порівнянні з нормальною роботою механізму несуть інформацію про характер взаємодії і дозволяє прогнозувати зміни технічного стану обладнання з виявленням можливих дефектів конкретних вузлів.

У 1939 році була опублікована фундаментальна стаття [1], присвячена оцінюванню технічного стану машин із низькою частотою обертання через амплітуду вібрації. Велику увагу було приділено вимірюванню вібропереміщення валу шляхом застосування проксиметрів, які дозволяли виявляти наявність автоколивань валу в підшипниках ковзання [2].

З часом стало зрозуміло, різні частотні області спектру корелюються з різними несправностями: це дозволило удосконалити оцінку технічного стану обладнання [3]. Але при цьому було зареєстровано непоодинокі випадки, коли при експлуатації систем вимірювана низькочастотна вібрація не змінювалася, а, навпаки, виникали випадки суттєвої зміни середньочастотної та високочастотної вібрації, що не приводило до вчасного виводу агрегату з експлуатації. А наслідком ставали аварійні ситуації [4]. Отже, визначення дійсного технічного стану обладнання можливо лише при використанні всього частотного спектру вібрації з допомогою різних методів.

Водночас з таким переходом активно втілювалися цифрові методи обробки інформації. Поєднання цифрових методів обробки інформації з роботою у різних діапазонах спектру дозволило точніше й оперативніше виділяти різні дефекти методами вібраційної діагностики із застосуванням різних частотних компонентів [5]. Одними із найпоширеніших методів аналізу стали методи, що використовували перетворення Фур'є [6], і метод ударних імпульсів (МУІ). Сутність останнього полягала у порівнянні величин високочастотних ударних імпульсів із рівнем фону. Результатом створення аналізаторів, що використовують швидке перетворення Фур'є (ШПФ), та широкого втілення цифрових технологій стала автоматизація процесів діагностики результатом з використанням багатоканальної системи моніторингу, заснованій на аналізі спектрів.

Глибока діагностика технічного стану обладнання за допомогою постійно підключених датчиків є основним методом моніторингу обладнання, де несправності виявляються через добре відомі симптоми [2]. Цей метод добре працює в однорежимному обладнанні; для багаторежимного обладнання – ситуація дещо інша і потребує безперервного вимірювання всіх діагностичних параметрів.

Дисперсія гармонійних і випадкових компонентів сигналу при вимірюванні вибіркового спектра у процесі вібродіагностики часто приводить до помилок. Вони усуваються методом Уелша або з використанням вікна Хана.

Так, у роботі [7] досліджено 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 середньоквадратичного значення (СКЗ) як гармонійного, так і полігармонійного сигналу.

Однак у даному спектрі спотворюються несинхронні складові, які можуть мати важливе діагностичне значення [8]. При таких спотвореннях втрачається важлива інформація про параметри даних компонентів, а змінюється фон спектру, оцінка якого є інформативною.

Важливим параметром вимірювання є частота, яка визначає точність подальшої ідентифікації дефекту. Для уточнення оборотної частоти піків вищих гармонік даної частоти поділяються на відповідні кратності [9]. Такий підхід дає суттєві помилки, оскільки частоти піків кратних гармонік можуть відхилитися від реальних частот.

У роботі [10] розглядається оцінка частоти синусоїдальної складової спектру по сусіднім частотним складовим спектру з використанням інтерполяції частотної функції прямокутного вікна. Але даний спосіб має низькі рівні сусідніх з максимальних відліків, що призводить до зменшення точності оцінки. Для підвищення точності використовують накладення частотних вікон, які підвищують кореляцію між сусідніми відліками спектра.

Суднові умови характеризуються девіацією частоти обертання і високим рівнем фону, а розглянуті методи аналізу є обмежено ефективними. Тому запропоновано використовувати спектральний аналіз для огинаючої вихідного сигналу, виділеної в певній заданій високочастотній області, що застосовується для глибокого вібродіагностування підшипників кочення [11]. Спектр огинаючої вихідного сигналу також вимагає подальшого аналогічного аналізу з метою оцінки періодичних та випадкових компонентів.

Таким чином, наведений аналіз свідчить про необхідність розробки комплексного методу діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Для вилучення із спектрів вібрації параметрів різної природи розроблено метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів. Сигнал вібрації роторного обладнання працюючої головної енергетичної установки (ГЕУ) може містити в собі компоненти різної природи – періодичні, випадкові та імпульсні, відомі методи виділення. При цьому основним видом аналізу, що дозволяє визначити 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, проте для суднових 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. 1).

Спектри суднового насоса

Спектри суднового двухступеневого планетарного редуктора

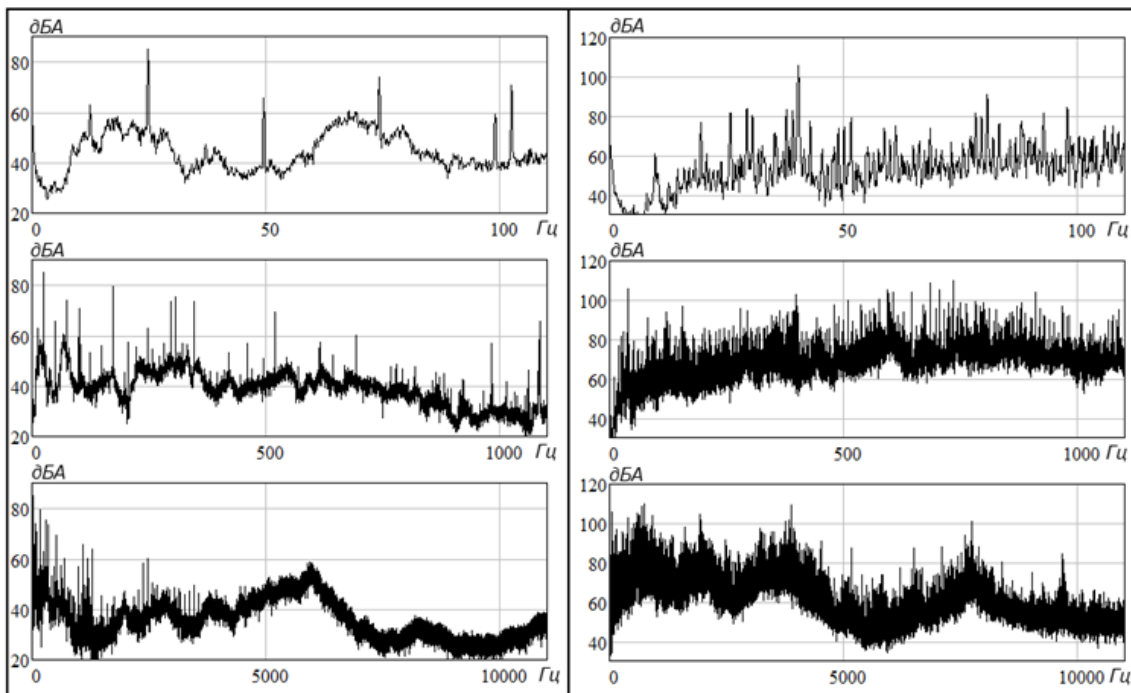


Рис. 1 – Спектри вібрації суднового насоса та планетарного суднового редуктора (Джерело: [12])

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:

- невіршеність (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, у ході дослідження сформульовані такі особливості спектрів вібраційних сигналів роторного обладнання та їх аналізу з точки зору оцінки параметрів діагностично значимих компонентів:

1. Спектр вібрації роторної машини в логарифмічних величинах (дБ) представляється вузькими викидами (рис. 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.

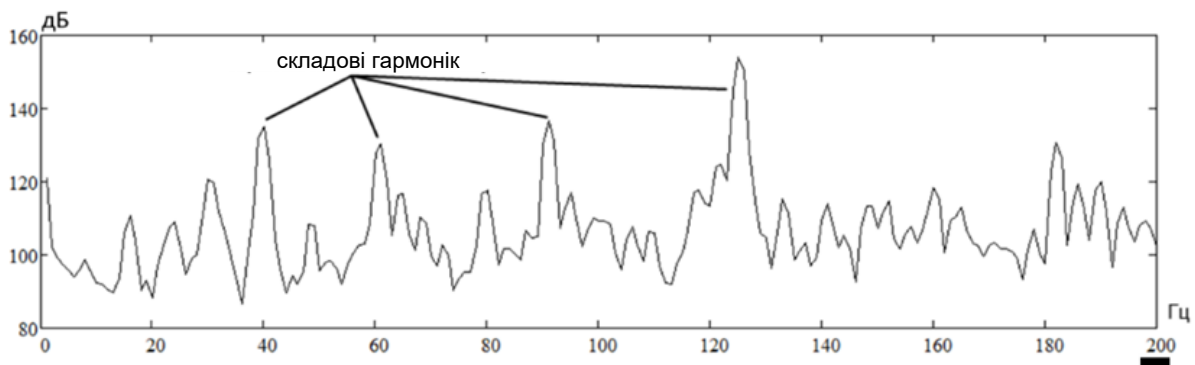


Рис. 2 – Гармонійні складові у спектрі вібрації планетарного суднового редуктора (результати візуального аналізу) (Джерело: [12])

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.

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 [13]. 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, особливо у обмежених за розміром суднових приміщеннях.

Виходячи з особливостей, розглянутих 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 [12], а похибка навіть у 20-30% може бути цілком допустимою.

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.

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 [3].

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 вихідного 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 вихідного спектру, які перевищили останній поріг до лінії фону. Даний масив визначає відліки, які відповідають гармонійним складникам, і далі використовуються для ідентифікації їх параметрів. Аналогічний алгоритм можна застосувати і для значень спектра в дБ, перевівши коефіцієнти K_p та K_n в дБ, й використати підсумовування відносних одиниць замість множення на коефіцієнт.

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 [4]. Для виключення даного впливу пропонується проводити згладжування відліків спектра у прямому, а потім у зворотному порядку (реверс) з подальшим обчисленням середнього за двома результатами.

Аналіз способів визначення діагностично значущих змін вібрації обладнання 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):

- 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).

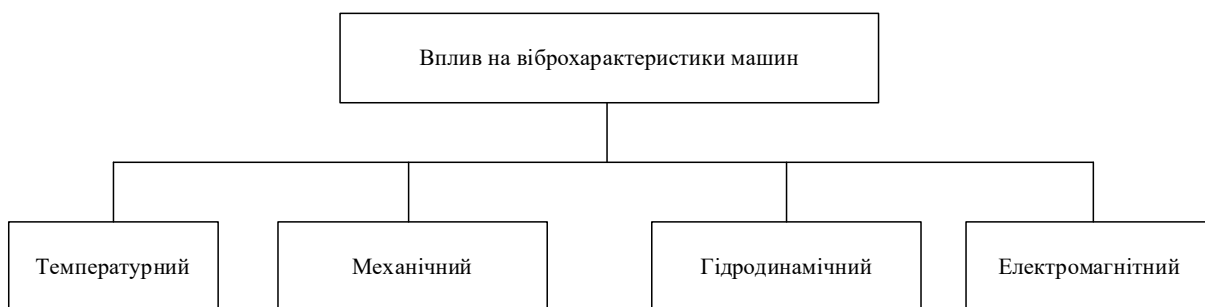


Рис. 3 – Класифікація впливу на віброхарактеристики машин (розроблено авторами)

Робота конкретного агрегату може супроводжуватись декількома подібними природними явищами, які можуть призводити до монотонних змін величин діагностичних вібраційних параметрів, значно відмінних від їх випадкових флуктуацій. 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, такій 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 [4].

Також у стандартах рекомендується визначати різні базові значення різних можливих значень робочих характеристик, 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 порогові враховують максимальний розкид за час спостереження, що охоплює найтриваліші монотонні різноспрямовані зміни.

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 [1-5]. 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. 4).

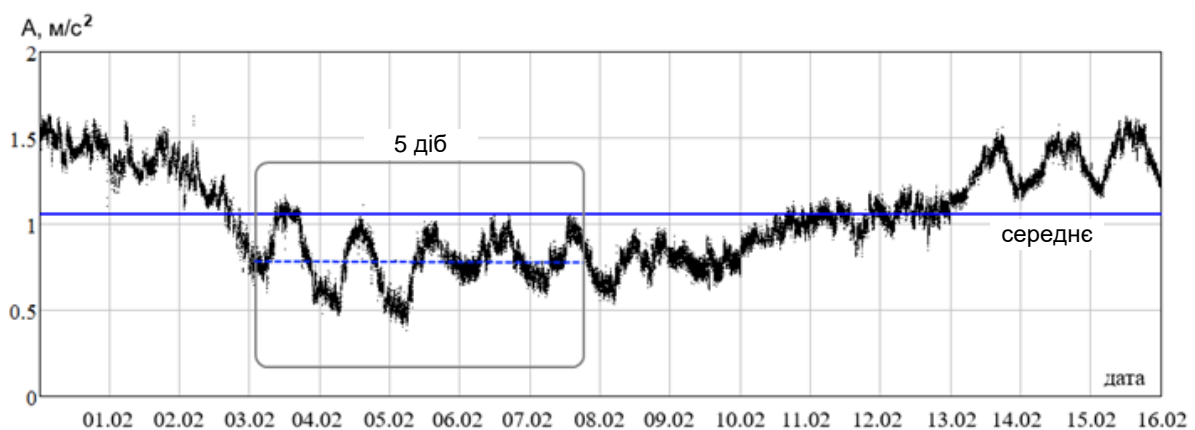


Рис. 4 – Графік зміни рівня гармоніки на частоті обертання газової турбіни (розроблено автором)

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.

Наведені на графіку (рис. 4) 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 виявленим 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 [9]. 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. 5 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 $P1$.

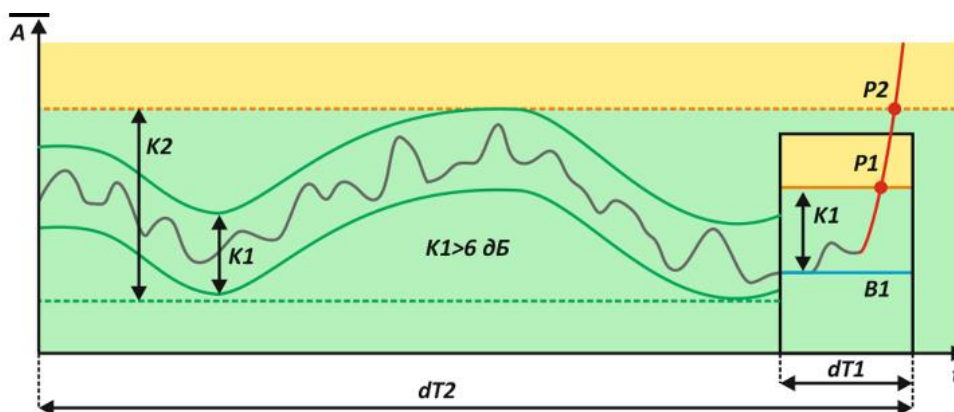


Рис. 5 – Виявлення вимірювання стану з оцінкою зростання на інтервалах із різною тривалістю (розроблено автором)

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.

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.

Висновки

У ході дослідження 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, який, на відміну від існуючих, є інваріантним до типу об'єкта діагностування, а прив'язка до конкретного агрегату здійснюється за допомогою складання конфігураційної матриці.

Перелік використаних джерел:

1. Rathbone T.C. Vibration tolerance. *Power plant engineering*. 1939. Vol. 43. Iss. 11. Pp. 721-724.
2. Bently D.E., Hatch C.T., Grissom B. Fundamentals of rotating machinery diagnostics. Minden : ASME, Bently Pressurized Bearing Company, 2002. 756 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.801FRM>.
3. Mitchell J.S. From vibration measurements to condition based maintenance. Seventy years of continuous progress. *Sound & vibration*. 2007. Vol. 41(1). Pp. 62-78.
4. Deery J. The «real» history of real-time spectrum analyzers. A 50-year trip down memory lane. *Sound & vibration*. 2007. Vol. 41(1). Pp. 54-59.
5. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*. 1965. Vol. 19 (90). Pp. 297-301. DOI: <https://doi.org/10.2307/2003354>.
6. Brigham E.O. The fast Fourier transform and its applications. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1988. 448 p.
7. Beregun V.S., Krasilnikov A.I. Research of excess kurtosis sensitiveness of diagnostic signals for control of the condition of the electrotechnical equipment. *Technical Electrodynamics*. 2019. Vol. 4. Pp. 79-85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.079>.
8. Chirica I., Presura A., Anghelută C.M. Retrofit solutions for green and efficient inland ships. *Journal of Physics: Conference Series* : 5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019, Mircea cel Batran Naval Academy, Constanta, Romania, 17-18 May 2019. Vol. 1297. Pp. 17-18. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012009>.
9. Tarasenko T., Zalozh V., Maksymov S. The ways to improve energy efficiency and eco-friendliness of the specific danube inland vessels. First Stage. *Journal of Physics: Conference Series* : 5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019, Mircea cel Batran Naval Academy, Constanta,

- Romania, 17-18 May 2019. Vol. 1297. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019>.
10. Scheffer C., Girdhar C. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Elsevier: Newnes, 2004. 272 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6275-8.X5000-0>.
 11. Міхалков С.В. Удосконалення технології діагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів за вібраційними характеристиками : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Харків: 2007. 20 с.
 12. Determination of top dead center location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis / R.A. Varbanets, V.I. Zalozh, A.V. Shakhov, I.V. Savelieva, V.M. Piterska. *Diagnostyka*. 2020. № 21(1). Pp. 51-60. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.
 13. Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals / A. Golovan et al. *SAE Technical Paper*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>.

References:

1. T.C. Rathbone, «Vibration tolerance», *Power Plant Engineering*, vol. 43, iss. 11, pp. 721-724, 1939.
2. D.E. Bently, C.T. Hatch, and B. Grissom, *Fundamentals of rotating machinery diagnostics*. Minden, Germany: ASME Publ., 2002. doi: **10.1115/1.801FRM**.
3. J.S. Mitchell, «From vibration measurements to condition based maintenance. seventy years of continuous progress», *Sound & vibration*, vol. 41(1), pp. 62-78, 2007.
4. J. Deery, «The «real» history of real-time spectrum analyzers. A 50-year trip down memory lane», *Sound & vibration*, vol. 41(1), pp. 54-59, 2007.
5. J.W. Cooley, and J.W. Tukey, «An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series», *Mathematics of Computation*, vol. 19(90), pp. 297-301, 1965. doi: **10.2307/2003354**.
6. E.O. Brigham, *The fast Fourier transform and its applications*. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall Publ., 1988.
7. V.S. Beregun, and A.I. Krasilnikov, «Research of excess kurtosis sensitiveness of diagnostic signals for control of the condition of the electrotechnical equipment», *Technical Electrodynamics*, vol. 4, pp. 79-85, 2019. doi: **10.15407/techned2017.04.079**.
8. I. Chirica, A. Presura, and C.M. Anghelută, «Retrofit Solutions for Green and Efficient Inland Ships», in *Journal of Physics: Conference Series: 5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019*, Constanta, Romania, 2019, vol. 1297, pp. 17-18. doi: **10.1088/1742-6596/1297/1/012009**.
9. T. Tarasenko, V. Zalozh, and S. Maksymov, «The Ways to Improve Energy Efficiency and Eco-friendliness of the Specific Danube Inland Vessels. First Stage», in *Journal of Physics: Conference Series: 5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019*, Constanta, Romania, 2019, vol. 1297, pp. 1-8. doi: **10.1088/1742-6596/1297/1/012019**.
10. C. Scheffer, and C. Girdhar, *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*, Elsevier: Newnes Publ., 2004. doi: **10.1016/B978-0-7506-6275-8.X5000-0**.
11. Mikhalkov S.V. «Udoskonalennia tekhnolohii diahnostuvannia pidshypnykiv kochennia elektrychnykh dvyhuniv teplovoziv za vibratsiinymy kharakterystykamy» [«Improvement of the technology of diagnosing the rolling bearings of electric engines of diesel locomotives by vibration characteristics »], PhD thesis, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2007. (Ukr.)
12. R.A. Varbanets, V.I. Zalozh, A.V. Shakhov, I.V. Savelieva, and V.M. Piterska, «Determination of top dead center location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis», *Diagnostyka*, № 21(1), pp. 51-60, 2020. doi: **10.29354/diag/116585**.
13. A. Golovan et al., «Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals», *SAE Technical Paper*, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1774**.

Рецензент: А.І. Головань
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 21.09.2023
Стаття прийнята 14.10.2023