

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-05>
УДК 658.518.5

Пальчевський Б. О.
д-р, техн., наук, професор
ORCID: 0000-0002-4000-4992

Луцький національний
технічний університет / Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ДЕГРАДАЦІЇ СТАНУ ПАКУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

Анотація: прогнозне технічне обслуговування (PdM) – це стратегія технічного обслуговування на основі стану, яка покладається на моніторинг обладнання в режимі реального часу з метою виконання дій з технічного обслуговування саме тоді, коли це необхідно, уникаючи непотрібних профілактичних заходів. Це дослідження має на меті розробити комплексну методологію PdM, яка об'єднує оцінку залишкового терміну корисного використання (RUL – *remaining useful life*) технологічного обладнання (ТО) та його основних механізмів шляхом аналізу процесу деградації їх стану. З цією метою пропонується оснастити ТО системою постійного моніторингу для постійного автоматичного збору та обробки статистичних даних з поточної експлуатації ТО та інших діагностичних параметрів, що супроводжують роботу машини (вібрації, струми, звук, температура, продуктивність, частота відновлення працездатності тощо). Збір даних у поєднанні з програмним забезпеченням дає змогу перетворити їх в режимі реального часу в історію процесу деградації і в результаті аналізу визначати, чи є суттєві зміни, які вказують на наявність дефекту у виробничому процесі, а також конкретизувати вимоги до видів та термінів технічного обслуговування. Пропонується алгоритм для моделювання процесу деградації та оптимізації графіка технічного обслуговування промислового обладнання на основі моделей деградації та експертної системи (ЕС) для підтримки прийняття рішень на основі RUL для визначення оптимального часу для технічного обслуговування. Особливістю методики дослідження стану ТО є її двоетапне виконання: на першому етапі досліджується технічний стан ТО як цілого, а на другому – її механізмів. Саме на другому етапі визначаються механізми, що вимагають проведення технічного обслуговування, а також вид цього обслуговування. Цей методологічний підхід не тільки збільшує інтервали між операціями технічного обслуговування, але також оцінює технічний стан основних механізмів, що підвищує ефективність роботи та мінімізує дорогий час простою. Ключова особливість цієї дослідницької роботи полягає в її реальній застосовності для ТО з декількома механізмами, оскільки ефективність запропонованої основи оцінюється в рамках реальної виробничої системи пакувального виробництва.

Ключові слова: прогнозне технічне обслуговування (PdM), компонент моніторингу стану, прикладне дослідження, RUL – remaining useful life.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Результатами роботи системи моніторингу при прогнозному технічному обслуговуванні є постійна оцінка технічного стану ТО (технологічного обладнання) і його механізмів. Постійний моніторинг стану працюючого ТО у виробничих умовах шляхом безперервного автоматичного збирання інформації надає можливість оцінити швидкість деградації технічного стану ТО та зношування його деталей, конкретизувати RUL, визначити вимоги до видів та термінів технічного обслуговування. Спрогнозувати наближення відмови за допомогою ручного аналізу даних – практично нерозв'язне завдання. Тому справжня цінність автоматичного моніторингу полягає не в зборі необроблених даних, а в перетворенні цих даних у корисну інформацію, необхідну для керування процесом деградації ТО з метою підвищення його експлуатаційної надійності та оптимізації технічного обслуговування.

Моделі оцінки RUL класифікуються на два широкі типи моделей, а саме:

- моделі оцінки RUL, засновані на даних подій;
- моделі оцінки RUL, засновані на даних стану машини.

Під даними про події ми маємо на увазі минулі зареєстровані дані про несправності. Дані стану машини теж є важливим джерелом інформації. Такі дані дуже різноманітні, наприклад дані про вібрацію, дані аналізу масла, температуру, тиск, вологість, вологість, дані про навантаження, швидкість та навколишнє середовище тощо.

Відзначимо, що керована даними діагностика несправностей і прогнозування відмов ТО у виробничих умовах базується часто на числових даних датчиків. Інші дані, такі як періоди безвідмовної роботи, тривалості відновлення працездатності, конкретний механізм, що відмовив, часто відкидаються через складність визначення цих показників в автоматичному режимі. Однак для складних технічних систем, до яких відноситься і більшість ТО дискретного виробництва, де деградація розвивається повільно, ці дані можуть запропонувати важливе розуміння процесу розвитку несправностей, що спростить діагностику ТО. Зокрема, у задачі кількісного визначення рівня деградації перевірених компонентів ТО та їх RUL можна отримати важливу інформацію. Таким чином, у цьому дослідженні представлено метод, що ґрунтується на двоетапній методиці оцінки RUL ТО та його механізмів, заснованій на даних подій, аналізі отриманих даних і їх використання за допомогою вбудованої ЕС для оптимізації видів та термінів проактивного технічного обслуговування ТО та його механізмів.

Прогнозне технічне обслуговування стало важливою стратегією в різних галузях промисловості, спрямованою на оптимізацію ефективності використання технологічного обладнання (ТО), підвищення його продуктивності шляхом зменшення часу простою та підвищення коефіцієнту використання [1, 3]. Застосування моніторингу стану за допомогою методів збору даних спричинили у сфері прогнозного технічного обслуговування, перехід від звичайних підходів, заснованих на моделях, до методології,

керованої даними [2]. Тенденція до повністю автоматизованого визначення стану ТО в реальному часі вимагає оцінки його надійності в режимі реального часу, зводячи до мінімуму втручання людини. Однією з головних проблем є складність використання контрольованих методів для автоматичного отримання даних про несправності ТО і його простої для відновлення працездатності [4]. Тому останнім часом зростає увага до безперервного онлайн-моніторингу у промислових умовах [7], [8].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Деякі дослідники пропонують визначати період технічного обслуговування обладнання шляхом аналізу зміни інтенсивності його відмови в процесі функціонування і врахування різниці в витраті ресурсу [5]. Інші дослідники визначають оптимальний період технічного обслуговування обладнання шляхом пошуку періоду технічного обслуговування, який забезпечує мінімальні питомі непродуктивні витрати об'єкту [6]. Загальним недоліком цих способів є вузька сфера їх застосування, бо вони спрямовані на об'єкти, для котрих допустимо вважати постійною інтенсивність відмов по всьому інтервалі часу витрачання обмеженого ресурсу.

Ряд дослідників пропонують визначати оптимальний період технічного обслуговування об'єкту за комплексним критерієм, який забезпечує мінімум питомих непродуктивних витрат ресурсу з врахуванням зміни характеристик надійності об'єкту в процесі експлуатації і ймовірність безвідмовної роботи об'єкту за час його активного функціонування [2], або за мінімумом середньої питомої непродуктивної витрати ресурсу та максимумом коефіцієнта готовності об'єкту [3].

Недоліком цих підходів є те, що при багатокритеріальній оптимізації знаходиться деяке компромісне рішення, яке, як правило, не дає екстремальних значень жодного з показників якості технічного стану обладнання, що використовуються для аналізу процесу деградації і визначення залишкового ресурсу. Зведення показника процесу деградації до однокритеріального призводить до необхідності введення вагових коефіцієнтів, що відображають ступінь важливості кожного з показників. Числові значення коефіцієнтів визначаються зазвичай експертним шляхом і мають значною мірою інтуїтивний характер. У зв'язку з цим точність визначення оптимальних значень періоду обслуговування та інших вихідних величин може бути низькою

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

На сьогодні існує потреба в подальшому дослідженні методів, які можуть забезпечити виявлення несправності або ненормальних умов, в вигляді поточкових часових рядів даних

Задача, на розв'язання якої направлена розглянута методика, є визначення обґрунтованого значення допустимої величини інтенсивності відмови для оцінки залишкового ресурсу (RUL) для ТО в цілому на першому етапі і оцінки RUL його механізмів на другому етапі. Такий підхід дозволяє здійснити ранжування механізмів по величині RUL і сформування експертне

заключення про доцільність, вид та терміни проведення технічного обслуговування та/або ремонту відповідного механізму ТО.

Дослідження зосереджено на важливості виявлення несправностей і технічного обслуговування на основі стану (PdM) у пакувальній промисловості, використовуючи систему виявлення та аналізу відмов та простоїв обладнання для прогнозування його подальшого стану та своєчасного обслуговування. Важливим при цьому є автоматичне отримання і аналіз даних, підвищенні глибини їх аналізу при моніторингу обладнання. Більше того, розвиток пакувальної галузі полягає в розробці інноваційних сенсорних технологій контролю стану ТО і його механізмів вимагає підвищення точності та масштабності збору даних. Це забезпечує більш складну аналітику, тим самим сприяючи створенню розширених прогнозних моделей відмов за допомогою покращеного збору й аналізу даних.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основне завдання, яке виникає при проведенні аналізу технічного стану ТО, є розрізнення звичайної швидкості його деградації від небезпечної швидкості деградації. Це вимагає проведення постійного автоматичного моніторингу стану ТО на основі постійного збору різноманітних даних про роботу обладнання, такі як історія обслуговування та ремонтів, показники датчиків (температура, тиск, вібрація, тощо), дані про виробничий процес (обсяг продукції, швидкість роботи, тощо).

Показниками виникнення небезпечної швидкості деградації ТО є суттєве зниження його продуктивності, тривалості періодів безвідмовної роботи, значення інтенсивності відмови чи коефіцієнту використання ТО. Для підвищення точності оцінки стану ТО і його функціональних механічних та електричних компонентів доцільно використати ключові діагностичні параметри, тобто здійснити контроль температури, вібрації, тиску та шуму в робочій зоні, а також, при можливості, здійснити лабораторний аналіз наявності металевих часток у мастильних матеріалах або вибрати інші показники механічного зношування.

Для аналізу поточного технічного стану ТО використовують при моделі оцінки RUL, заснованій на даних подій, такі діагностичні ознаки:

1. Час напрацювання ТО до відмови.
2. Час відновлення працездатності.
3. Вказівку на механізм, що відмовив.

Для аналізу технічного стану за допомогою моделі, заснованій на даних стану машини, як правило, використовують:

1. Коливання потужності головного електроприводу.
2. Температура в робочій зоні ТО.
3. Середньоквадратичні значення та спектр вібрації в робочій зоні ТО.
4. Середньоквадратичні значення та спектр рівня шуму в робочій зоні ТО.
5. Коливання тиску і витрати стисненого повітря тощо.

Отримані дані надходять на вхід системи діагностики обладнання, а на виході виходять розраховані оцінки показників технічного стану обладнання, виявлені симптоми відмов та несправностей його механізмів (як фактичні, так

і прогнозні), а також генеруються повідомлення, на основі яких запускаються відповідні процедури технічного обслуговування.

Прогнозне технічне обслуговування ТО із множиною механізмів за результатом оцінки RUL ТО і його механізмів реалізують в виробничих умовах наступним чином. При роботі обладнання здійснюють постійний технічний моніторинг, під час якого фіксують періоди безвідмовної роботи обладнання і тривалості відновлення його працездатності, а також фіксують механізм, що відмовив. При кожній відмові зупиняється робота обладнання і його механізмів, фіксується час безперервної роботи до відмови, механізм, що відмовив і тривалість відновлення його працездатності. Результати спостереження за роботою обладнання в режимі постійного моніторингу фіксуються в блоці збору даних (рис.1).

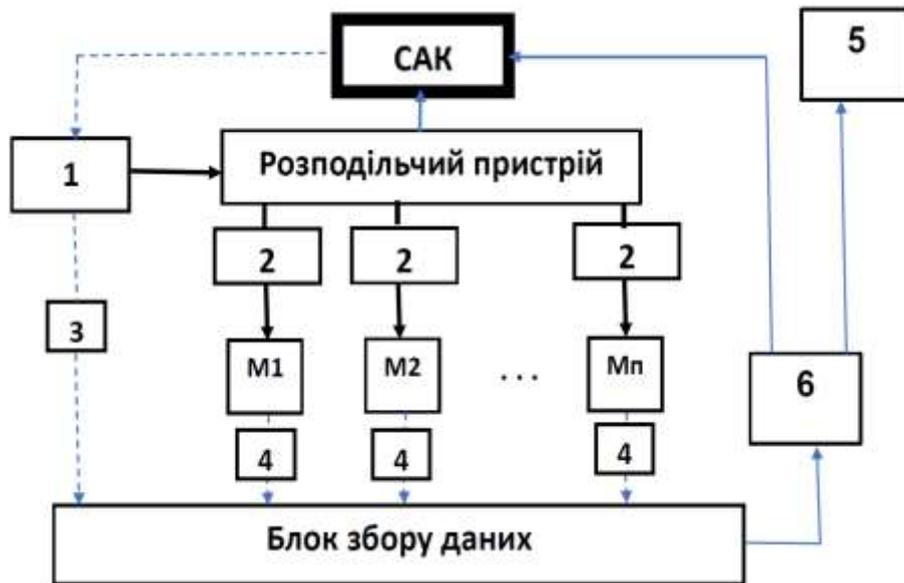


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою, що реалізує спосіб прогнозного технічного обслуговування технологічного обладнання із множиною механізмів, де: САК – система автоматичного контролю і діагностики обладнання; 1 – загальний привід обладнання; 2 – локальні приводи чи передавальні пристрої механізмів; 3 – датчик загального приводу обладнання; M1, M2, ..., M_n – механізми обладнання; 4 – датчики руху механізмів; 5 – блок візуалізації; 6 – блок обробки даних

Для прогнозування деградації технічного стану ТО необхідно розробити математичні моделі, придатні для визначення величини залишкового ресурсу (RUL – remaining useful life) як для ТО, так і для його механізмів. Використовувані цифрові моделі обладнання можуть складатися з кількох підмоделей його механізмів, для кожного з яких може здійснюватися спеціалізований моніторинг його стану. Мірою деградації є розрахункова величина, що характеризує поточну здатність належного виконання заданих

функцій. Її чисельне значення корелює з ймовірністю відмови у конкретний момент часу.

Побудова індексу деградації може проводитися шляхом використання декількох показників стану ТО (залишковий ресурс R , або коефіцієнт використання ТО КГ, або інтенсивність відмови λ) або використання комплексного індексу деградації, який інтегровано описує вплив різних факторів на швидкість деградації. Такий індекс може включати такі фактори, як температура, вібрація, частота простоїв тощо шляхом встановлення датчиків та систем IoT (Інтернету речей) для моніторингу стану обладнання в реальному часі.

При використанні як індексу деградації залишкового ресурсу R вираз для оцінки швидкості деградації:

$$V_{\text{дегр}} = \frac{dR}{dT}, \quad (1)$$

де $V_{\text{дегр}}$ – швидкість деградації;

R – залишковий ресурс (RUL – remaining useful life) ТО;

t – час.

У цих методах значення RUL конкретного елемента в конкретному середовищі обчислюється з урахуванням вимірюваної або передбачуваної деградації.

Для вирішення значення RUL конкретного елемента (ТО та його механізмів) слід розробити алгоритм, який буде відстежувати деградацію в режимі реального часу, постійно оновлюючи лінію тренду і прогнозуючи час, що залишився до граничного стану. У такій моделі як входи можуть використовуватися всі типи сигналів, у тому числі спостережені за датчиками, розраховані та прогнозовані за результатами аналізу експлуатаційних даних.

Задача, яка виникає на початкових етапах дослідження, це визначення показників деградації ТО, придатних для керування процесом деградації і пов'язаним з ним процесом PdM. Ця задача включає:

– вибір показників стану ТО, придатних для контролю та для керування процесом деградації, який часто називають індекс деградації;

– визначення і обґрунтування допустимих значень цих показників.

Аналіз праць дослідників з методики визначення стану ТО, розглянутий вище, показав доцільність в якості такого показника вибрати інтенсивності відмови λ . В загальному випадку функція інтенсивності відмов визначається як:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \alpha t^{\alpha-1}. \quad (1)$$

При $\alpha = 1$ функція ризику дорівнює константі, що відповідає нормальній експлуатації ТО; при $\alpha < 1$ функція ризику зменшується (приробка ТО); при $\alpha > 1$ функція ризику збільшується (старіння ТО). Саме визначення показника α характеризує стан ТО, а динаміка його зміни надає прогноз про наближення

відмови і дозволяє оцінити залишковий ресурс ТО і його механізмів, а також сформулювати експертне заключення про доцільність та терміни проведення їх технічного обслуговування та/або ремонту.

Друга задача, а саме визначення обґрунтованого значення допустимої величини інтенсивності відмови λ здійснюється із наступних міркувань. Аналіз процесу деградації ТО дозволяє розрізнити два види мінливості досліджуваного показника експлуатаційної надійності обладнання – інтенсивності відмови. Перший вид мінливості інтенсивності відмови - це власна мінливість, спричинена дією випадкових причин, якими супроводжується робота будь-якого виробничого обладнання. Ці причини складно чи неможливо виявити, сила впливу кожної окремої причини на загальний результат дуже мала. Проте всі разом викликають власну мінливість результатів процесу деградації. Другий вид мінливості – це мінливість, спричинена спеціальними невідповідними причинами. Ці причини викликають реально відчутні зміни у процесі деградації. Для того, щоб на тлі власної мінливості інтенсивності відмови в деградаційному процесі виявити мінливість, що викликається особливими причинами використовується верхня контрольна межа (ВКМ) інтенсивності відмови, що задає його допустиме значення. Порушення цієї межі статистичним показником експлуатаційної надійності є свідченням впливу особливих причин і виходу процесу деградації з керованого стану (рис. 2).

Діаграма процесу деградації стану ТО – це графік, де по осі x – час спостереження, а по осі y – значення індексу деградації – λ . Якщо дані розташовані хаотично навколо центральної лінії без явного тренду, то процес є стабільним, і збої є випадковими. Якщо ж спостерігається тренд постійного зростання чи спаду метрики – це ознака зношення або накопичення дефектів.

Оскільки при дослідженні процесу деградації ТО неможливо отримати в конкретний момент часу спостереження більш за одне значення параметру його експлуатаційної надійності – інтенсивності відмови, доводиться аналізувати і управляти процесом на основі індивідуальних значень альтернативних даних. Альтернативні дані для обчислення вибірових статистичних показників отримують у результаті розподілу результатів досліджуваного процесу на дві групи: ті, що відповідають вимогам, та ті, що не відповідають вимогам. При дослідженні надійності обладнання ці дані представляють собою наявність чи відсутність відмов і збоїв та їх характеристик. При використанні індивідуальних значень контрольні межі розраховують на основі міри варіації, отриманої по ковзних розмахах зазвичай двох послідовних спостережень.

Ковзний розмах – це абсолютне значення різниці вимірів в послідовних парах, тобто різниця першого і другого вимірів, потім другого і третього, і так далі, тобто:

$$R_i = \lambda_{i-1} - \lambda_i. \quad (2)$$

Число ковзних розмахів на 1 менше, ніж загальна кількість вимірних значень N , обсяг вибірки N умовно розглядається рівним 2 одиницям. На

основі ковзних розмахів обчислюють середній ковзний розмах $R_{\text{сер}}$, який використовують для аналізу процесу деградації. За всіма даними обчислюють загальне середнє $\lambda_{\text{сер}}$ Формули для розрахунку верхньої контрольної межі (ВКМ) при використанні індивідуальних значень статистичного показника інтенсивності відмови та ковзного розмаху наступна:

$$\text{ВКМ} = \lambda_{\text{доп}} = \lambda_{\text{сер}} + 3R_{\text{сер}}/d_2. \quad (3)$$

Для розрахунку ВКМ визначають середнє значення інтенсивності відмови за результатами моніторингу по моменту проведення дослідження:

$$\lambda_{\text{сер}} = \frac{1}{N} \sum_i \lambda_i. \quad (4)$$

Середній ковзний розмах складе:

$$R_{\text{сер}} = \frac{1}{N-1} \sum_i R_i. \quad (5)$$

Значення ВКМ (верхня контрольна межа), яке задає гранично допустиме значення інтенсивності відмов $\lambda_{\text{доп}}$, визначиться за формулою, впровадженою Шухартом для аналізу його контрольних карт:

$$\text{ВКМ} = \lambda_{\text{сер}} + \Delta\lambda_t = \lambda_{\text{сер}} + \frac{3}{d_2} R_{\text{сер}} = \lambda_{\text{сер}} + \frac{3}{1,128} R_{\text{сер}}. \quad (6)$$

Значення коефіцієнту d_2 для вибірки обсягу $n=2$ складає 1,128 (Міжнародний стандарт ISO 8258-91 під назвою «Контрольні карти Шухарта»).

Використання ВКМ інтенсивності відмови дозволяє здійснити аналіз процесу деградації технічного стану обладнання і виявити ступінь наближення реального значення інтенсивності відмови до допустимого, що визначає RUL ТО як час, що залишився до переходу обладнання в стан, при якому воно потребуватиме ремонту або заміни [9] (рис. 2).

Методика дослідження стану ТО проводиться в два етапи: на першому етапі досліджується технічний стан і RUL ТО як цілого, а на другому – її механізмів. Саме на другому етапі визначаються механізми, що вимагають проведення технічного обслуговування, а також вид цього обслуговування.

Якщо зміни в процесі деградації обладнання спричинені особливими причинами, то вони реєструються на графіку процесу деградації як викиди значень інтенсивності відмови за контрольну межу ВКМ (рис. 3). При перетині на графіку динаміки інтенсивності відмови отримаємо час, коли необхідно здійснити технічне обслуговування або ремонт обладнання через недоцільність його подальшої експлуатації. Якщо в результаті технічного моніторингу буде визначено, що обладнання не може експлуатуватися надалі

через відсутність залишкового ресурсу, то через наявність в структурі технологічного обладнання множини механізмів додатково досліджують за даними моніторингу розвиток деградаційних процесів зміни інтенсивності відмов в кожному з механізмів, визначають їх гранично допустимі значення шляхом розрахунку верхньої контрольної межі, після чого перевіряють наявність перетину реальним значенням інтенсивності відмови кожного механізму з відповідною контрольною межею та визначають тривалість залишкового ресурсу механізму. Після цього проводять співставний аналіз деградаційних процесів для кожного з механізмів обладнання, визначають механізми з критичним значенням залишкового ресурсу та розробляють для них експертне заключення про необхідний вид та терміни технічного обслуговування або про можливість продовження безпечної експлуатації.

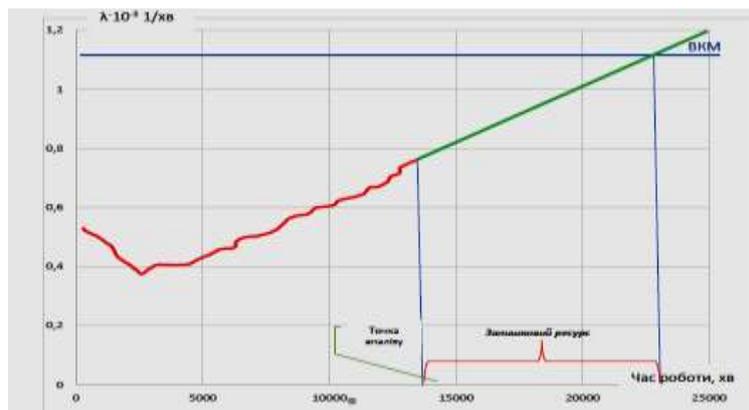


Рисунок 2 – Приклад визначення RUL TO при аналізі динаміки процесу деградації

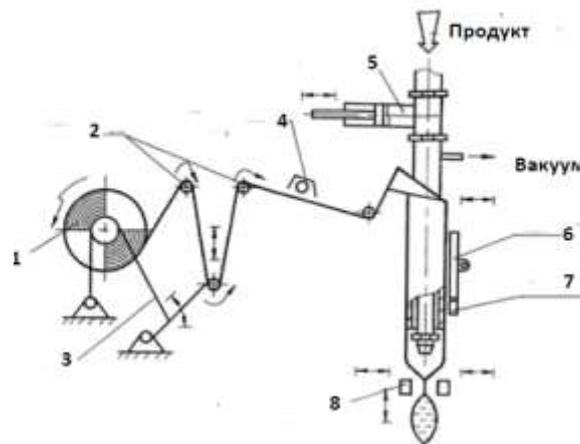


Рисунок 3 – Технологічна схема ТО для пакування рідкого продукту:
1 – плівка, 2 – направляючий валок, 3 – гальма, 4 – бактерицидна лампа,
5 – дозатор, 6 – механізм поздовжньої зварки, 7 – дататор, 8 – механізм поперечної зварки і відрізання пакету

Якщо ж графік зміни інтенсивності відмови тільки наближується до ВКМ як це показано на рисунку 2, то при апроксимації залежності до перетину з ВКМ отримуємо величину RUL як час, що залишився до проведення технічного обслуговування або ремонту обладнання.

Постійний автоматичний моніторинг стану – це автоматичне відстеження та оцінка поточного стану обладнання на основі постійного збору даних про тривалості періодів безвідмовної роботи і тривалості відновлень на протязі тривалого часу, автоматичне виявлення змін інтенсивності відмови обладнання і його механізмів, зниження продуктивності і коефіцієнту використання. Крім того, система діагностики здійснює автоматизовану передачу інформації щодо стану обладнання та відмов у систему технічного обслуговування для запуску необхідних процесів обслуговування. Результатами роботи системи проактивного керування процесом деградації є біжуча прогнозна оцінка технічного стану технологічного обладнання і його механізмів, яка дозволяє приймати рішення про технічне їх обслуговування чи ремонт, а також терміни проведення. Для вирішення цього завдання слід розробити алгоритм, який буде відстежувати деградацію в режимі реального часу, постійно оновлюючи лінію тренду і прогножуючи час, що залишився до граничного стану.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Ефективність запропонованого методу досліджується за допомогою реального промислового прикладу – машини для автоматичного пакування молока в пакети, де оцінка рівня деградації машини покращується за допомогою даних постійного моніторингу. Розглянемо як приклад машину для автоматичного пакування молока в пакети (рис. 3). Вона складається з поршневого дозатора для введення молока в пакет, механізму протягування рукава на крок, механізму поздовжнього зварювання, механізму поперечного зварювання з відрізанням пакета, механізму рукавоутворювача та пневмосистеми машини.

Машина працює в такий спосіб. Полімерна плівка 1 періодично змотується з рулону, простягається через систему валиків 2 і подається на рукавоутворювач, де згортається в рукав. Краї плівки в рукаві накладаються одна на одну і зварюються за допомогою механізму зварки 6 поздовжнього шва. Рукав і плівка періодично протягуються на крок за допомогою кліщових притисків 8, які одночасно зварюють рукав в поперечному напрямку і відрізають від нього заповнений пакет.

Пакувальне обладнання складається з механічних, пневматичних, електронних і термічних систем. Параметри, які характеризують несправний стан обладнання: зниження точності дозування рідини або пасти, погіршення герметизації через нещільність зварних швів, що призводить до збільшення кількості дефектних пакетів. Ці та інші несправності викликають зменшення продуктивності через збої чи відмови, які створюють затримки для їх усунення.

Практика аналізу причин відмов і збоїв визначається типовими джерелами несправностей:

– Стан ущільнювачів і нагрівальних елементів, оскільки вони відповідають за якість герметизації пакетів.

– Робота насосів і дозаторів, які забезпечують точність порційного пакування.

– Механічний знос рухомих частин (наприклад, приводних механізмів, направляючих, валів).

Проведений хронометраж роботи та простоїв автомата показав наявність типових відмов, а саме:

- удари механізму поперечного зварювання на верхню опору;
- сильний стукіт механізмів;
- надмірне розсіювання дози препарату;
- неякісний поздовжній шов;
- неякісний поперечний шов;
- складання плівки з поперечним швом, погане протягування плівки на рукавоутворювачі.

Для проведення аналізу надійності роботи автомата необхідно забезпечити наступні потенційно доступні дані:

- дані про роботу обладнання протягом усього терміну роботи обладнання з моменту запуску до моментів відмови;
- дані про час відновлення роботи обладнання;
- інформація про допустимі значення (контрольні межі) для окремих сигналів або індикаторів технічного стану, досягнення яких сигналізує про вихід з ладу.

Ці дані формуються в діаграмі наступного виду (табл. 1). В табличній діаграмі наведено результат спостереження за роботою ТО на протязі 52 робочих змін або 24960 хв. Перший стовпчик – це послідовність відмов машини, що має 6 працюючих механізмів. Якщо відмовив будь-який механізм, то робота машини зупиняється і здійснюється відновлення цього механізму. Машина в цей час простоє. В таблиці позначено індексом 1 – дозатор, 2 – механізм переміщення плівки, 3 – механізм поздовжньої зварки, 4 – механізм поперечної зварки і відрізання пакету, 5 – рукавоутворювач, 6 – пневмосистема машини, а наявність їх відмов – S_1, S_2, \dots, S_6 відповідно.

Тривалість періодів безвідмовної роботи, тривалість усунення точно фіксувалися (табл. 2). Загальні умови спостереження за роботою пакувального автомату:

- запланований робочий час для спостереження: 24960 хв;
- сумарний час простоїв за час спостереження 2045 хв;
- чистий робочий час за час спостереження 22954 хв.

Аналіз даних таблиці здійснюється наступним чином:

1. В виробничих умовах заповнюють таблицю даних спостереження за роботою машини: у стовпчику А вказано це номер відмови (в таблиці це від 1 до 95), у стовпчику В – тривалість безперервної роботи (в хвилинах) машини до її зупинки через відмову, у стовпчику С сумують періоди безвідмовної роботи машини між відмовами – це здійснюється накопичення часу роботи машини. В стовпчику Е вказується час відновлення працездатності машини, наприклад її ремонт чи щось подібне. В стовпчиках G, H, J, L, M, N позначені

детально, який з механізмів відмовив (фактично жирна крапка це, по суті, має бути одиничка, в чиста клітинка – нуль).

Таблиця 1 – Діаграма результатів спостереження за роботою 6-ти механізмів пакувального автомату (рис. 3) на протязі 52 робочих змін

№ відмови	Напряцювання на відмову, хв	Сумарна тривалість роботи, хв	Інтенсивність відмови автомату $\lambda \cdot 10^{-3} \text{ 1/хв}$	$\Delta D = D_i - D_{i-1}$	Тривалість відновлення, хв	Механізм автомату, який відмовив						
						Дозатор	Переміщення плівки	Поздовжня зварка	Інтенсивність відмови механізму 2	Поперечна зварка і відрізання	Механізм формування рукава	Пневмосистема
A	B	C	D	D1	E	G	H	J	K	L	M	N
<i>i</i>	t_i	$\sum t_i$	λ	$\Delta\lambda$	t_{bi}	S1	S2	S3	λ_2	S4	S5	S6
1	406	406	2,4	-	24	•						
2	339	745	2,6	0,2	12		•		1,35			
3	504	1249	2,4	0,2	15							•
...												
93	114	22541	4,1	0,1	22		•		1,3			
94	228	22769	4,15	0,05	21					•		
95	200	22969	4,15	0	18						•	

2. Далі починається обробка таблиці. В стовпчику D розраховують інтенсивність відмови машини за виразом:

$$\lambda = \frac{\text{кількість відмов (стовпчик A)}}{\text{сумарна тривалість роботи (стовпчик C)}} \cdot \quad (7)$$

3. За даними стовпчика D будемо графік залежності інтенсивності відмови машини λ від часу її сумарної тривалості роботи – стовпчик C.

4. Наступний крок – визначення ВКМ інтенсивності відмови, при перетині якої вже недоцільно її експлуатувати. Для цього доцільно використати методику, яку використав Шухерт при розробці своєї теорії контрольних карт для аналізу технологічних процесів на основі контролю індексу якості цього процесу. Вона дозволяє виявити і відділити такі види реальних змін в досліджуваному процесі, які виникають, коли зміни є наслідком деяких визначуваних причин, не притаманних процесу внутрішньо і повинні бути усунуті. До них можуть бути віднесені поломки інструменту чи ТО, недостатня однорідність матеріалу, промислового і контрольного обладнання, помилки персоналу тощо. Для їх визначення в контрольній карті Шухарта розраховують верхню і нижню контрольні межі (ВКМ і НКМ) індексу якості досліджуваного процесу. Таку методику доцільно використати і для процесу деградації стану ТО при умові, якщо існує вимірюваний індекс деградації.

В деяких ситуаціях аналізу процесів неможливо отримати більш за одне значення індексу якості процесу, наприклад значення показника продуктивності чи надійності ТО. Тоді аналіз процесу проводиться на основі

індивідуальних значень індексу якості. При використанні індивідуальних значень контрольні межі розраховують на основі міри варіації, отриманої по ковзних розмахах зазвичай двох послідовних спостережень. Ковзний розмах – це абсолютне значення різниці вимірів в послідовних парах, тобто різниця першого і другого вимірів, потім другого і третього, і так далі. Число ковзних розмахів на 1 менше, ніж загальна кількість вимірних значень N, обсяг вибірки n умовно розглядається рівним 2 одиницям. На основі ковзних розмахів обчислюють середній ковзний розмах $R_{сер}$, який використовують для побудови контрольних карт. За всіма даними обчислюють загальне середнє $\lambda_{сер}$. При розрахунку контрольних кордонів за виразом (6) використовуються коефіцієнти вибірки обсягу $n = 2$.

За результатами спостереження на протязі 52 робочих змін отримуємо наступну послідовність значень інтенсивності відмови ТО (табл. 2, стовпчик D).

Таблиця 2 – Інтенсивність відмов ТО за результатами спостереження

Показник	Значення для послідовних відмов ТО												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...
Інтенсивність відмови $\lambda \cdot 10^{-3}$ 1/хв	2,4	2,6	2,4	2,1	1,8	1,9	1,9	1,8	1,8	1,85	1,9	1,9	...
Ковзний розмах $R_{сер} \cdot 10^{-3}$ 1/хв		0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0	0,1	0	0,05	0,05	0	...

Визначимо середнє значення інтенсивності відмови:

$$\lambda_{сер} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (2,4 + 2,6 + 2,4 + 1,9 + \dots + 4,1 + 4,15 + 4,15) = 3,06 \cdot 10^{-3} \text{ 1/хв.}$$

Для визначення середнього ковзного розмаху в таблиці 2 після стовпчика D треба вставити стовпчик D1, в якому розраховується різниця двох сусідніх значень λ , тобто:

$$R_i = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (\lambda_{i-1} - \lambda_i). \quad (8)$$

Середній ковзний розмах складе:

$$R_{сер} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (0,2 + 0,2 + 0,3 + 0,1 + \dots + 0,05 + 0) = 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ 1/хв.}$$

Значення ВКМ, яке вкаже на наявність наближення деградації машини, визначиться за формулою:

$$ВКМ = \lambda_{сер} + \frac{3}{d_2} R_{сер} = 3,06 + \frac{3}{1,128} 0,13 = 3,41 \cdot 10^{-3} \text{ 1/хв.}$$

Значення коефіцієнтів d_2 і $E_2=3/d_2$ отримані із таблиць для карт індивідуальних значень Шухерта при кількості вимірювань $n=2$ (Міжнародний стандарт ISO 8258-91 під назвою «Контрольні карти Шухарта»).

Тоді динаміка процесу деградації ТО набере вигляду (рис. 4).

Якщо в результаті технічного моніторингу буде визначено, що обладнання

не може експлуатуватися надалі через відсутність залишкового ресурсу, то через наявність в структурі технологічного обладнання множини механізмів додатково досліджують за даними моніторингу розвиток деградаційних процесів зміни інтенсивності відмов в кожному з механізмів, визначають їх гранично допустимі значення шляхом розрахунку верхньої контрольної межі, після чого перевіряють наявність перетину реальним значенням інтенсивності відмови кожного механізму з відповідною контрольною межею та визначають тривалість залишкового ресурсу механізму. Після цього проводять співставний аналіз деградаційних процесів для кожного з механізмів обладнання, визначають механізми з критичним значенням залишкового ресурсу та розробляють для них експертне заключення про необхідний вид та терміни технічного обслуговування або про можливість продовження безпечної експлуатації.



Рисунок 4 – Динаміка зміни інтенсивності відмови ТО

Другий етап аналізу технічного стану. Для виконання другого етапу аналізу виділимо із таблиці 1 дані, що стосуються механізмів машини – автомату і зведемо їх в таблицю 3. Основна складність у створенні системи прогнозного обслуговування – це розробка алгоритмів, здатних правильно визначити зародження дефекту та прогнозувати його подальший розвиток (рис. 5). Алгоритми діагностування та прогнозування можуть розроблятися не тільки для основних робочих вузлів обладнання (зварювальний вузол, шпиндель, фільтр, супорт, котел, турбіна, генератор чи трансформатор), але і для допоміжних вузлів (вузли живлення машини, вузли блокування, помпи тощо).

В блоках розміщено:

1 – Вхідні дані: тривалості спостереження, роботи і простоювань машини і індикація відмов основних функціональних механізмів.

2 – Розрахунок поточної інтенсивності відмови машини.

3 – Розрахунок середнього значення інтенсивності відмови.

4 – Добудова залежності інтенсивності відмови машини від часу спостереження.

5 – Розрахунок ковзного розмаху як двох сусідніх значень інтенсивності відмови.

- 6 – Розрахунок середнього ковзного розмаху.
- 7 – Розрахунок значення верхньої контрольної межі.
- 8 – Інтенсивність відмови перетинає верхню контрольну межу?
- 9 – Розрахунок поточної інтенсивності відмови механізмів машини.
- 10 – Розрахунок середнього значення інтенсивності відмови механізмів машини.
- 11 – Добудова залежностей інтенсивності відмови всіх механізмів машини від часу спостереження.
- 12 – Розрахунок ковзного розмаху як двох сусідніх значень інтенсивності відмови для кожного механізму машини.
- 13 – Розрахунок середнього ковзного розмаху для кожного механізму машини.
- 14 – Розрахунок значення верхньої контрольної межі для кожного механізму машини.
- 15 – Визначення механізмів, для яких регресія залежності інтенсивності відмов перетинає верхню контрольну межу.
- 16 – Розробка експертного заключення про необхідний вид технічного обслуговування відібраних механізмів та його проведення.

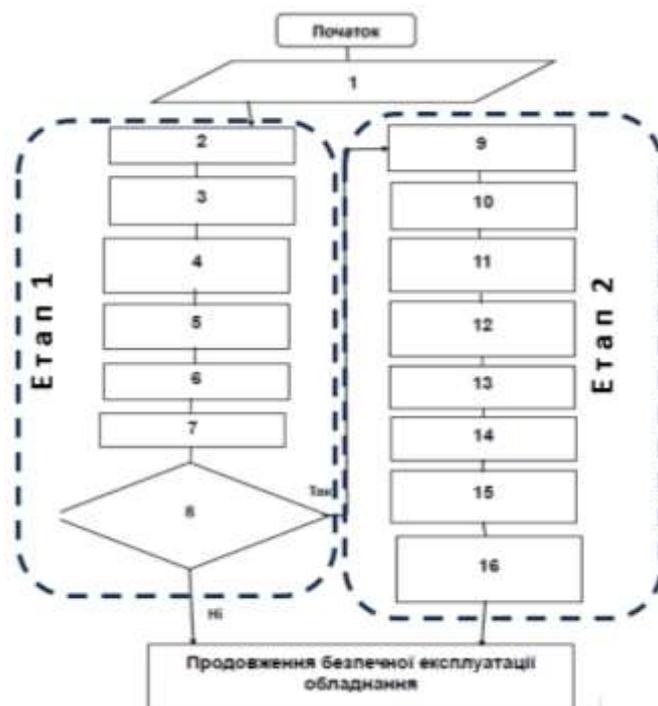


Рисунок 5 – Блок-схема виконання прогностичного технічного обслуговування неблагополучних механізмів технологічного обладнання

Результат аналізу значення інтенсивності відмови на всьому діапазоні спостереження, який проводився за даними таблиці 1 для основних механізмів ТО, дозволили провести ранжування індексу деградації і RUL для 6-ти механізмів. Найнижча надійність виявилася у механізмі 2 для

переміщення плівки. Для аналізу технічного стану цього механізму було розраховано значення ВКМ і побудовано графік його деградації, результати аналізу якого показали необхідність проведення відновлювальних робіт (рис. 6).

Таблиця 3 – Динаміка зміни інтенсивності відмови механізму переміщення плівки ТО

Показник	Значення сумарного напрацювання механізму 2												
	1900	3788	5672	7542	9432	11322	13191	15029	16918	18765	20627	22460	24960
Інтенсивність відмови $\lambda \cdot 10^{-3} 1/хв$	1,05	0,792	0,694	0,796	0,742	0,795	0,834	0,932	0,946	1,013	1,067	1,158	1,21
Ковзний розмах $R_{сер} \cdot 10^{-3} 1/хв$		0,258	0,098	0,102	0,054	0,053	0,039	0,098	0,014	0,067	0,054	0,091	0,052

Визначимо середнє значення інтенсивності відмови:

$$\lambda_{сер1} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (1,05 + 0,792 + 0,694 + 0,796 + \dots + 1,013 + 1,158 + 1,21) = 0,925 \cdot 10^{-3} 1/хв.$$

Середній ковзний розмах складе:

$$R_{сер} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (0,258 + 0,098 + 0,102 + \dots + 0,091 + 0,052) = 0,0817 \cdot 10^{-3} 1/хв.$$

Значення НКМ, яке вкаже на наявність наближення відмови визначиться за формулою:

$$НКМ = 0,925 + \frac{3}{1,128} 0,0817 = 1,142 \cdot 10^{-3} 1/хв.$$

Значення коефіцієнтів d_2 і $E_2=3/d_2$ отримані із таблиць для карт індивідуальних значень Шухерта при кількості вимірювань $n=2$.

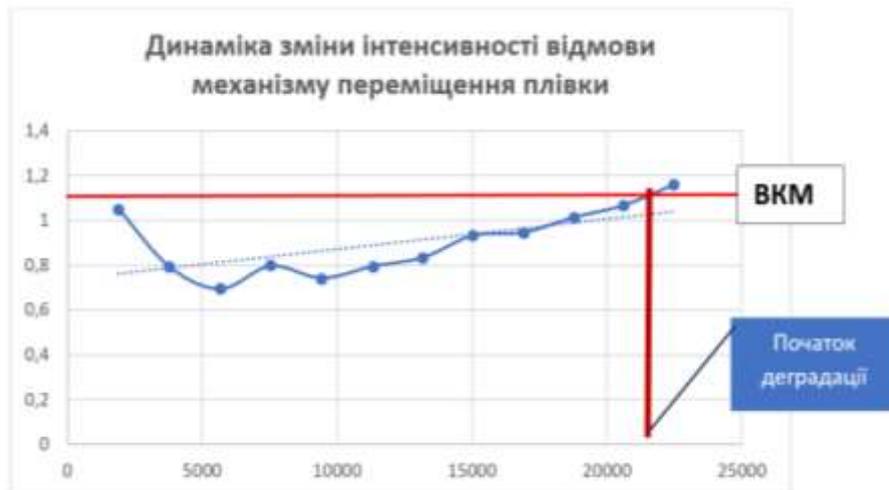


Рисунок 5 – Динаміка зміни інтенсивності відмови механізму 2 (переміщення плівки), визначена на другому етапі аналізу

ВИСНОВКИ

Моделі оцінки RUL є цінним інструментом у виробничій діяльності, оскільки вони забезпечують оптимізацію та підтримку прийняття рішень по технічному обслуговуванню ТО. Точність оцінки RUL є складним завданням, особливо в сучасних виробничих системах, оскільки складна та динамічна природа ТО вимагає надійного та постійного підходу для точного відображення тонкощів реальної системи. Залежно від результатів оцінки RUL основного ТО, процес перевірки повинен мати можливість виявити, чи потрібно провести технічне обслуговування або повторно вилучити деякі його частини, наприклад, окремі механізми, щоб правильно представити стан ТО у реальному світі.

У цій статті ми запропонували метод прогнозування, який зосереджений на підходах, керованих статистичними даними, що використовують лише наявні дані минулих спостережень і статистичні моделі. Для проведення процедур моніторингу і прогнозування багатокомпонентного ТО ми вважали, що відмови його компонентів є незалежними, адже при відновленні кожного з компонент простоює вся машина-автомат, отже потоки їх відмов зупиняються. Нами запропоновано таблична діаграма результатів спостережень, яка є основою для ієрархічного підходу до оцінки RUL багатокомпонентного ТО. В наведеному нами прикладі розглянута двоетапна оцінка RUL. Такий підхід дозволив здійснити двоетапний аналіз технічного стану ТО і прогнозування її залишкового терміну. Спочатку ми аналізуємо існуючі дані, здійснюємо оцінку поточного стану ТО, наприклад машини-автомату, і виявляємо чи існує необхідність технічного обслуговування ТО. Якщо це потрібно, то здійснюється другий етап, на якому здійснюємо оцінку поточного стану компонент (механізмів) ТО, проводиться їх ранжування за значенням RUL, яке дозволяє виявити ті з них, які найбільше впливають на зниження RUL ТО.

В подальшому для визначення конкретних причин відмов ТО доцільно використати модель симптомів відмов. Модель складається з кількох відмов, кожній з яких може бути задано один чи кілька симптомів. При цьому відмова ідентифікується за настанням хоча б одного симптому, або кількох з них (наприклад, двох із трьох), або всіх одночасно. Для підвищення якості прогнозу доцільно розширити перелік досліджуваних симптомів відмов, тобто знімати додаткові сигнали моніторингу в режимі онлайн за допомогою різних типів датчиків, що дозволяють уточнити технічний стан обладнання, наприклад сигнали вібрації, температури, струму двигуна, акустичного випромінювання тощо. Це спрощує формування графіку і передбачення часу технічного обслуговування обладнання на основі результатів моніторингу в реальному часі. Для аналізу моделі симптомів відмов в виробничих умовах можна скористатися побудовою експертної системи (ЕС) на основі використання специфічних знань експлуатаційного персоналу, технологів, механіків. Коли ми бачимо погіршення показників роботи, то розуміємо, що потрібно готуватися до відмови обладнання, і слід проводити ремонт виявлених ненадійних компонент.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Bousdekis, D. Apostolou and G. Mentzas. Predictive maintenance in the 4th

- industrial revolution: benefits business opportunities and man-agerial implications. IEEE Engineering Management Review, vol. 48, no. 1, pp. 57-62, 2020. DOI: 10.1109/EMR.2019.2958037
- [2] D. Jung and C. Sundstrom. A combined data-driven and model-based residual selection algorithm for fault detection and isolation. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 27, no. 2, pp. 616-630, 2017. DOI: 10.1109/TCST.2017.2773514
- [3] D. B. Durocher and G. R. Feldmeier. Predictive versus preventive maintenance. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 10, no. 5, pp. 12-21, 2004. DOI: 10.1109/MIA.2004.1330766
- [4] E. F. Swana, W. Doorsamy and P. Bokoro. Tomek link and SMOTE approaches for machine fault classification with an imbalanced dataset. Sensors, vol. 22, no. 9, pp. 3246, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22093246>
- [5] S. Wickramasinghe, K. Amarasinghe, D. L. Marino, C. Rieger and M. Manic. Explainable unsupervised machine learning for cyber-physical systems. IEEE Access, vol. 9, pp. 131 824-13 143, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3112397
- [6] L. Yuanyuan and S. Jiang. Research on equipment predictive maintenance strategy based on big data technology. IEEE 2015 International Conference on Intelligent Transportation Big Data and Smart City, pp. 641-644, December 2015. DOI: 10.1109/ICITBS.2015.163
- [7] W. Yu, T. Dillon, F. Mostafa, W. Rahayu and Y. Liu. A global manufacturing big data ecosystem for fault detection in predictive maintenance. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 1, pp. 183-192, 2021. DOI: 10.1109/TII.2019.2915846
- [8] Palchevskiy B., Krestyanpol L. Application of Predictive Maintenance in the Packaging Production. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska – IAPGOS, № 3, 2022, pp. 27–33. DOI: 10.35784/iapgoss.3051
- [9] Jardine A.K. Review of Current Approaches for Defining the Remaining Useful Life of Mechanical Equipment, Mechanical Systems and Signal Processing, 20(4), 2006, pp.719-737.

IMPROVING PREDICTIVE MAINTENANCE BASED ON THE ANALYSIS OF PACKAGING EQUIPMENT CONDITION DEGRADATION PROCESS

Palchevskiy B. DThSc., Prof., Honored Worker of Science and Technology
of Ukraine

Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. Predictive Maintenance (PdM) is a condition-based maintenance strategy that relies on real-time equipment monitoring to perform maintenance actions only when necessary, avoiding unnecessary preventive measures. This research aims to develop a comprehensive PdM methodology that integrates the assessment of the Remaining Useful Life (RUL) of technological equipment (TE)

and its main mechanisms by analyzing their condition degradation process. To this end, it is proposed to equip the TE with a continuous monitoring system for constant automatic collection and processing of statistical data from the current operation of the TE and other diagnostic parameters accompanying the machine's operation (vibration, currents, sound, temperature, performance, recovery rate, etc.). Data collection, combined with software, enables their real-time transformation into a history of the degradation process and, as a result of the analysis, to determine whether there are significant changes indicating a defect in the production process, as well as to specify the requirements for the types and timing of maintenance. An algorithm is proposed for modeling the degradation process and optimizing the maintenance schedule of industrial equipment based on degradation models and an expert system (ES) to support decision-making based on RUL for determining the optimal time for maintenance. A feature of the TE condition research methodology is its two-stage implementation: the first stage investigates the technical condition of the TE as a whole, and the second – its mechanisms. It is in the second stage that the mechanisms requiring maintenance and the type of maintenance are determined. This methodological approach not only increases the intervals between maintenance operations but also assesses the technical condition of the main mechanisms, which increases operational efficiency and minimizes costly downtime. A key feature of this research work lies in its real applicability to TE with multiple mechanisms, as the effectiveness of the proposed framework is evaluated within a real packaging production system.

Keywords: predictive Maintenance (PdM), Condition Monitoring Component, Applied Research, RUL – Remaining Useful Life.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
03.03.2025 р.	06.05.2025 р.	21.06.2025 р.