

УДК 681.518.5

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).1.6](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).1.6)

MODELING AND DIAGNOSTIC IDENTIFICATION OF THE IMPACT OF DEGRADATION PROCESSES DURING OPERATION ON EQUIPMENT RELIABILITY

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВПЛИВУ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА НАДІЙНІСТЬ ОБЛАДНАННЯ

Mykola V. Kiyanovskiy
kyanovskiy.mv@knu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2210-9333

Nataliia M. Kiianovska
kiyanovskaya.n.m@knu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0108-5793

М. В. Кіяновський,
докт. техн. наук, професор

Н. М. Кіяновська,
канд. пед. наук, доцент

Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih
Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг

Abstract. *Aim of the study.* Development and unification of models of equipment functionality loss processes to solve the tasks of adaptive resource management based on the use of a generalized technical condition parameter, invariant to the equipment design and degradation processes, which will ensure the recognition of the technical states of equipment mechanisms in real time to form flexible maintenance regulations, the volume, and content of which are adequate to the technical condition of the mechanism. *Methodology.* Development of deterministic reliability models based on the physical nature and dynamics of degradation processes. Formalization of functionality loss and resource recovery processes. *Results.* The extensive experience in ensuring equipment functionality involves the use of probabilistic reliability models in maintenance and repair programs (MRO). This has delayed for a long time the consideration of the causes of degradation processes, their physical nature, and types of equipment defects in MRO regulations (thus ensuring their adequacy). The article systematizes and analyzes all known modern scientific methods for monitoring functionality, identifying defects, and predicting the dynamics of equipment technical condition changes. The research conducted and its results provide theoretical justification for the application and technical implementation of simplified algorithms for diagnostic identification of technical condition, which enhances the efficiency of operational processes. *Scientific novelty.* The issue of formalizing the processes of loss of functionality and resource recovery is always relevant in solving the tasks of ensuring reliability and managing the technical condition of industrial equipment in real-time. The problem of choosing methods for assessing equipment functionality for solving the tasks of the technical condition monitoring system is closely related to the issue of developing deterministic reliability models based on the physical nature and dynamics of degradation processes. *Practical impact.* A methodology has been developed for determining (based on criteria of economic efficiency, timeliness, and reliability) the suitability of methods for monitoring and practical use of wear and resource recovery process parameters. This is for implementing adaptive equipment reliability management «by condition» without removing the equipment from operation, under conditions of non-disassemblable identification of the technical condition.

Key words: determination of technical condition; real-time mode; industrial equipment; technical diagnostics; equipment reliability models; degradation processes.

Анотація. *Мета роботи.* Розробка та уніфікація моделей процесів втрати працездатності обладнання для вирішення задач адаптивного управління його ресурсом на основі використання узагальнюючого параметра технічного стану, інваріантного до конструкції обладнання, деградаційних процесів, що забезпечить розпізнавання технічних станів механізмів обладнання у реальному часі для формування гнучких регламентів обслуговування, об'єм і зміст яких адекватний технічному стану механізму. *Методика.* Розробка детерміністських моделей надійності, що будуються на фізичній природі, динаміці деградаційних процесів. Формалізація процесів втрати працездатності та відновлення ресурсу. *Результати.* Тривалий досвід забезпечення працездатності

обладнання полягає у використанні в програмах його технічного обслуговування та ремонтного відновлення працездатності (ТОіР) ймовірнісних моделей надійності, що загальмувало на тривалий час врахування причин розвитку деградаційних процесів, їх фізичної природи, та видів дефектів обладнання в регламентах ТОіР (і тим самим забезпечити їх адекватність). У статті виконано систематизацію і аналіз всіх відомих у сучасній науці методів моніторингу працездатності, ідентифікації дефектів, прогнозування динаміки зміни технічного стану обладнання. Проведене дослідження і його результати забезпечують теоретичне обґрунтування застосування і технічної реалізації спрощених алгоритмів діагностичної ідентифікації технічного стану, що сприяє підвищенню ефективності процесів експлуатації. *Наукова новизна.* Питання формалізації процесів втрати працездатності та відновлення ресурсу завжди є актуальним в процесі розв'язування задач забезпечення надійності і управління технічним станом промислового обладнання у режимі реального часу. Проблема вибору методів оцінки працездатності обладнання для вирішення задач системи моніторингу технічного стану тісно пов'язана із питанням розробки детерміністських моделей надійності, що будуються на фізичній природі, динаміці деградаційних процесів. *Практична значимість роботи.* Розроблено методику визначення (за критеріями економічної ефективності, оперативності, достовірності) придатності методів для моніторингу і практичного використання параметрів процесів спрацювання та відновлення ресурсу для впровадження адаптивного керування надійністю обладнання «за станом» без виводу з експлуатації обладнання, на умовах безрозбірної ідентифікації технічного стану.

Ключові слова: визначення технічного стану; режим реального часу; промислове обладнання; технічна діагностика; моделі надійності обладнання; деградаційні процеси.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Визначення методів оцінки працездатності у реальному часі з метою вибору найбільш придатних для діагностичного моніторингу, експрес дослідженню процесів спрацювання обладнання, при умові безрозбірної ідентифікації у режимі реального часу його технічного стану і без виводу з експлуатації, що створює умови адекватності у визначенні регламентів та змісту технічного обслуговування та ремонту (ТОіР).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питаннями визначення технічного стану обладнання займалися такі вчені, як Рубаненко О. [21-22], Баджай Мохіт [3], визначення технічного стану автомобілів займалися такі вчені, як Яньсю Ма, Сяолін Лю та інші [28]. У дослідженнях Мигаль В. Д. [18] розглянуто системи моніторингу ефективної експлуатації автомобілів. Питанням діагностики, ремонту та обслуговування промислового обладнання присвячені роботи Бархама Мохаммеда [2]. Аналіз сучасних методів реконструкції промислового обладнання проведено у роботах Іщенко А. [9]. Вивчення процесів деградації обладнання проведено у роботах Вейшуан Джоу [26]. Питанням надійності обладнання займалися Мегдад Пірсахєб, Хуман Сейфі [16], Голікова Є. В. [8], Яцек Каловський, Кароль Коваль [11], Джулі Біас Маседо, Ісіда Дідьє Лінс [12]. Тематиці деградації сталей внутрішньо-свердловинного обладнання при тривалій експлуатації присвячені роботи Винникова Ю., Харченко М., Мангура С., Аніскіна А., Мангура А. [25]. Моделі деградаційних процесів досліджували Правін Каннан та Джозеф Дж. Бірнацький [20], Лаура Пірес да Мата Коста та Аманда Л. Т. Брандао [15], Сюань Чжао та Джунсян Ван [27]. Мануель Санчес-Сільва та Джорджія-Енн Клутке працювали над аналізом даних деградаційних процесів та аналітичним

моделюванням, зосереджуючись на моделюванні життєвого циклу інженерних систем [23]. Ху С., Фан Х., Ванг З розробили моделювання деградації на основі гамма-процесу та методи прогнозування залишкового ресурсу [7]. Мохаммадмахді Хаджиха, Хіао Ліу та Джулі Хонг досліджували деградацію в динамічних робочих умовах, моделюючи конкуруючі процеси та програми [17].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Наукова новизна роботи полягає в тому, що в роботі вперше виконано систематизацію і аналіз всіх відомих у сучасній науці методів моніторингу працездатності, ідентифікації дефектів, прогнозування динаміки зміни технічного стану обладнання. Проведене дослідження і його результати забезпечують теоретичне обґрунтування застосування і технічної реалізації спрощених алгоритмів діагностичної ідентифікації технічного стану, що сприяє підвищенню ефективності процесів експлуатації.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробка та уніфікація моделей процесів втрати працездатності обладнання для вирішення задач адаптивного управління його ресурсом на основі використання узагальнюючого параметра технічного стану, інваріантного до конструкції обладнання, деградаційних процесів, що забезпечить розпізнавання технічних станів механізмів обладнання у реальному часі для формування гнучких регламентів обслуговування, об'єм і зміст яких адекватний технічному стану механізму.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процесу розробки детерміністських моделей надійності, що будуються на фізичній природі обладнання, динаміці деградаційних процесів, передують

вивчення матеріалів щодо експлуатаційних умов та особливостей обладнання (історичні дані про експлуатацію обладнання, включаючи параметри роботи, навантаження, умови середовища, ремонт та обслуговування); специфікації обладнання (технічні характеристики, конструкційні особливості, матеріали та методи виготовлення); наявні деградаційні моделі (теоретичні та емпіричні моделі деградації, включаючи математичні та статистичні моделі); датчиків та вимірювальне обладнання (пристрої для збору даних про стан обладнання в режимі реального часу); обчислювальних інструментів та програмне забезпечення (симуляційні програми, аналітичні платформи, машинне навчання та алгоритми обробки даних).

Методологія дослідження включає такі етапи, як моделювання деградаційних процесів (використання аналітичних, чисельних та симуляційних методів для прогнозування змін у параметрах обладнання з часом); аналітичні моделі (рівняння стану, диференціальні рівняння та інші формальні методи); комп'ютерне моделювання (розробка та тестування симуляційних моделей); діагностична ідентифікація (методи виявлення та класифікації дефектів і деградації, що включають методи нечіткої логіки, машинне навчання, аналіз надійності, ймовірнісні методи, сценарні аналізи).

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси деградації обладнання під час експлуатації та їхній вплив на надійність технічних систем.

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Предметом дослідження є методи моделювання та діагностичної ідентифікації впливу деградаційних процесів на показники надійності обладнання.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

При розв'язуванні задач забезпечення надійності і управління технічним станом промислового обладнання у режимі реального часу, завжди актуальним є формалізація процесів втрати працездатності та відновлення ресурсу. Вибір методів оцінки працездатності обладнання для вирішення задач системи моніторингу технічного стану розглядався у дослідженнях Бажака [3], де в першу чергу обґрунтовано потребу у розробці детерміністських моделей надійності, які будуються на фізичній природі, динаміці деградаційних процесів, що дозволяють прогнозувати зміни стану обладнання, сприяють зменшенню експлуатаційних витрат на його утримання у ході виробничого використання.

У цій ситуації доцільно розглянути відому множину методів вирішення кожної локальної задачі і, скориставшись результатами досліджень Бучинського М. Я., Горика О. В. [6], вибрати метод оцінки працездатності об'єкта.

Застосування раніше відомих методів технічно і організаційно є складним та досить дорогим

процесом, що супроводжується необхідністю розробки складних (через множину методів, що використовуються) систем технічної діагностики для кожного оригінального елементу технічної системи (обладнання) та відповідних деградаційних процесів їх спрацювання.

Витрачання ресурсу промислового обладнання відбувається внаслідок наступних, характерних для умов застосування, деградаційних процесів деталей механізмів та їх поверхонь (табл. 1, на прикладі гірничо-металургійного обладнання), що приводять до втрати працездатності обладнання.

Таблиця 1. Деструктивні процеси деталей механізмів та їх поверхонь

Назва процесу	Вплив на ресурс (%)
1. Руйнування корпусних деталей та елементів конструкцій при напруженнях нижче межі текучості	5
2. Об'ємні руйнування	15
3. Механічне пошкодження контактуючих поверхонь	40
4. Корозійне руйнування поверхневого шару	15
5. Абразивне зношення	25

Класифікація і види експлуатаційних дефектів безперервно досліджуються, виділяються характерні дефекти для типових деталей (наприклад, рис. 1), але потрібно визнати, що природа їх походження і фактори сприяння є надзвичайно різними.

Відповідно таблиці 1 складено поділ за фізичною природою груп деградаційних процесів, які мають свою динаміку і наслідки впливу на працездатність обладнання.



Рис. 1. Приклади характерних дефектів типових деталей

Аналізуючи рисунок 1 можна зробити висновок про невідворотність деградаційних процесів від дії факторів експлуатації навіть при умові, що вихідний стан, конструктивні передумови та експлуатаційні властивості елементів технічних систем були гарантовані на проектному етапі.

Через це на шляху до визначення уніфікованого параметру технічного стану інваріантного до фізичної природи деградаційних процесів потрібно провести

визначення та складання опису фізичної природи деградаційних процесів, провести їх формалізацію та моделювання динаміки деградаційних процесів і на цих матеріалах вибрати найбільш інформативні моделі зміни технічного стану елементів технічних систем від дії деградаційних процесів.

Формалізація та моделювання динаміки деградаційних процесів. Вибір найбільш інформативних моделей зміни технічного стану елементів технічних систем від дії деградаційних процесів

1) *Руйнування корпусних деталей та елементів конструкцій обладнання* пояснюються на основі енергетичної концепції теорії розвитку тріщин (Теорія Грифітса). Поява і розвиток пошкодження у вигляді тріщини при напруженнях нижче межі текучості здійснюється, якщо швидкість визволення енергії пружної деформації перевершує приріст поверхневої енергії тріщини. Наприклад, умова росту тріщини для плоскої пластини:

$$\frac{\sigma^2 \pi l^2}{E} \geq 4l(W_n + W_p), \quad (1)$$

де σ – напруження у пластині; E – модуль пружності; l – довжина тріщини у напрямку перпендикулярному до вектора напруження; W_n – енергія поверхневого натягу тріщини; W_p – робота пластичної деформації.

Попередження таких руйнувань можливе при навантаженнях за якими робочі напруження нижче приведенного рівня:

$$|\sigma| \geq 2\sqrt{\frac{E(W_n + W_p)}{\pi l}}, \quad (2)$$

2) *Об'ємні руйнування* від втоми відбуваються при циклічних навантаженнях деталей, при яких пружні деформації перевищують межу витривалості. Планове попередження таких руйнувань можливе при установленні і використанні кривої Веллера (або лінії Фретча) для відповідного елемента машини і коригуванні дії факторів, які визначають рівень фактичних напружень, зниження цього рівня і своєчасної заміни деталей при досягненні критичної кількості циклів навантажень.

3) *Локальні об'ємні руйнування від втоми* відбуваються при сполученні дії робочих навантажень і напруженого стану поверхневого шару матеріалу. У цьому випадку максимальні циклічні напруження визначаються як сума напружень визначених за рівнянням Герца-Беляєва і залишковими напруженнями I, II, III роду. Попередження цих руйнувань полягає в усуненні приросту робочих напружень від дії експлуатаційних дефектів і використання технологічних заходів зниження до мінімуму залишкових напружень.

4) *Локальні об'ємні руйнування* можливі і без накопичення пошкоджень, а раптово при зростанні енергії, здебільшого від дії теплових факторів, і перевищенні енергії активізації елементарних частинок матеріалу за рівнянням:

$$\gamma = c \exp\left(-\frac{E_a}{K\theta}\right), \quad (3)$$

де γ – швидкість зміни напруженого стану поверхневого шару; c – постійний коефіцієнт, який залежить від механізму процесу; E_a – енергія активації; K – постійна Больцмана; θ – температура матеріалу.

Це явище пояснює причини структурних перетворень, наприклад розпаду мартенситу і зростання напружень I і II роду, «заїдання», «схоплення» і відривання окремих поверхневих ділянок контактуючих матеріалів. Запобігання цих явищ досягається при проведенні заходів, які гарантують стабілізацію теплового стану і, відповідно, енергетичних відносин структурних складових матеріалів.

5) *Значні пошкодження* деталей технологічного обладнання утворюють хіміко-корозійні процеси від дії вологи, активних технологічних речовин, які розпочинаються за законами хіміко-термічної динаміки, коли ізобарно-термічний потенціал матеріалу (G – функція Гіббса) менше нуля за умовою:

$$\Delta G_{298} = \Delta G_{298}^0 + R\theta \ln \frac{c^1}{c}, \quad (4)$$

де ΔG_{298}^0 (Дж/моль) – стандартна величина зміни потенціалу G о кисно-відновлювальної реакції при температурі $\theta = 298$ К; c , c^1 – концентрація (активність і парціальний тиск) речовин реакції; R – газова постійна.

Коли $\Delta G_{298} > 0$ починається корозійне руйнування поверхні металу, швидкість якого визначається рівнянням Еванса:

$$\frac{y^2}{K_{\text{диф}}} + \frac{2y}{K_c} = 2c_0 t, \quad (5)$$

де y – товщина плівки пошкодженого металу; $K_{\text{диф}}$ – коефіцієнт дифузії; K_c – постійна швидкості хімічної реакції; c_0 – концентрація реагенту; t – час реакції. Цих даних досить для визначення засобів запобігання корозійних пошкоджень деталей протягом періоду експлуатації і при технічному обслуговуванні обладнання.

6) *Зношення робочих поверхонь*. Враховуючи переважний вплив на швидкість спрацювання ресурсу обладнання процесів механічного зносу і узагальнюючи результати досліджень: О. Рейнольдса [19], Д. Тейбора [5] – закономірності тертя кочення і вплив проковзування та внутрішнього гістерезису напружень матеріалу опори, рівняння Арчарда для визначення впливу відношення механічних властивостей і рівня напружень на величину зносу, акад. А. Ю. Ішлінського – закономірності тертя при релаксуючих пружно-в'язких деформаціях опор, проф. І. В. Крагельського – дослідження зносу при дискретному стиканні твердих тіл, фрикційної втоми пар тертя, М. М. Хрушова, М. А. Бабічева – дослідження відносної зносостійкості матеріалів, Б. І. Костецького – визначення критичних швидкостей корозійного зносу поверхонь, можна визнати, що найбільш уніфікованим методом визначення швидкості зносу є залежність:

$$\gamma = \frac{\partial U}{\partial t} = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_n), \quad (6)$$

де k – константа, яка залежить від матеріалу та умов зносу; p – тиск на поверхні тертя; v – швидкість відносного ковзання тіл тертя.

Ця залежність досить виразно окреслює напрямки мінімізації швидкості спрацювання деталей, але ускладнена відсутністю практичного контролю і мінімізації основних енергоутворюючих параметрів тертя.

У цьому випадку можна довести, що швидкість спрацювання

$$T_i = F(R_i) \quad (7)$$

пропорційна добутку сил тертя і швидкості руху зони тертя, тобто потужності процесу пошкодження. Враховуючи, що технологічне обладнання промислових виробництв – це переважно стаціонарні машини з обертовим робочим рухом, то відповідно принципу Д’аламбера примусові сили мають циклічний характер. У цьому випадку опираючись на визначення густини потоку енергії коливального руху Воробйова В. В. [24], можна вважати, що потужність процесу пошкодження еквівалентна середній густині потоку енергії коливального руху, тобто швидкість спрацювання, може бути представлена наступним виразом:

$$\gamma = 0,5k^1 \rho A^2 \omega^2 v, \quad (8)$$

де k^1 – константа, яка залежить від матеріалу та умов зносу; ρ – щільність матеріалу; A , v – амплітуда і швидкість коливальних збуджень зони пошкодження; ω – кутова швидкість цієї зони.

Згідно Андrenко П. М. [1] моделі відмов механізмів, які використовують визначальні параметри деградаційних процесів називають параметричними. Використання таких моделей дозволяє провести оцінку технічного стану механізмів обладнання за результатами вимірювання окремих або визначального (узагальнюючого) параметра (якщо він встановлений), не чекаючи появи відмови механізму, що дозволяє керувати технічним станом машини в реальному часі. Таким чином, умова врахування фізичної природи деградаційних процесів обумовлює використання параметричних моделей надійності. Але більшість обладнання – це складні технічні системи і спрацювання їх елементів здійснюється під дією певної множини деградаційних процесів, в яких потрібно враховувати велику кількість параметрів технічного стану. Ця реальність заперечує можливість інваріантності методу моніторингу процесів спрацювання та відновлення обладнання технологічних систем промислових виробництв, прийняту як задачу досліджень.

На цих умовах потрібна мінімальна сукупність статичних і динамічних параметрів, яка є інформаційною базою для формалізації методів побудови алгоритмів визначення технічного стану на основі прийнятої детерміністської (математичної) моделі.

Частіше всього (в умовах невизначеності), як початкову математичну модель, краще прийняти модель «чорного ящика», з допомогою якої працездатний або непрацездатний стан машини визначається як динамічний стан системи в кожний момент часу значеннями вхідних (конструктивних, технологічних, експлуатаційних), внутрішніх (умови кінематичної і динамічної взаємодії + вплив деградаційних процесів) і вихідних параметрів (параметри функціонування). Це пояснює чому на сьогоднішній час, через потребу врахування великих масивів діагностичних ознак, не створюються системи діагностичного моніторингу. Значне спрощення у класифікації деградаційних процесів досягається шляхом поділу масивів діагностичних ознак на підгрупи характерних для типових деталей, але залишається проблема створення алгоритмів розпізнавання інваріантних до конструкції машин.

Вибір в масивах діагностичних ознак інформативних ознак технічного стану інваріантних до виду деградаційних процесів

Вибір і аналіз таких моделей показує, що найбільш інформативними параметрами процесів спрацювання можуть стати їх прямі або побічні енергетичні параметри моделей деградаційних процесів з наступних міркувань.

У процесі функціонування механізмів технологічного обладнання при переробці сировини енергія приводу перетворюється в роботу його виконавчих робочих органів. Всі деталі кінематичних і силових ланцюгів механізмів, через які передається і перетворюється енергія приводу знаходяться в режимі динамічної взаємодії. Цей енергетичний потенціал спричиняє розвиток деградаційних процесів. При цьому вважається, що в будь-якому режимі справного функціонування, взаємодія передавальних ланцюгів (технічний стан яких деградує у часі) повинна прагнути до динамічної рівноваги.

Для кожного процесу руйнування чи пошкодження деталей існують енергетичні межі, перехід за які обумовлює зростання інтенсивності швидкості спрацювання обладнання і є недопустимим. В такому разі потрібно пов'язати фізичну суть процесів пошкодження і енергетичного бар'єру їх інтенсивного протікання. Внаслідок цього при технічному обслуговуванні чи ремонті обладнання, в першу чергу необхідно планувати заходи для мінімізації енергетичного рівня взаємодії елементів механізмів відповідно до переважаючих процесів пошкодження

Контроль енергетичного навантаження елементів механізмів обладнання є найбільш інформативним критерієм швидкості спрацювання їх ресурсу, і тому використання цього критерію як уніфікованого інваріантного засобу контролю процесів спрацювання ґрунтується на наступних доказах. При експлуатації механізмів обладнання на них діють різні

види енергії (механічна, теплова, хімічна та ін.), але розвиток і активізація процесів інтенсивного спрацювання їх елементів настає коли рівень енергії перевершує деякий критичний. Основним наслідком дії різних видів енергії є зношення поверхонь, зміна їх геометричної форми, порушення законів функціонування. Частково попередження настану критичних рівнів енергетичного навантаження і, як наслідок, попередження підйому інтенсивності спрацювання механізмів від дії механічних, теплових, хіміко-технологічних навантажень, досягається оперативним контролем функціональних параметрів: температури, тиску, вологості, складу хімічних інгредієнтів середовища, параметрів маслосистем та ін. Інваріантність методу діагностичного моніторингу може полягати на контролі і попередженні критичного рівня динамічного навантаження.

Ця обставина обґрунтовує введення критеріїв контролю енергетичного рівня динамічного навантаження (вектор динамічної урівноваженості у силовому полі машини) з метою запровадження інваріантного критерію попередження умов спрацювання і моделювання процесів втрати працездатності обладнання (за схемою на рисунку 2) з встановленням закономірності його зміни в умовах виробничого використання обладнання. Вимоги до вибору показників енергетичного рівня полягають у спроможності діагностичного розпізнавання виду процесу, що спричиняє його зростання.

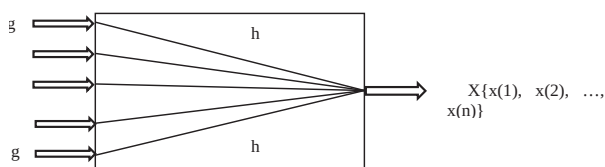


Рис. 2. Модель впровадження інваріантного енергетичного критерію технічного стану X для оцінки впливу деградаційних процесів $g(1.....n)$.

Розробка діагностичної моделі оцінки працездатності обладнання на основі енергетичних параметрів процесів їх деградаційних процесів

Швидкість втрати працездатності обладнання промислових виробництв обумовлена інтенсивністю процесів $g(1.....n)$, що спричиняють накопичення пошкоджень, зношення деталей функціональних вузлів та робочих поверхонь обладнання.

Статистичне вивчення цих процесів, встановлення їх закономірностей, дозволяє отримати ймовірності моделі надійності і задовольняє потребу у організації ремонтно-відновлювального обслуговування на базі ймовірнісних оцінок експлуатаційних властивостей. Але це не стало достатньою умовою для мінімізації швидкості спрацювання і витрачання ресурсу обладнання при певних умовах його експлуатації. Досягнення цієї мети можливо лише при розкритті

фізичних закономірностей процесів зносу та пошкодження обладнання. У цьому випадку швидкість витрачання ресурсу U при будь якій природі деградаційних процесів за Білодієнко С. В. [4]

$$\gamma = \frac{\partial U}{\partial t} = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_n), \quad (9)$$

де Z – параметри, які характеризують вплив конструктивно-технологічних, монтажних, налагоджувальних дефектів, деградаційних процесів та умов експлуатації.

Для отримання інформації щодо впливу деградаційних процесів $g(1.....n)$, розглянемо методику використання їх енергетичних параметрів у складі діагностичного моніторингу та умови їх інваріантності до різних конструктивних елементів технічних систем.

Для цього припустимо, що всі машини складаються із структурно-подібних груп, які в залежності від функції є комплексами різномірних елементів, сполучених в механічні, гідравлічні, пневматичні, електричні, газодинамічні і комбіновані системи. Кожна машина функціонуючи і взаємодіючи із зовнішнім середовищем, породжує безліч фізичних і хімічних процесів, які характеризуються вихідними параметрами.

При цьому розвиток дефектів і деградаційних процесів впливає на параметри динамічної системи у вигляді зміни характеру взаємодії елементів, зміни функції примусової сили, передавальної функції механізму.

Ці фактори можна розділити на робочі (функціональні) і супутні (динамічні, шуми, стук, вібрації, коливання, люфти і ін.). Вихідні параметри X істотно залежать від стану структурних елементів і характеру їх взаємодії. З іншого боку вихідні параметри X тісно корельовані з макроструктурою, режимами навантаження і спрацювання деталей машини (через енергетичні показники) і тому служать в ролі непрямих ознак для визначення її технічного стану [10] без розбирання.

Таким чином, впровадження маловитратних стратегій обслуговування «за станом» насамперед пов'язане з створенням інформаційної і методичної бази систем моніторингу, необхідної для аналізу вихідних стаціонарних функціональних параметрів і динамічних реакцій машини на робочий процес, з метою визначення її технічного стану в мінімальному прикметникову просторі.

Збереження параметрів працездатності обладнання при виконанні виробничих операцій вимагає підвищення енергетичних витрат на підтримку динамічної рівноваги елементів механізму.

Енергетичні витрати на підтримку умови рівноваги істотно впливають на ККД механізму і технологічної машини загалом, і стають досить інформативним джерелом відомостей про технічний стан елементів механізму, наявність дефектів або розвиток деградаційних процесів.

Таким чином, динамічні реакції взаємодії елементів можна розглядати як джерело інформації про технічний стан елементів механізму за величиною простоту енергетичних параметрів взаємодії. Вимірюючи параметри динамічних реакцій можна встановити залежність:

$$T_i = F(R_i), \quad (10)$$

де T_i – параметр технічного стану; R_i – відповідна реакція взаємодії елементів механізму.

У ході продуктивного використання технологічних машин, тобто в умовах їх справного функціонування, загальна передавальна функція їх механізмів знаходиться в межах допусків, але зазнає все більших флуктуацій за рахунок зміни і розузгодження передавальних функцій $h(1...n)$ елементів механізмів, що не контролюються. В умовах експлуатації збурюючі впливи і динамічні характеристики механізму є параметрами, що прямо не спостерігаються.

Для вивчення діагностичної інформації в характері реакцій взаємодії деталей і вузлів механізму необхідно їх описати за допомогою диференціальних (у часі) або алгебраїчних (в частотній області) рівнянь. Однак треба помітити, що реакціями, які контролюються методами безрозбірного контролю є тільки вихідні реакції кінцевих ланок $X_j(t)$, які є суперпозицією реакцій взаємодії структурних елементів механізму і можуть бути описані через інтеграл Дюамеля

$$X_j(t) = \sum_{i=1}^p x_{ji}(t) = \sum_{i=1}^p \int_0^t h_{ji}(\tau) q_i(t-\tau) d\tau \quad (11)$$

де $q_i(t)$ – вплив на i -му вході; $h_{ji}(t)$ – імпульсна перехідна функція на часовому відрізку $(t-\tau)$. При цьому $q_i(t)$ і $h_{ji}(t)$ є символьними факторами моделі втрати працездатності від дії деградаційних процесів, що інструментально не визначаються.

Реалізація такого методу апаратними засобами можлива, але вона пов'язана зі значними витратами і тому треба знаходити способи вирішення цієї задачі без збільшення експлуатаційних витрат. Для цього треба вивчити склад чинників, що створюють $q_i(t)$, а саме: рівень змушуючих сил; пружно-інерційні характеристики елементів системи; дефекти виготовлення, складання, експлуатації.

Перехідна функція $h_{ji}(t)$ повинна утворити одомірну ознаку технічного стану інваріантно до природи деградаційних процесів. Найбільш перспективним методом діагностики є оцінка впливу $q_i(t)$ на рівень динамічної реакції механізму. У такому складі процеси спрацювання механізмів через рівень енергетичного навантаження їх деталей і динамічних реакцій взаємодії ще не вивчалися, але саме такий склад процесів спрацювання задовольняє інформаційну забезпеченість діагностичного моніторингу технічного стану.

Спираючись на Білодіденко С. В. [4] та Кіановського М. В. [13-14], можна стверджувати, що динамічна взаємодія елементів механізму породжує

коливальні процеси, а їх характеристики будуть корельовані з глибиною розвитку дефекту.

Під діагностичною реакцією елемента, який контролюється, мається на увазі відгук елемента виражений у виді коливального збудження, від дії $q_i(t)$. Отже об'єктивна діагностична інформація про технічний стан деталей і вузлів механізмів обладнання може бути знайдена в аналізі енергетики процесів їх взаємодії, так як в процесі перетворення енергії джерела в роботу генеруються змінні сили, які збуджують коливання окремих частин машини.

Отже, ознака R (10) може бути встановлена на початку експлуатації машини і посилюється або змінюється при появі або розвитку дефектів і має циклічний характер, який є гармонізованим з основною частотою робочого процесу машини. Оскільки R – це силова характеристика елемента, який генерує коливання, то вона визначає енергетичні витрати джерела коливань, які збільшуються в зв'язку з розвитком дефекту.

Таким чином *енергетичний показник коливальних збуджень у ході динамічної взаємодії елементів може стати уніфікованим, інваріантним (до виду деградаційного процесу, до виду конструкції об'єкта експлуатації) показником технічного стану*, але залишається проблема ідентифікації виду дефекту, що забезпечить умову адекватності змісту ремонтного втручання для відновлення працездатності машини.

Вирішення задачі ідентифікації дефектів в операціях діагностичного моніторингу

Складність частотного складу енергетичного спектра зумовлена складністю коливальних процесів, що генеруються деталями і вузлами механізму в процесі їх продуктивного використання. При аналізі енергетичного спектра передбачається, що зародження кожного дефекту, його розвиток виявляється у вигляді частотного компонента різної інтенсивності.

Перехідна функція $h_{ji}(t)$ повинна передати інформацію про наявність, розвиток дефектів і деградаційних процесів до складу одомірного інтегрального показника технічного стану X . Щоб зрозуміти природу $h_{ji}(t)$ потрібно використати описи механічного об'єкта у частотній області, у часі і представити механізм у вигляді динамічної системи з n мірами свободи:

$$M\ddot{x} + K\dot{x} + Cx = G, \quad (12)$$

де M, K, C – симетричні матриці $(n \times n)$ коефіцієнтів інерції, демпфування і жорсткості, а x і G – n -мірні вектори координат і діючих сил.

При цьому передбачається, що динамічні реакції взаємодії елементів, що змінюються при появі дефекту входять в рівняння в неявному вигляді (тобто через наслідкові зміни коефіцієнтів інерції, демпфування і жорсткості. Цей висновок незадовільний з точки зору задач ідентифікації дефекту або дефектів і інформативності процесів контролю технічного стану.

Для уникнення перекоування діагностичної інформації у складі інтегрального сигналу про

технічний стан об'єкта Андренко П.М. [1] рекомендує динамічну модель механічного об'єкта записати в операторному вигляді:

$$X(t) = LG(t) \quad (13)$$

де $X(t)$ – вектор вихідних сигналів; $G(t)$ – вектор вхідних впливів і зберегти незмінними вхідні впливи, то ми будемо реєструвати зміни вихідних сигналів механізму, тобто передавальна функція механізму стає функцією двох аргументів $L[G(t)\Delta S(\omega)]$ і для оцінки технічного стану треба встановити значення аргументу і міри його впливу на оператор системи L .

Реакцію на вхідний вплив можна записати за допомогою системного оператора $X(t) = Ly(r)$. Перехідна функція буде лінійною, якщо:

$$L(y_1 + y_2) = Lg_1 + Lg_2 \text{ і } L(\alpha y) = \alpha Ly \quad (14)$$

У цьому випадку сигнал динамічної взаємодії (коливальне збудження від дії $g_i(\omega_i)$), проходячи через лінійну систему, залишається незмінним за формою, і набуває лише іншої амплітуди і початкову фазу $X_j(\omega_i + \Delta\varphi)$. У частотній області для лінійних систем вхідний вплив викликає реакцію на тій же частоті, а результат одночасного впливу декількох сил (декількох дефектів) є суперпозицією відгуків на кожну з них. Це може стати умовою розпізнавання дефектів і це може бути досягнутим, якщо передавальна функція в задачі діагностичного контролю, може бути визначена через енергетичні показники (уніфіковані, інваріантні (до виду деградаційного процесу, до виду конструкції об'єкта експлуатації) перетворень коливальних збуджень у ході динамічної взаємодії елементів.

Андренко П. М. [1] запропоновано у ролі передавальної функції використовувати показник спектральної щільності перетворень енергетичних спектрів коливальних збуджень $S_x(\omega) = S_y(\omega)[H(j\omega)]^2$.

У разі корельованих впливів спектральна щільність потужності реакції на j -му виході (тобто ознакою ідентифікації дефекту) має її вид:

$$Sx_j(\omega) = \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^p H_{jk}(\omega) H_{jl}(\omega) Sq_k q_l(\omega) \quad (15)$$

де $H(\omega)$ – комплексно-зв'язана функція, що може бути вивчена експериментально за допомогою спектральної щільності потужності коливань

$$S_i(\omega) = [H_i(\omega)]^2 S_{q_i}(\omega), \quad (16)$$

де H_i – імпульсна перехідна функція елемента, що характеризує відгук елемента на i -й одиничний вплив; $S_{q_i}(\omega)$ – спектр потужності i -го впливу; ω – кругова частота.

У разі нелінійності діагностичної моделі, тобто коли дефект (а це частіше всього буває при значному розвитку дефекту) передавальна функція

$$H_i = \frac{\omega_c^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 + j\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)\frac{1}{Q}}, \quad (17)$$

де ω – частота i -го впливу (збудження); ω_c – власна частота i -го елемента $\sqrt{\frac{c}{m}}$; Q – добротність джерела коливань $\sqrt{\frac{cm}{k}}$; $Sq_k q_l$ – взаємний спектр K -го і l -го впливів.

Вибір у ролі передавальної функції спектральної щільності перетворень енергетичних спектрів коливальних збуджень дозволяє використовувати діагностичний сигнал у виді коливальних процесів різної природи від дії дефектів.

Таким чином, кількісною мірою появи, зростання і ідентифікації дефекту, оцінкою закономірності зміни інтенсивності, що характеризує характер і темп розвитку дефекту обладнання може бути рівень і темп зміни спектральної щільності i -ї дільниці енергетичного спектра діагностичного сигналу, що є передумовою вибору методу безрозбірного оцінювання технічного стану обладнання.

Цей метод забезпечує концепцію безрозбірного контролю з використанням інтегрованих показником технічного стану.

Розробка методичних засад локалізації та розпізнавання дефектів на підставі використання інваріантного до виду (деградаційного процесу, конструкції об'єкта експлуатації) інтегрального діагностичного сигналу

Поява дефектів на різних стадіях їх існування (зародження, розвиток, катастрофічний вплив) має одну особливість: вони не змінюють динамічну рівновагу елементів механізмів, але відповідно принципу Д'аламбера змінюють енергетичний рівень процесів взаємодії цих елементів від появи примусових сил від дії відповідних дефектів:

$$[m - \Delta m]a(t) + [r - \Delta r]v(t) + [c - \Delta c]x(t) = F_0 + F_i(t) \quad (18)$$

$\Delta m = \frac{F_i a}{a(t)}$ – зміна масових характеристик ланок механізмів від дії дефектів;

$\Delta r = \frac{F_i v}{v(t)}$ – зміна дисипативних характеристик ланок механізмів від дії дефектів;

$\Delta c = \frac{F_i x}{x(t)}$ – зміна характеристик жорсткості ланок механізмів від дії дефектів.

Де a , v , x – параметри коливальних рухів (відповідно прискорення, швидкість, переміщення) ланок механізмів обумовлених коливальними силами $F_{i=(2,3,4)}$ – від дії дефектів, F_0 – узагальнена сила, що врівноважує механізм (при відсутності дефектів); F_1 – додаткова узагальнена сила, що врівноважує механізм (при наявності дефектів). Примусові сили, що обумовлені появою дефектів, прискорюють процеси спрацювання обладнання.

Розкриття природи примусових сил $F_{i=(2,3,4)}$ і в першу чергу в енергетичній площині, може дати відповідь про умови вибору уніфікованого, інформативного методу локалізації і розпізнавання дефектів і як наслідок мінімізації швидкості спрацювання ресурсу обладнання.

Визначення і пояснення появи примусових сил $F_{i=(2,3,4)}$ від дії конструктивно-технологічних дефектів

та пошкоджень механічних вузлів можливо на підставі аналізу породженої ними коливальної активності зони збудження. Оскільки динамічні реакції системи механізмів технологічного обладнання, які контролюються, для визначення процесів спрацювання її компонентів, зумовлені характеристиками коливань її i -ї точки, то доцільно розглянути рівняння цих коливань.

Рівняння коливань i -ї точки зони збудження від дії дефектів, як наслідків деградаційних процесів, складається на основі загальних для коливальних систем методів. Коливальні збудження від впливу дефектів механізму можуть бути описані диференціальними рівняннями або рівняннями що приводяться до лінійних (для незначних коливань). Ці рівняння описуються на основі законів Ньютона або Д'аламбера, що представляють при поступальних коливаннях рівність нулю геометричної суми сил реакції зв'язків і інерційних сил в будь-якій точці коливальної системи.

Це є достатнім для опису коливального руху механізму, але для ідентифікації і локалізації дефекту, розуміння темпів його зростання потрібно встановити локалізацію у вібраційному полі зон приросту енергії від дії дефекту. Це можливо встановити за допомогою коливань, які можуть бути описані рівняннями Лагранжа. Рівняння Лагранжа можна записати в узагальнених координатах:

$$\sum_{i=1}^s (a_{ij}q_i + b_{ij}q_i + c_{ij}q_i) = Q_i, \quad (19)$$

де q_i – узагальнені координати, що однозначно визначають положення системи; Q – узагальнена сила, що діє в напрямі i -ї координати; s – число мір свободи; Узагальнена сила Q_i – є результуюча діючих в коливальній системі сил:

- змушуючих $f_i(t)$;
- потенційних $Q_{mi}(t) = -\frac{\partial W_n}{\partial q_i}$ (W_n – потенційна енергія системи);
- дисипативних $Q_{vi} = -bq_i$ (b – коефіцієнт втрат).

Тобто як система S лінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку відносно S узагальнених координат. У коливальних системах, що розглядаються, змушуючі сили є гармонічними (тобто описують коливання поза зонами резонансу). Підстановка виразів q_i та їх похідних у це рівняння дає систему алгебраїчних рівнянь відносно амплітуд коливань. Аналіз складових цього рівняння може пояснювати основні закономірності розвитку дефектів та пошкоджень.

При малих коливаннях від дії дефектів та пошкоджень, кінетична енергія системи, що містить зосереджену масу m_k ($k = 1, 2, \dots, n$), є квадратичною функцією їх швидкостей.

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n m_k v_k^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n m_k (x_k^2 + y_k^2 + z_k^2), \quad (20)$$

де v_k – швидкість руху k -ї маси; x_k, y_k, z_k – проекція вектора швидкості v_k – у декартових координатах.

Радіус – вектор k -ї точки коливальної системи зі стаціонарними зв'язками, що має n мір свобод,

є функцією узагальнених координат q_i системи. Координати x_k, y_k, z_k можуть представлятися функціями $x_k = x_k(q_1, \dots, q_s)$, $y_k = y_k(q_1, \dots, q_s)$, $z_k = z_k(q_1, \dots, q_s)$. З урахуванням того, що

$$X_k = \left(\frac{\partial x_k}{\partial q_1} \right) q_1 + \dots + \left(\frac{\partial x_k}{\partial q_s} \right) q_s, \quad (21)$$

де $q_i = \frac{\partial q_1}{\partial t}$ (для y_k і z_k аналогічно), вираження кінетичної енергії в узагальнених координатах має вид:

$$W_k = \left(\frac{1}{2} \right) (a_{1,1}q_1^2 + \dots + a_{ss}q_s^2 + 2a_{1,2}q_1q_2 + \dots + 2a_{s-1}q_{s-1}q_s), \quad (22)$$

де $a_{ij} = a_{ji} = \partial^2 \frac{W_k}{\partial q_i \partial q_j}$ – коефіцієнти інерції, що визначаються масою (моментами інерції) елементів або що є їх функціями. Таким чином, кінетична енергія при малих коливаннях – це квадратична функція узагальнених швидкостей системи. Аналогічно потенційна енергія цієї системи є квадратичною функцією самих узагальнених координат q_i :

$$W_n = \left(\frac{1}{2} \right) (c_{1,1}q_1^2 + \dots + c_{ss}q_s^2 + 2c_{1,2}q_1q_2 + \dots + 2c_{s-1}q_{s-1}q_s), \quad (23)$$

де $c_{ij} = c_{ji} = \partial^2 \frac{W_n}{\partial q_i \partial q_j}$ – коефіцієнти жорсткості системи. Для систем із загасанням коливань, зумовлених силами опору Q_{vi} пропорційними швидкостям V_i системи, вводиться дисипативна функція втрат (функція розсіювання), яка також є квадратичною функцією узагальнених швидкостей.

$$\Phi = \left(\frac{1}{2} \right) (b_{1,1}q_1^2 + \dots + b_{ss}q_s^2 + 2b_{1,2}q_1q_2 + \dots + 2b_{s-1}q_{s-1}q_s), \quad (24)$$

де $b_{ij} = b_{ji}$ – коефіцієнти втрат.

Локалізація дефекту обумовлена локальними змінами енергетичних характеристик вібраційного поля машини в зоні дії дефекту

$$\frac{d\partial W_k}{dt \partial q_i} - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, s), \quad (25)$$

де W_k – кінематична енергія системи; q_i – узагальнені координати, що однозначно визначають положення системи;

Таким чином, у тримірному вібраційному полі, за величиною приросту показників швидкості коливальних рухів i -ї точки поля, що змінюється від дії узагальнюючих сил за рівнянням Лагранжа (зміна вектору і величини Q_i) можлива локалізація дефектів та пошкоджень при умові використання інваріантного інструменту для оцінки впливу деградаційних процесів різної природи на технічний стан машини.

ОБГОВОРЕННЯ

ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Проведення дослідження і їх результати забезпечують теоретичне обґрунтування застосування і технічної реалізації спрощених алгоритмів діагностичної ідентифікації технічного стану, що сприяє підвищенню ефективності процесів експлуатації шляхом:

1. Вирішення задач адаптивного управління швидкістю спрацювання і ефективності відновлення ресурсу технологічного і допоміжного обладнання

промислових виробництв досягається з врахуванням фізичної природи деградаційних процесів за результатами функціонального діагностичного моніторингу.

2. Діагностичний моніторинг технічного стану обладнання засобами систем технічної діагностики гарантує забезпечення прийнятної достовірності результатів, мінімальні витрати часу і мінімальну вартість визначення параметрів технічного стану на умовах використання уніфікованих параметричних моделей надійності з вибором узагальнюючого параметра технічного стану інваріантного до фізичної природи деградаційних процесів (дефектів), конструктивної будови і властивостей об'єкта експлуатації обладнання;

3. Використання узагальнюючого параметра технічного стану забезпечує проведення діагностику технічного стану без виводу з експлуатації обладнання, на умовах безрозбірної ідентифікації технічного стану;

4. Діагностична інформація дозволяє:

- проведення ідентифікації характерних дефектів, природи і динаміки процесів втрати працездатності;

- використання узагальнюючого параметра технічного стану як часової функції, де відображено

характер тренду технічного стану в системі критеріїв працездатності.

- забезпечити розпізнавання технічних станів механізмів обладнання для формування гнучких регламентів обслуговування, об'єм і зміст яких адекватний технічному стану механізму.

ВИСНОВКИ

В перспективі подальших досліджень є на основі розробленої та уніфікованої моделі процесів втрати працездатності обладнання розв'язувати задачі адаптивного управління ресурсом обладнання на основі використання узагальнюючого параметра технічного стану, інваріантного до конструкції обладнання, деградаційних процесів, що забезпечить розпізнавання технічних станів механізмів обладнання у реальному часі для формування гнучких регламентів обслуговування, об'єм і зміст яких адекватний технічному стану механізму.

Подяка. Авторами дослідження висловлюється подяка Ступніку М. І. та Криворізькому національному університету за посильну технічну допомогу; фінансову (матеріальну) підтримку у проведенні лабораторних досліджень, завдяки якому дослідження стало можливим.

REFERENCES

- [1] Andrenko P.M., Lebedev A.Yu., Dmytrienko O.V., & Svinarenko M.S. (2018). Reliability, technical diagnostics and operation of hydraulic and pneumatic drives. Kharkiv: Publishing center of NTU «KhPI». URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162863498.pdf>
- [2] Barhm Mohamad. (2022). Industrial equipments. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16068.71043/4>
- [3] Bazhak O. V. (2021). Improvement of method for assessing the reliability indicators of water transport equipment. Water Transport, 3(34), 148–159. URL: <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/199>
- [4] Bilodidenko S. V., Bilichenko G. M., & Ganush V. I. (2017). Periodicity of diagnostics of mechanical systems. Dnipro: NMetAU. URL: https://nmetau.edu.ua/file/periodichnist_diagnostuvannya_mehanichnih_sistem.pdf
- [5] Bowden, F. P.; Gregory, J. N.; Tabor, D. (1945). Lubrication of Metal Surfaces by Fatty Acids. Nature. 156 (3952): 97–101. doi:10.1038/156097a0 URL: <https://www.nature.com/articles/156097a0>
- [6] Bukhinsky M.Y., Horyk O.V., Cherniavskiy A.M., & Yakin S.V. (2020). Fundamentals of Machine Creation. Kyiv: Lira-Kyiv. URL: <https://lira-k.com.ua/preview/12793.pdf?srsId=AfmBOopFJUJ4tT6O-eKz58tiw8cMDqTXCMRWBxGT3f48Mu5b3Dj7fdiq>
- [7] Changhua Hu, Hongdong Fan, Zhaoqiang Wang. (2022). Residual Life Prediction and Optimal Maintenance Decision for a Piece of Equipment. Gamma Process-Based Degradation Modeling and Residual Life Prediction. (pp. 77–97) Singapore. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2267-0_4
- [8] Golikova E.V. (2023). Assessment of Reliability Indicators of the Automotive Equipment to Ensure its Sustainable Operation. Transportation Research Procedia, 68, 249–256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.034>
- [9] Ischenko A., Rassokhin D., & Nosovskaya E. (2024). Experimental studies of the bearing capacity of composite materials under thermal and vibration loads. X International Conference ACTUAL PROBLEMS OF ENGINEERING MECHANICS. (pp. 196–200) URL: https://www.researchgate.net/publication/381325695_EXPERIMENTAL_STUDIES_OF_THE_BEARING_CAPACITY_OF_COMPOSITE_MATERIALS_UNDER_THERMAL_AND_VIBRATION_LOADS
- [10] ISO 17359:2018 Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines
- [11] Jacek Kałowski, Karol Kowal, Rafał Laskowski, & Grzegorz Mrugała. (2024). Impact of equipment reliability on safety classification of research reactors. Nuclear Engineering and Technology, 16, 103388 URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.103388>
- [12] July Bias Macedo, Caio Souto Maior, Isis Didier Lins, Rafael Azevedo, Márcio das Chagas Moura, Manoel Feliciano da Silva, Marcos Vinícius da Silva Nóbrega, Guilherme Vitale, & Ricardo Reves Vasques. (2024). Using experts' opinion for Bayesian prior reliability distribution of on-demand equipment: A case study of a novel sliding sleeve valve for open-hole wells. Reliability Engineering & System Safety, 238, 109430. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109430>
- [13] Kiiyanovsky M. V., & Kiianovska N. M. (2022). Selection of mathematical models for identification and localization of defects in operational objects. Journal of Kryvyi Rih National University, 55, 117–124. URL: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2022-1-55-82-88>
- [14] Kiyanovsky M.V. (2016). Diagnostic support for maintenance and repair (MOIR) of mining and metallurgical equipment. Kryvyi Rih: State Higher Educational Institution of Mining and Metallurgical University «Mineral»

- [15] Laura Pires da Mata Costa, Amanda L.T. Brandão, & José Carlos Pinto. (2022). Modeling of polystyrene degradation using kinetic Monte Carlo. *Analytical and Applied Pyrolysis*, 167, 105683. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105683>
- [16] Meghdad Pirsaeheb, Hooman Seifi, Tahereh Gholami, Safaa H. Ganduh, Layth S. Jasim, Makarim A. Mahdi, & Masoud Salavati-Niasari. (2023). Thermal analysis techniques for evaluating the thermal stability of battery materials: A comprehensive review. *Analytical and Applied Pyrolysis*, 174, 106136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106136>
- [17] Mohammadmahdi Hajiha, Xiao Liu, & Yili Hong. (2020). Degradation under Dynamic Operating Conditions: Modeling, Competing Processes and Applications. *Journal of Quality Technology*, 53(4), 1-22. URL: https://www.researchgate.net/publication/341471633_Degradation_under_dynamic_operating_conditions_Modeling_competing_processes_and_applications
- [18] Mygal V. D., Shevchenko I. O., & Shulyak M. L. (2023). Monitoring systems for efficient vehicle operation. Kharkiv: DBTU, «Maidan».
- [19] Osborne Reynolds. (1875). On rolling-friction. *the Royal Society*, 23, 506-509. URL: <https://doi.org/10.1098/rspl.1874.0080>
- [20] Pravin Kannan, Joseph J. Biernacki, & Donald P. Visco. (2007). A review of physical and kinetic models of thermal degradation of expanded polystyrene foam and their application to the lost foam casting process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 78, 162-171. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.06.005>
- [21] Rubanenko O., Bajaj Mohit, Rubanenko O., & Hryshchuk M. (2021). Determination of Technical Condition of the Power Transformer by Frequency Response Analysis Method. 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. (pp. 395-400). URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/34549/92788.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [22] Rubanenko O., Tokarchuk O. (2021). Determination of the technical condition of the electric motor under incomplete initial data conditions. *Engineering energy transport AIC*, 3 (114), 136-148. DOI:10.37128/2520-6168-2021-3-15 URL: https://www.researchgate.net/publication/356009884_DETERMINATION_OF_THE_TECHNICAL_CONDITION_OF_THE_ELECTRIC_MOTOR_UNDER_INCOMPLETE_INITIAL_DATA_CONDITIONS
- [23] Sánchez-Silva, M., Klutke, GA. (2016). Degradation: Data Analysis and Analytical Modeling. *Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems*. Springer Series in Reliability Engineering. (pp. 79–116) Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-20946-3_4
- [24] Vorobyov V. V., Vorobyova L. D., & Kyba S. P. (2020). Fundamentals of Applied Theory of Oscillations: A Textbook for Students of Mechanical Engineering and Electromechanical Specialties. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V., URL: https://document.kdu.edu.ua/metod/2020_2201.pdf
- [25] Vynnykov Y., Kharchenko M., Manhura S., Aniskin A., Manhura A. (2023). Degradation of the internal well equipment steel under continuous service in the corrosive and aggressive environments. *Mining of Mineral Deposits*, 17(1), 84-92. URL: <https://doi.org/10.33271/mining17.01.084>
- [26] Weixuan Zhou, Chuan Lv, Geng Jie, Yuxue Jin, Miao Zhang, & Zhuoying Gao. (2023). The Approach of Equipment Degradation Processes Considering Self-Recovery Characteristics. 14th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). (pp. 1509-1515) URL: https://www.researchgate.net/publication/385125220_The_Approach_of_Equipment_Degradation_Processes_Considering_Self-Recovery_Characteristics
- [27] Xuan Zhao, Junxiang Wang, Jing Li, & Qiang Yu. (2024). Kinetic modeling of thermal degradation of TDI/MDI-based flexible polyurethane foam under nitrogen and air atmospheres with Shuffled Complex Evolution algorithm: Insights from TG-FTIR analysis. *Analytical and Applied Pyrolysis*, 177, 106279. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106279>
- [28] Yanxue Ma, Xiaoling Liu, Bing Wang, & Ying Liu. (2024). Intelligent Diagnosis of Highway Bridge Technical Condition Based on Defect Information. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 18 (6), 871-889. URL: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2024.052683>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Andrenko P.M., Lebedev A.Yu., Dmytrienko O.V., & Svinarenko M.S. (2018). Reliability, technical diagnostics and operation of hydraulic and pneumatic drives. Kharkiv: Publishing center of NTU «KhPI». URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162863498.pdf>
- [2] Barhm Mohamad. (2022). Industrial equipments. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16068.71043/4>
- [3] Bazhak O. V. (2021). Improvement of method for assessing the reliability indicators of water transport equipment. *Water Transport*, 3(34), 148-159. URL: <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/199>
- [4] Bilodidenko S. V., Bilichenko G. M., & Ganush V. I. (2017). Periodicity of diagnostics of mechanical systems. Dnipro: NMetAU. URL: https://nmetau.edu.ua/file/periodichnist_diagnostuvannya_mehanichnih_sistem.pdf
- [5] Bowden, F. P.; Gregory, J. N.; Tabor, D. (1945). Lubrication of Metal Surfaces by Fatty Acids. *Nature*. 156 (3952): 97–101. doi:10.1038/156097a0 URL: <https://www.nature.com/articles/156097a0>
- [6] Bukhinsky M.Y., Horyk O.V., Cherniavskiy A.M., & Yakin S.V. (2020). Fundamentals of Machine Creation. Kyiv: Lira-Kyiv. URL: <https://lira-k.com.ua/preview/12793.pdf?srsltid=AfmBOopFJUJ4tT6O-eKz58tiw8cMDqTxCMRWBxGT3f48Mu5b3Dj7fdiq>
- [7] Changhua Hu, Hongdong Fan, Zhaoqiang Wang. (2022). Residual Life Prediction and Optimal Maintenance Decision for a Piece of Equipment. *Gamma Process-Based Degradation Modeling and Residual Life Prediction*. (pp. 77–97) Singapore. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2267-0_4
- [8] Golikova E.V. (2023). Assessment of Reliability Indicators of the Automotive Equipment to Ensure its Sustainable Operation. *Transportation Research Procedia*, 68, 249-256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.034>
- [9] Ischenko A., Rassokhin D., & Nosovskaya E. (2024). Experimental studies of the bearing capacity of composite materials under thermal and vibration loads. *X International Conference ACTUAL PROBLEMS OF ENGINEERING MECHANICS*.

- (pp. 196-200) URL: https://www.researchgate.net/publication/381325695_EXPERIMENTAL_STUDIES_OF_THE_BEARING_CAPACITY_OF_COMPOSITE_MATERIALS_UNDER_THERMAL_AND_VIBRATION_LOADS
- [10] ISO 17359:2018 Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines
 - [11] Jacek Kałowski, Karol Kowal, Rafał Laskowski, & Grzegorz Mrugała. (2024). Impact of equipment reliability on safety classification of research reactors. *Nuclear Engineering and Technology*, 16, 103388 URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.103388>
 - [12] July Bias Macedo, Caio Souto Maior, Isis Didier Lins, Rafael Azevedo, Márcio das Chagas Moura, Manoel Feliciano da Silva, Marcos Vinícius da Silva Nóbrega, Guilherme Vitale, & Ricardo Reves Vasques. (2024). Using experts' opinion for Bayesian prior reliability distribution of on-demand equipment: A case study of a novel sliding sleeve valve for open-hole wells. *Reliability Engineering & System Safety*, 238, 109430. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109430>
 - [13] Kiiyanovsky M. V., & Kiianovska N. M. (2022). Selection of mathematical models for identification and localization of defects in operational objects. *Journal of Kryvyi Rih National University*, 55, 117-124. URL: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2022-1-55-82-88>
 - [14] Kiyanovsky M.V. (2016). Diagnostic support for maintenance and repair (MOIR) of mining and metallurgical equipment. Kryvyi Rih: State Higher Educational Institution of Mining and Metallurgical University «Mineral»
 - [15] Laura Pires da Mata Costa, Amanda L.T. Brandão, & José Carlos Pinto. (2022). Modeling of polystyrene degradation using kinetic Monte Carlo. *Analytical and Applied Pyrolysis*, 167, 105683. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105683>
 - [16] Meghdad Pirsahab, Hooman Seifi, Tahereh Gholami, Safaa H. Ganduh, Layth S. Jasim, Makarim A. Mahdi, & Masoud Salavati-Niasari. (2023). Thermal analysis techniques for evaluating the thermal stability of battery materials: A comprehensive review. *Analytical and Applied Pyrolysis*, 174, 106136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106136>
 - [17] Mohammadmahdi Hajiha, Xiao Liu, & Yili Hong. (2020). Degradation under Dynamic Operating Conditions: Modeling, Competing Processes and Applications. *Journal of Quality Technology*, 53(4), 1-22. URL: https://www.researchgate.net/publication/341471633_Degradation_under_dynamic_operating_conditions_Modeling_competing_processes_and_applications
 - [18] Mygal V. D., Shevchenko I. O., & Shulyak M. L. (2023). Monitoring systems for efficient vehicle operation. Kharkiv: DBTU, «Maidan».
 - [19] Osborne Reynolds. (1875). On rolling-friction. *the Royal Society*, 23, 506-509. URL: <https://doi.org/10.1098/rspl.1874.0080>
 - [20] Pravin Kannan, Joseph J. Biernacki, & Donald P. Visco. (2007). A review of physical and kinetic models of thermal degradation of expanded polystyrene foam and their application to the lost foam casting process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 78, 162-171. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.06.005>
 - [21] Rubanenko O., Bajaj Mohit, Rubanenko O., & Hryshchuk M. (2021). Determination of Technical Condition of the Power Transformer by Frequency Response Analysis Method. 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. (pp. 395-400). URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/34549/92788.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
 - [22] Rubanenko O., Tokarchuk O. (2021). Determination of the technical condition of the electric motor under incomplete initial data conditions. *Engineering energy transport AIC*, 3 (114), 136-148. DOI:10.37128/2520-6168-2021-3-15 URL: https://www.researchgate.net/publication/356009884_DETERMINATION_OF_THE_TECHNICAL_CONDITION_OF_THE_ELECTRIC_MOTOR_UNDER_INCOMPLETE_INITIAL_DATA_CONDITIONS
 - [23] Sánchez-Silva, M., Klutke, G.A. (2016). Degradation: Data Analysis and Analytical Modeling. *Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems*. Springer Series in Reliability Engineering. (pp. 79–116) Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-20946-3_4
 - [24] Vorobyov V. V., Vorobyova L. D., & Kyba S. P. (2020). Fundamentals of Applied Theory of Oscillations: A Textbook for Students of Mechanical Engineering and Electromechanical Specialties. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V., URL: https://document.kdu.edu.ua/metod/2020_2201.pdf
 - [25] Vynnykov Y., Kharchenko M., Manhura S., Aniskin A., Manhura A. (2023). Degradation of the internal well equipment steel under continuous service in the corrosive and aggressive environments. *Mining of Mineral Deposits*, 17(1), 84-92. URL: <https://doi.org/10.33271/mining17.01.084>
 - [26] Weixuan Zhou, Chuan Lv, Geng Jie, Yuxue Jin, Miao Zhang, & Zhuoying Gao. (2023). The Approach of Equipment Degradation Processes Considering Self-Recovery Characteristics. 14th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). (pp. 1509-1515) URL: https://www.researchgate.net/publication/385125220_The_Approach_of_Equipment_Degradation_Processes_Considering_Self-Recovery_Characteristics
 - [27] Xuan Zhao, Junxiang Wang, Jing Li, & Qiang Yu. (2024). Kinetic modeling of thermal degradation of TDI/MDI-based flexible polyurethane foam under nitrogen and air atmospheres with Shuffled Complex Evolution algorithm: Insights from TG-FTIR analysis. *Analytical and Applied Pyrolysis*, 177, 106279. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106279>
 - [28] Yanxue Ma, Xiaoling Liu, Bing Wang, & Ying Liu. (2024). Intelligent Diagnosis of Highway Bridge Technical Condition Based on Defect Information. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 18 (6), 871-889. URL: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2024.052683>

© Кіяновський М. В., Кіяновська Н. М.

Дата першого надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)