

**Кравченко В. М.  
Іщенко А. О.  
Рассохін Д. О.  
Носовська О. В.  
Капустін С. В.**

## **МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧАСУ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОКАТНОГО ОБЛАДНАННЯ**

*Розроблена методика оптимізації часу діагностування груп елементів прокатного обладнання, які в процесі експлуатації виходять з ладу в результаті зношування, втомних явищ і т.п. Зокрема це, насамперед, відноситься к виходу з ладу підшипників кочення та пар тертя прокатних станів, рольгангів та інших машин усього комплексу прокатної лінії. Крім того схильні до цих пошкоджень зубчаті колеса редукторів відповідальних механізмів, наприклад, натискного пристрою прокатної кліти, шестеренних клітей приводу прокатного стану. Діагностика комплексу таких елементів потребує значних витрат часу та не завжди можлива в умовах прокатного виробництва. Саме з цієї причини з'явилась необхідність в оптимізації часу чергового діагностування в залежності від прийнятих за основу законів розподілу швидкості змінення показників накопичення пошкоджень, які визначаються шляхом фіксації статистичних даних по елементам прокатного обладнання. В свою чергу, ці статистичні дані повинні враховувати результати заміни елементів прокатного обладнання, що вийшли з ладу, та корегувати ці статистичні дані згідно зі змінами, що відбулися. Така заміна передбачає виділення елементів прокатного обладнання, які не забезпечують роботу обладнання внаслідок пошкодженості і в той же час формує вектор розподілення елементів, заміна яких доцільна. Як наслідок такої заміни виникає необхідність формування вектора розподілення по накопиченню пошкодженості у знову встановлених елементів. Для подальшого розгляду питання вірогідності пошкодженості елементів необхідно використання закону розподілення швидкості накопичення пошкодженості та його параметрів методом математичної статистики. Отримані результати у вигляді методики оптимізації можуть бути використані для підвищення ефективності сервісного обслуговування прокатного обладнання, вичерпання ресурсів якого може бути оцінено засобами технічної діагностики.*

**Ключові слова:** діагностика, прокатне обладнання, оптимізація, підшипники, зубчаті колеса, закон розподілення, математична статистика, пошкодженість елементів.

В умовах експлуатації прокатного обладнання як і раніше важливою залишається задача розробки способів підвищення надійності обладнання шляхом діагностики поточного стану його елементів та своєчасності їх заміни у випадку передбачуваного пошкодження. Цим питанням присвячено багато робіт [1-5].

Робота у цьому напрямку велася багатьма відомими вченими України, Веренєва В.В., Семенченко А.К., Кияновским Н.В. [6-8], що дозволило з використанням сучасних методів діагностики вийти на високий рівень запобігання аварійного стану обладнання та позапланових зупинок прокатних станів.

В той же час замір контрольованих параметрів в процесі роботи стану не завжди можливий або потребує значних витрат і тому проблема скорочення часу діагностування при збереженні працездатності машин потребує подальшого вивчення та розробки сучасних методів оптимізації часу діагностування елементів прокатного обладнання.

Метою роботи є розробка методики адаптивної оптимізації часу діагностування елементів прокатного обладнання, схильного до виходу з ладу в результаті інтенсивної експлуатації.

Істотне підвищення ефективності використання прокатного обладнання може бути забезпечене скороченням часу його знаходження у неплановому ремонті. Як показує практика, вирішення цього завдання значною мірою забезпечується при широкому використанні системи організації планово-попереджувальних ремонтів, ремонтів за технічним станом, агрегатно-відновлювальних та т. п. Структура ремонтного циклу в системі планово-попереджувального ремонту будується на основі стратегії заміни "за ресурсом" з її коригуванням в процесі експлуатації за результатами огляду. Достовірність системи планово-попереджувального ремонту залежить від багатьох факторів, головними з яких слід назвати наступні:

- своєчасне та повне забезпечення запасними частинами, правильна та своєчасна інформація про дефекти;
- встановлення науково та практично обґрунтованих економічно доцільних термінів служби елементів, що входять до складу машини.

Остання обставина посилюється ще й тим, що в основі графіків планово-попереджувального ремонту може лежати стратегія заміни елементів по ресурсу з використанням середньостатистичних показників надійності, зокрема середнього часу напрацювання на відмову  $t_n$ . Дійсно, у цьому випадку стратегія заміни по ресурсу виявляється неефективною, тому що не дозволяє повною мірою використовувати ресурс елементів і в той же час не виключає велику кількість відмов, яка залежатиме від закону розподілу щільності ймовірності безвідмовної роботи його елементів в рамках заданих параметрів. Так, за даними [1], якщо вести планово-попереджувальні заміни для деталей, що підпорядковуються нормальному закону розподілу, то відбудуться непланові відмови для 50 % деталей, а для решти 50 % деталей матиме місце недовикористання їхнього ресурсу. Для експоненційного закону ці співвідношення становитимуть відповідно 65 % і 35 %, а для закону розподілу Вейбулла (при  $k < 1$ ) – 80 % і 20 %.

Тому, подальше підвищення ефективності використання методів планово-попереджувального ремонту повинні базуватися на обґрунтуванні оптимальних часів заміни деталей, при яких забезпечується економічна доцільність їх заміни.

Найбільш дієвим способом вирішення проблеми є використання засобів технічної діагностики. Об'єктами технічної діагностики прокатного обладнання можуть бути елементи, що входять до її складу (деталі, складальні одиниці, вузли та агрегати), технічний стан яких може бути прогнозовано з достатньою точністю. При цьому, в ході діагностування часто доводиться користуватися непрямими параметрами. В якості діагностувальних параметрів можуть бути використані:

- параметри робочих процесів;
- параметри супутніх процесів;
- геометричні величини.

Для визначення технічного стану елементів прокатного обладнання в даний час широко використовуються механічні, електричні, електромагнітні, акустичні, ультразвукові, радіоізотопні та інші методи діагностування.

Технічна діагностика в процесі експлуатації машин дозволяє контролювати їх технічний стан за яким встановлюється оптимальний міжремонтний період і прогнозують достатній технічний ресурс.

Однак, істотним недоліком цих методів є їх велика трудомісткість, пов'язана із виміром контрольованих параметрів за допомогою широкої гами різних засобів технічної діагностики. Особливо це стосується діагностування однотипних і значних за кількістю елементів металургійних машин. Наприклад, підшипників, зубчастих коліс, тягових ланцюгів, роликів рольгангів і т.п. Для цих елементів, як правило, з'ясовується, що в результаті діагностування певний відсоток контрольованих елементів знаходиться в допустимих межах. Таким чином, витрати, пов'язані із виміром стану елементів знижують загальну ефективність технічного обслуговування та вимагають оптимізації періодичності її технічного обслуговування з урахуванням результатів діагностики.

Розглянемо методи діагностики зносу, і навіть його види на прикладі радіального підшипника. Підшипник кочення є такою деталлю, від довговічності якої залежить працездатність всього механізму. При цьому раннє виявлення виходу з експлуатації деталі має виконуватися без зупинки механізму загалом. Одним із ефективних методів діагностики є аналіз отримуваних сигналів вібрації. При цьому використовуються різні датчики та акселерометри. Такий спосіб діагностики досить поширений у прокатному устаткуванні [9], у двигунах і редукторах вітряних електрогенеруючих конструкцій [10], вертолїтних редукторів [11], нафтового устаткування [12].

При цьому типи відмов мають досить складну, комплексну характеристику, що залежить від видів навантаження. Так, підшипники, що використовуються в опорно-поворотних

конструкціях, експлуатуються з уривчатим навантаженням, з частими пусками та зупинками. При цьому навантаження мають великий крутний момент, а також високі значення передавального співвідношення. При цьому, залежно від виду навантаження, підшипник повинен мати або нульовий зазор, або натяг, щоб запобігти ударним навантаженням і виникненню вібрацій. Основними несправностями опорно-поворотних підшипників є пластична деформація, тріщини та злами, експлуатаційне зношування. Пластичної деформації передують навантаження, що перевищують межу пружності [13]. При цьому залежно від характеру навантаження спостерігається або вдавлення на невеликій ділянці контакту, або деформація на великих площах, викликана неспіввісністю та великим навантаженням [14].

Тріщини та злами в підшипниках виникають внаслідок комплексного впливу змінних навантажень, між тілами кочення та доріжкою кочення, а також внаслідок видавлення мастила із зони контакту [15, 16].

Зношування поворотно-опорного підшипника виникає внаслідок впливу зовнішнього впливу. Забруднення мастила, конденсат, потрапляння хімічних речовин у контактну зону призводить до фреттинг-корозії. При цьому руйнування поверхневого шару створює об'єм частинок, здатний спільно з мастилом перетворитися на пасту, що посилює руйнування, що в кінцевому рахунку призводить до заклинювання підшипника [17].

Окремим видом зносу є корозія і перегрів. Ця причина зносу в прокатному устаткуванні досить часто зустрічається. При цьому перегрів може виникати не тільки внаслідок підвищених температур експлуатації, а й спричинених недостатнім тепловідведенням.

Методи контролю зносу підшипників засновані, як було зазначено вище, на отриманні вібраційного сигналу. На практиці діагностика ускладнюється широким спектром перешкод, відтворюваних працюючим механізмом. Методи діагностики, засновані на зіставленні сигналів тимчасових рядів з кутовою областю та усуненням атрибуту часу, було розглянуто [18].

Виявлення сигналів несправностей підшипника, що зароджуються, виконується застосуванням шматково-агрегатної апроксимацією з кореляцією околиць, що дозволяє зменшити кількість сигналів і виявити зміну частоти. Інший спосіб вилучення слабких сигналів несправності та видалення зайвого шуму виконувався методом емпіричного вейвлет-порога та був розглянутий у роботі [19].

Такі види діагностики при всіх своїх перевагах мають істотний недолік. А саме проведення аналізу спектра сигналів при змінному навантаженні. При цьому виявити несправності, що зароджуються, неможливо [19]. Тому застосування прогнозування стійкості устаткування, і навіть окремих деталей є перспективним способом забезпечення надійності устаткування.

На рисунку 1 наведена розроблена структурна схема вибракування, заміни однотипних елементів машини і оптимізація часу проведення чергової діагностики цих елементів на  $i$ -му циклі діагностування.

Перші чотири етапи схеми відображають процес накопичення ушкоджень, діагностики працездатності елементів, вибракування і заміни бракованих елементів за рівнем накопиченої ушкоджуваності  $X$  кожного елемента групи, як вкладеного ланцюга Маркова.

Процес накопичення незворотних пошкоджень розглядається як Марковський [3] і відображає зміну розподілу елементів за величиною накопиченої ушкоджуваності на  $i$ -тому циклі накопичення в початковий -  $\bar{N}_{oi}$  і поточний моменти часу  $\bar{N}_i$ .

Діагностика працездатності елементів машини реалізується в момент оптимального часу їх діагностування  $t_{oi}$  і забезпечує отримання даних про реальну накопичену ушкоджуваність елементів.

Вибракування передбачає виділення  $N_b$  елементів, накопичена ушкоджуваність яких не забезпечує ефективної роботи машини і формування вектора розподілу елементів заміна яких недоцільна  $\bar{N}_{oi}$ . Заміна відбракованих елементів передбачає встановлення нових елементів замість бракованих і формування вектора розподілу по накопиченню пошкоджень у нововстановлений  $\bar{N}_{zi}$  і накопичення даних про закономірності накопичення ушкоджуваності

елементів  $i$ -ої групи  $\bar{G}_i$ . Слід наголосити, що процес діагностування здійснюється з моменту оптимального часу діагностування  $t_{oi}$ .

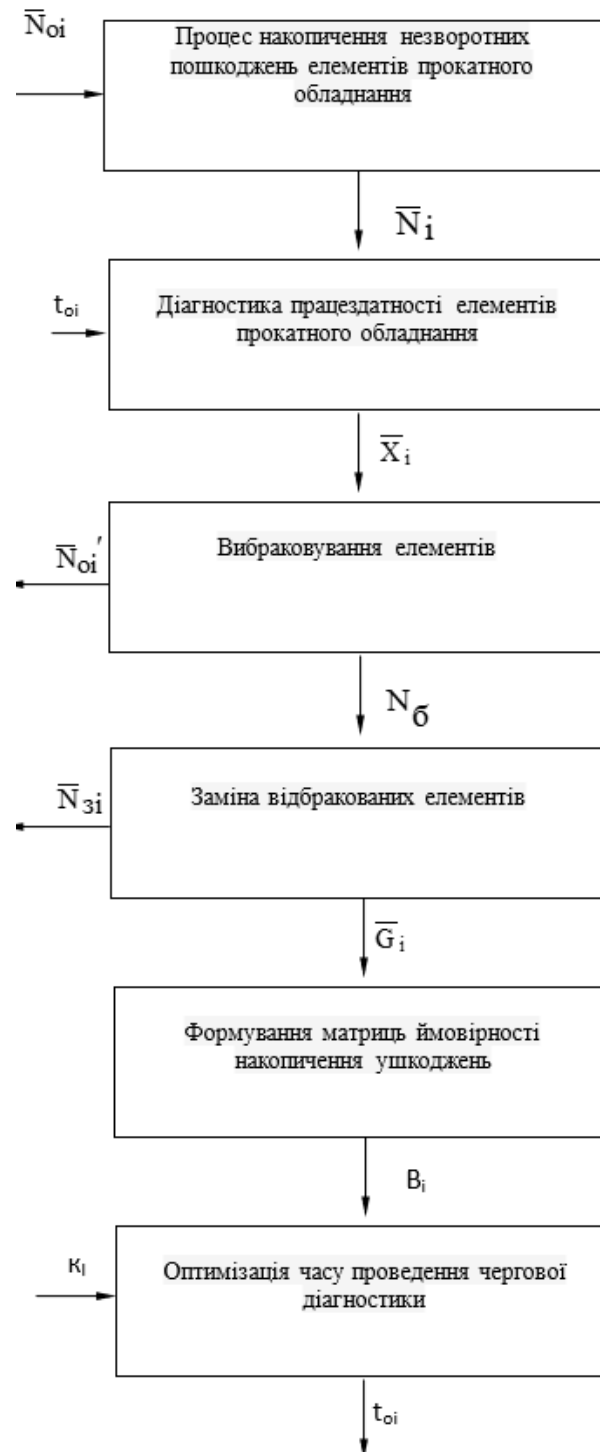


Рис. 1. Структурна схема вибракування, заміни елементів накопичуваної ушкоджуваності та оптимізації чергового часу діагностування

На рисунку 1 також наведено етапи визначення величини цього часу (чергової діагностики елементів  $i$ -того циклу).

- Оптимізація часу здійснюється у вигляді двох етапів:
- формування матриці ймовірностей  $V_i$ ;
  - оптимізації часу проведення чергової діагностики.

Етап формування матриці ймовірностей переходу  $B_i$  передбачає за даними накопичення ушкоджуваності елементів  $\bar{G}_i$  визначення методами математичної статистики закону розподілу, швидкості накопичення ушкоджуваності  $\gamma$  і його параметрів  $\gamma_{cp}$  (математичного очікування) і  $\sigma_\gamma$  (дисперсії) для кожного наступного циклу накопичення. Вибір закону розподілу  $f_i(\gamma)$  кожного наступного етапу напрацювання складає основі критерію Пірсона  $\chi^2$  за величиною збіжності результатів прогнозованої швидкості зміни показника накопичення ушкоджень і статистичних даних.

При цьому, для кожного передбачуваного закону розподілу попередньо визначається оцінка його параметрів ( $\gamma_{cp}$  та  $\sigma_\gamma$ ) по статистичним даним  $\bar{G}_i$ .

При відомому розподілі швидкості накопичення ушкоджуваності  $f(\gamma)$  можна визначити ймовірність переходу елемента з класу  $j$  до класу  $i$  із забезпечення умови (1):

$$X_i = X_j + \gamma T, \quad (1)$$

де  $X_i, X_j$  – середня величина показника накопиченої ушкоджуваності в  $i$ -му та  $j$ -му класах;  
 $\gamma$  – швидкість зміни накопиченої ушкоджуваності;

$T$  – час, протягом якого відбувається зміна накопичення ушкоджуваності від рівня  $j$ -го класу до рівня  $i$ -го класу.

У таблиці 1 наведені формули визначення елементів матриць  $B_{ij}$  для різних законів розподілу швидкості зміни показника накопиченої ушкоджуваності.

Таблиця 1

Формули для розрахунку матриці ймовірностей переходу для різних законів розподілу швидкості зміни показників накопичення ушкоджень відповідно до закону розподілу Вейбулла

Вид закону розподілу	Формули матриць ймовірностей переходу $B_i$
Нормальний	$B_{ij} = \Phi\left(\frac{X_{imax} - X_{jcp} - \gamma_{cp}}{\sigma T}\right) - \Phi\left(\frac{X_{imin} - X_{jcp} - \gamma_{cp}}{\sigma T}\right)$
Логарифмічно нормальний	$B_{ij} = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{X_{imax} - X_{jcp}}{T}\right) - \ln \gamma_{cp}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{X_{imin} - X_{jcp}}{T}\right) - \ln \gamma_{cp}}{\sigma}\right)$
Експонентний	$B_{ij} = \text{EXP}\left[-\frac{X_{imin} - X_{jcp}}{\gamma_{cp} T}\right] - \text{EXP}\left[-\frac{X_{imax} - X_{jcp}}{\gamma_{cp} T}\right]$
Релея	$B_{ij} = \text{EXP}\left[-\frac{(X_{imin} - X_{jcp})^2}{2\sigma^2 T^2}\right] - \text{EXP}\left[-\frac{(X_{imax} - X_{jcp})^2}{2\sigma^2 T^2}\right]$

де  $\Phi(\dots)$  – функція Лапласа.

Закон розподілу та його параметри для першого циклу знаходження пошкоджень повинен прийматися на основі статистичних даних щодо елементів аналогічних машин, а надалі коригуватися з урахуванням результатів замінів у наступних циклах діагностування елементів.

Визначення оптимального часу чергового діагностування  $t_{oi}$  та вибракування елементів  $i$ -ої групи реалізується на основі забезпечення максимально допустимої втрати працездатності машини, викликаної накопиченням пошкоджень цих елементів.

Залежно від типів елементів та їх функціонального призначення в машині вплив накопичення ушкоджуваності цих елементів на її працездатність може представлятися у вигляді: зниження експлуатаційно-технічних показників машини; зниження запасів міцності як самих

елементів, так і елементів машини навантаження на яких зростають через накопичення пошкоджень або у вигляді інших факторів, що визначають доцільність подальшого використання машини у зв'язку з втратою її працездатності з тієї ж причини.

Виразивши вплив накопиченої ушкоджуваності елемента, що діагностується на  $l$ -тий показник працездатності машини, що визначає подальшу доцільність її використання, у вигляді залежності  $f_l(X_i, T)$ , умова оптимального часу чергової діагностики для всіх груп елементів на  $i$ -том циклі, запишеться у вигляді (2):

$$\sum_{i=1}^{N_g} f_l(X_{ik}, t_{oil}) = k_l, \quad (2)$$

де  $N_g$  - кількість груп елементів, накопичення ушкоджуваності яких впливають на величину  $l$ -го показника працездатності машини;

$X_{ik}$  - вектор накопичення ушкоджуваності кожного  $k$ -того елемента  $i$ -того циклу;

$t_{oil}$  - оптимальний час чергової діагностики на  $i$ -му циклі по  $l$ -му показнику працездатності;

$k_l$  - допустима величина втрати працездатності машини за  $l$ -тому критерієм її працездатності, що визначається економічною цільовістю або забезпеченням умов її безпечного використання.

Оптимальний час чергової діагностики елементів, їх вибракування та заміни визначиться з умови (3):

$$t_{oi} = \min(t_{oil}), \quad (3)$$

$$t_{oi} = \min(t_{oil}), l = 1..n_l$$

де  $n_l$  – число можливих показників оцінки впливу накопичення ушкоджуваності всіх елементів на працездатність машини.

Дотримання цієї умови дозволить своєчасно визначати стан елементів прокатного обладнання і тим самим унеможливить втрати виробництва при непланових ремонтах.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, запропоновано методику адаптивної оптимізації оптимального часу діагностування груп однотипних елементів, що втрачають свою працездатність у процесі функціонування прокатного обладнання у зв'язку з накопиченням незворотних пошкоджень. Методика може бути використана для підвищення ефективності сервісного обслуговування елементів прокатного устаткування, вичерпання ресурсу яких можна оцінити засобами технічної діагностики.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баглай А. В., Веренев В. В. Динаміка та діагностика зазорів в клітях з багатонитковою прокаткою. *Technical Diagnostics & Nondestructive Testing / Tekhnicheskaya Diagnostika I Nerazrushayushchiy Kontrol.* 2020. Issue 3. С. 58-60.
2. Krot Pavlo, Korennoi Volodymyr Vibration Diagnostics of Rolling Mills Based on Nonlinear Effects in Dynamics. *Динаміка і міцність машин. Вісник НТУ «ХПІ».* 2016. № 26 (1198). С. 118-123.
3. Яворський І.М., Юзефович Р.М., Кравець І.Б. та ін. Розробка вібродіагностичної системи для визначення дефектів промислового обладнання з використанням методів нестационарної статистичної обробки вібраційних та акустичних коливань. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* 2015. №4. С. 36–41.
4. Xiaochan Liu, Yong Zang, Zhiying Gao, Lingqiang Zeng Time Delay Effect on Regenerative Chatter in Tandem Rolling Mills. *Shock and Vibration.* Vol. 2016. 15 p. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/4025650>
5. Ishchenko A. A., Kravchenko V. M., Sidorov V. A. Diagnostics and repair of industrial equipment composite materials. *LAP LAMBERT Academic Publishing.* 2020. 136 p. ISBN 978-620-2-79959-1.
6. Семенченко А. К., Кравченко В. М., Шабаев О. Е. Теоретические основы анализа и синтеза горных машин и процесса их восстановления как динамических систем. Донецк: *РВА ДонНТУ.* 2002. 302 с.
7. Кияновский Н. В. Многокритериальная оптимизация процессов обеспечения надежности оборудования. *Сб. науч. трудов НГА Украины, № 3, том № 6. Горные машины и комплексы.* Днепропетровск: РИК НГА Украины. 1998. С. 166–170.
8. Веренев В. В и др. Диагностика и динамика прокатных станов. Днепропетровск. *ИМА -пресс.* 2007. 144 с. ISBN: 978-966-331-161-6

9. Jingming Ding Fault detection of a wheelset bearing in a high-speed train using the shock-response convolutional sparse-coding technique. *Measurement*. 117 (2017). pp.108–124.
10. Yu Pang, et al. Design and implementation of automatic fault diagnosis system for wind turbine. *Comput. Electr. Eng.* 87 (2020). 106754.
11. B. Cai, H. Liu, M. Xie A real-time fault diagnosis methodology of complex systems using object-oriented Bayesian networks. *Mech. Syst. Sig. Process.* 80 (2016). pp. 31–44.
12. Baoping Cai, Liu, et al. A dynamic-bayesian-network-based fault diagnosis methodology considering transient and intermittent faults. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 14 (1) (2017). pp. 276–285.
13. R. Arsenault Treatise on materials science and technology. *Plasticdeformation of materials, vol. VI. Academic Press. Inc.* New York. 1975.
14. Rolling bearings – Damage and failures - Terms, characteristics and causes, ISO 15243:2004(E), 2004.
15. M.A. Maleque, M.S. Salit Materials Selection and Design, *Springer*, 2013.
16. Example type B report wind turbine blade pitch bearing analysis, *Tech. rep.,JAD analysis*, 2015.
17. I. Kovaříkov' a, B. Szewczyk' a, P. Blařkovi's, E. Hodúlova, ' E. Lechovic Studyand characteristic of abrasive wear mechanisms. *Mater. Sci. Technol.* (2009). pp. 1335–9053.
18. Yubin Pan, Rongjing Hong, Jie Chen, Zhongwei Qin, Yang Feng Incipient fault detection of wind turbine large-size slewing bearing based on circular domain. *Measurement*. Volume 137. 2019.Pages 130-142. ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.033>.
19. Zepeng Liu, Long Zhang, Joaquin Carrasco Vibration analysis for large-scale wind turbine blade bearing fault detection with an empirical wavelet thresholding method. *Renewable Energy*. Volume 146. 2020. Pages 99-110. ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.094>

## REFERENCES

1. Baglai A. V., Verenev V. V. Dynamics and diagnostics of gaps in cages with bagatonic rolling. *Technical Diagnostics & Nondestructive Testing / Tekhnicheskaya Diagnostika I Nerazrushayushchiy Kontrol*. 2020. Issue 3. pp. 58-60. (in Ukrainian).
2. Krot Pavlo, Korennoi Volodymyr Vibration Diagnostics of Rolling Mills Based on Nonlinear Effects in Dynamics. *Dynamics and maturity of machines. Bulletin of NTU "KhPI"*. 2016. No. 26 (1198). pp. 118-123.
3. Yavorsky I.M., Yuzefovich R.M., Kravets I.B. Development of a vibro-diagnostic system for identifying defects in the industrial property using various methods of non-stationary statistical processing of vibrating and acoustic coliving. *Technical diagnostics and non-destructive testing*. 2015. No. 4. pp. 36–41. (in Ukrainian).
4. Xiaochan Liu, Yong Zang, Zhiying Gao, Lingqiang Zeng Time Delay Effect on Regenerative Chatter in Tandem Rolling Mills. *Shock and vibration*. Vol. 2016. 15 p. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/4025650>
5. Ishchenko A. A., Kravchenko V. M., Sidorov V. A. Diagnostics and repair of industrial equipment composite materials. *LAP LAMBERT Academic Publishing*. 2020. 136 p. ISBN 978-620-2-79959-1.
6. Semenchenko A. K., Kravchenko V. M., Shabaev O. E. Theoretical foundations of analysis and synthesis of mining machines and the process of their recovery as dynamic systems. Donetsk: *RVA DonNTU*. 2002. 302 p. (in Russian).
7. Kiyanovsky N. V. Multi-criteria optimization of equipment reliability assurance processes. *Sat. scientific Proceedings of the NGA of Ukraine, No. 3, volume No. 6. Mining machines and complexes*. Dnepropetrovsk: RIK NGA of Ukraine. 1998, pp. 166–170. (in Russian).
8. Verenev V. V. et al. Diagnostics and dynamics of rolling mills. Dnepropetrovsk. *IMA-press*. 2007. 144 p. ISBN: 978-966-331-161-6. (in Russian).
9. Jingming Ding Fault detection of a wheelset bearing in a high-speed train using the shock-response convolutional sparse-coding technique. *Measurement*. 117 (2017). pp.108–124.
10. Yu Pang, et al. Design and implementation of automatic fault diagnosis system for wind turbine. *Comput. Electr. Eng.* 87 (2020). 106754.
11. B. Cai, H. Liu, M. Xie A real-time fault diagnosis methodology of complex systems using object-oriented Bayesian networks. *Mech. Syst. Sig. Process.* 80 (2016). pp. 31–44.
12. Baoping Cai, Liu, et al. A dynamic-bayesian-network-based fault diagnosis methodology considering transient and intermittent faults. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 14 (1) (2017). pp. 276–285.
13. R. Arsenault Treatise on materials science and technology. *Plasticdeformation of materials, vol. VI. Academic Press. Inc.* New York. 1975.
14. Rolling bearings – Damage and failures - Terms, characteristics and causes, ISO 15243:2004(E), 2004.
15. M.A. Maleque, M.S. Salit Materials Selection and Design, *Springer*, 2013.
16. Example type B report wind turbine blade pitch bearing analysis, *Tech. rep.,JAD analysis*, 2015.
17. I. Kovaříkov' a, B. Szewczyk' a, P. Blařkovi's, E. Hodúlova, ' E. Lechovic Studyand characteristic of abrasive wear mechanisms. *Mater. Sci. Technol.* (2009). pp. 1335–9053.
18. Yubin Pan, Rongjing Hong, Jie Chen, Zhongwei Qin, Yang Feng Incipient fault detection of wind turbine large-size slewing bearing based on circular domain. *Measurement*. Volume 137. 2019.Pages 130-142. ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.033>.

19. Zepeng Liu, Long Zhang, Joaquin Carrasco Vibration analysis for large-scale wind turbine blade bearing fault detection with an empirical wavelet thresholding method. *Renewable Energy*. Volume 146. 2020. Pages 99-110. ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.094>

**Kravchenko V., Ishchenko A., Rassokhin D., Nosovska O., Kapustin S. Method for determining the optimal time for diagnosing elements of rolling equipment.**

*A technique has been developed for optimizing the time for diagnosing groups of rolling equipment elements that fail during operation as a result of wear, fatigue phenomena, etc. In particular, this primarily refers to the failure of rolling bearings and friction pairs of rolling mills, roller tables and other machines of the entire rolling line complex. In addition, gear wheels of gearboxes of critical mechanisms, for example, a pressure device of a rolling stand, gear stands of a rolling mill drive, are subject to these damages. The diagnostics of a complex of such elements requires a lot of time and is not always possible in rolling production. It is for this reason that it became necessary to optimize the time of the next diagnosis, depending on the laws of distribution of the rate of change in the indicators of damage accumulation taken as a basis, which are determined by fixing statistical data on the elements of rolling equipment. In turn, these statistics should take into account the results of replacements of failed elements of rolling equipment and correct these statistics in accordance with the changes that have occurred. In turn, these statistics should take into account the results of replacements of failed elements of rolling equipment and adjust these statistics in accordance with the changes that have occurred. Such a replacement provides for the selection of rolling equipment elements that do not ensure the equipment operation due to damage, and at the same time forms a vector of distribution of elements, which replacement is expedient. As a consequence of such a replacement, it becomes necessary to form a distribution vector for the accumulation of damage in newly installed elements. For further consideration of the question of the probability of element damage, it is necessary to use the law of distribution of the damage accumulation rate and its parameters by the method of mathematical statistics. The results obtained by means of an optimization technique can be used to improve the efficiency of service maintenance of rolling equipment, the depletion of resources of which can be assessed by means of technical diagnostics.*

**Keywords:** diagnostics, rolling equipment, optimization, bearings, gear wheels, distribution law, mathematical statistics, element damage.

**Кравченко Владимир Михайлович** – д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

**Kravchenko Vladimir** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor PSTU

E-mail: [kvm1249@gmail.com](mailto:kvm1249@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5318-6277>

**Іщенко Анатолій Олексійович** – д-р техн. наук, проф. ДВНЗ «ПДТУ»

**Ishchenko Anatoly** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor PSTU

E-mail: [ishchenko50@ukr.net](mailto:ishchenko50@ukr.net)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6189-7830>

**Рассохін Дмитро Олександрович** – канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «ПДТУ»

**Rassokhin Dmytro** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor PSTU

Email: [rassokhin\\_d\\_a@pstu.edu](mailto:rassokhin_d_a@pstu.edu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3479-9485>

**Носовська Олена Вікторівна** – канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «ПДТУ»

**Nosovska Olena** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor PSTU

E-mail: [nosovska\\_o\\_v@pstu.edu](mailto:nosovska_o_v@pstu.edu)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8802-0674>

**Капустін Станіслав Володимирович** – аспірант каф. ПТМіДМ ДВНЗ «ПДТУ»

**Kapustin Stanislav** – Graduate student PSTU

E-mail: [stanislav.kapustin.engineer@gmail.com](mailto:stanislav.kapustin.engineer@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4204-8449>

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»

(ДВНЗ «ПДТУ»), м. Дніпро

SHEI “Priazovsky State Technical University” (PSTU), Dnipro