

УДК 62-192□ 621

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ПРИ ОЦІНЮВАННІ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ВИНИКНЕННІ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ВІДМОВ

Д-р техн. наук О. І. Алфьоров

A COMPLEX APPROACH IN ASSESSING RELIABILITY INDICATORS OF ELEMENTS OF TECHNICAL SYSTEMS WHEN DEGRADATION FAILURES OCCUR

Dr. Sc. (Tech.) Oleksiy Alfyorov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283716>



Анотація. У статті наводиться досить зручний при вирішенні багатьох завдань механічної надійності спосіб опису нестационарного монотонного деградаційного процесу, що полягає в задаванні виду його функції або щільності розподілу в перерізах часу з параметрами – детермінованими монотонними функціями часу або напрацювання в циклах навантаження.

Розглянутий теоретичний аналіз основних деградаційних процесів, що визначають механічну надійність елементів машин, дав змогу розробити універсальний підхід до побудови комплексу стохастичних моделей надійності, що забезпечує можливість спільного статистичного оцінювання параметрів моделей для процесів, зумовлених зношуванням і втомним руйнуванням. Практичне використання пропонованого комплексу моделей механічної надійності є доцільним як при прискореному оцінюванні, так і прогнозуванні надійності на стадії ресурсного проектування елементів мобільних машин.

Ключові слова: механічна надійність, прогнозування, деградаційні відмови, зношування, втомне руйнування.

Abstract. The construction and practical use of complexes of mechanical reliability models creates real prerequisites for the transition to resource design of assembly units and aggregates of mobile machines. Therefore, the article solves the tasks of building complexes of inverted stochastic models, which provide the possibility of joint statistical analysis of heterogeneous information about reliability in cases of types of destruction typical for machine elements: during wear and fatigue.

A fairly complete and convenient method for solving many problems of mechanical reliability is given for describing a non-stationary monotonic degradation process, which consists in the task of the type of its function or the density of distribution in time segments with parameters that are deterministic monotonic functions of time or working time in load cycles. Such functions should be perceived as parametric.

Schemes of models of two main types of degradation processes in machine elements are also given: monotonically increasing, associated with wear and monotonically decreasing, due to fatigue failure. At the same time, the process corresponding to wear is formed by random realizations of a change in the failure parameter over time, and the process characterizing fatigue failure is formed by a set of random individual fatigue curves that depend on cyclic durability.

The considered theoretical analysis of the main degradation processes that determine the mechanical reliability of machine elements made it possible to develop a universal approach to

building complexes of stochastic reliability models, which provides the possibility of joint statistical evaluation of model parameters for processes caused by wear and tear and fatigue destruction. The practical use of the proposed complexes of mechanical reliability models is expedient both for accelerated assessment and for predicting reliability at the stage of resource design of elements of mobile machines.

Keywords: *mechanical reliability, prediction, degraded failures, wear, fatigue failure.*

Вступ. Деградаційні механічні відмови деталей належать до категорії випадків втрати працездатності вузлів і агрегатів, що найчастіше зустрічаються в мобільних машинах і призводять до основної частини витрат щодо забезпечення надійності техніки в експлуатації. Фізичні причини таких відмов – процеси зношування та накопичення втомних ушкоджень на рівні лабораторних досліджень і випробувань матеріалів, що вивчаються глибоко та всебічно, проте проблеми прискореного оцінювання та прогнозування механічної надійності елементів машин на стадіях проектування та початку серійного випуску не втрачають своєї актуальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ряді робіт [1, 2] наведено моделі різних деградаційних процесів і способи оцінювання показників надійності [3, 4], що використовують метод моментних функцій. Проте питання побудови та оцінювання параметрів комплексів моделей, що описують формування характеристик механічної надійності елементів машин, при цьому не розглядалися. Одна з об'єктивних причин цього – відсутність загальної методології, що дає змогу будувати комплекси моделей, що поєднують різні види інформації про об'єкт: результати стендових ресурсних випробувань, дані про надійність в умовах підконтрольної експлуатації та результати вимірювання механічної навантаженості елементів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є побудова для подальшого практичного використання комплексів моделей механічної надійності, що створюють реальні передумови для переходу до

ресурсного проектування складальних одиниць і агрегатів мобільних машин.

Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання:

- побудувати інвертовану стохастичну модель надійності елементів машин, схильних до зношування;

- побудувати інвертовану стохастичну модель надійності елементів машин, що руйнуються внаслідок втомного руйнування;

- на основі отриманих результатів побудувати комплекси інвертованих стохастичних моделей, що забезпечують можливість спільного статистичного аналізу неоднорідної інформації про надійність у випадках типових для елементів машин видів руйнування: при зношуванні та втомі.

Основна частина дослідження.

Нестационарні випадкові процеси, пов'язані зі зношуванням і накопиченням втомних пошкоджень, як правило, мають монотонний характер зміни всіх своїх реалізацій [5]. Тому надалі називатимемо такі процеси монотонними. Досить повний і зручний при вирішенні багатьох завдань механічної надійності спосіб опису нестационарного монотонного деградаційного процесу полягає в задаванні виду його функції або щільності розподілу $f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right)$ у перерізах часу (рис. 1, а) з параметрами, що є детермінованими монотонними функціями часу t або напрацювання в циклах навантаження N (рис. 1, б). Такі функції називатимемо параметричними. Характер їхньої зміни в часі має відповідати фізико-технічній сутності деградаційного процесу, а при виборі математичної структури параметричних функцій необхідно використовувати апробовані теоретичні

моделі відповідних видів механічної руйнації. На рисунку наведено схеми моделей двох основних видів деградаційних процесів в елементах машин: монотонно зростаючого $\Delta(t)$, пов'язаного зі зношуванням (рис. 1, а) і монотонно спадного $\sigma_{\Pi}(N)$, обумовленого втомним руйнуванням (рис. 1, б). При цьому процес $\Delta(t)$ утворений випадковими реалізаціями зміни параметра відмови Δ у часі, а процес $\sigma_{\Pi}(N)$

формується сукупністю випадкових індивідуальних кривих втоми, що залежать від циклічної довговічності N . Другою складовою комплексу моделей деградаційних відмов є розподіл випадкового граничного рівня параметра відмови Δ_{Π} , що характеризується щільністю $f_2(\Delta_{\Pi})$, або розподіл випадкової узагальненої характеристики змінної навантаженості елемента σ , що визначає його втомну довговічність, яка задається щільністю $f_2(\sigma)$.

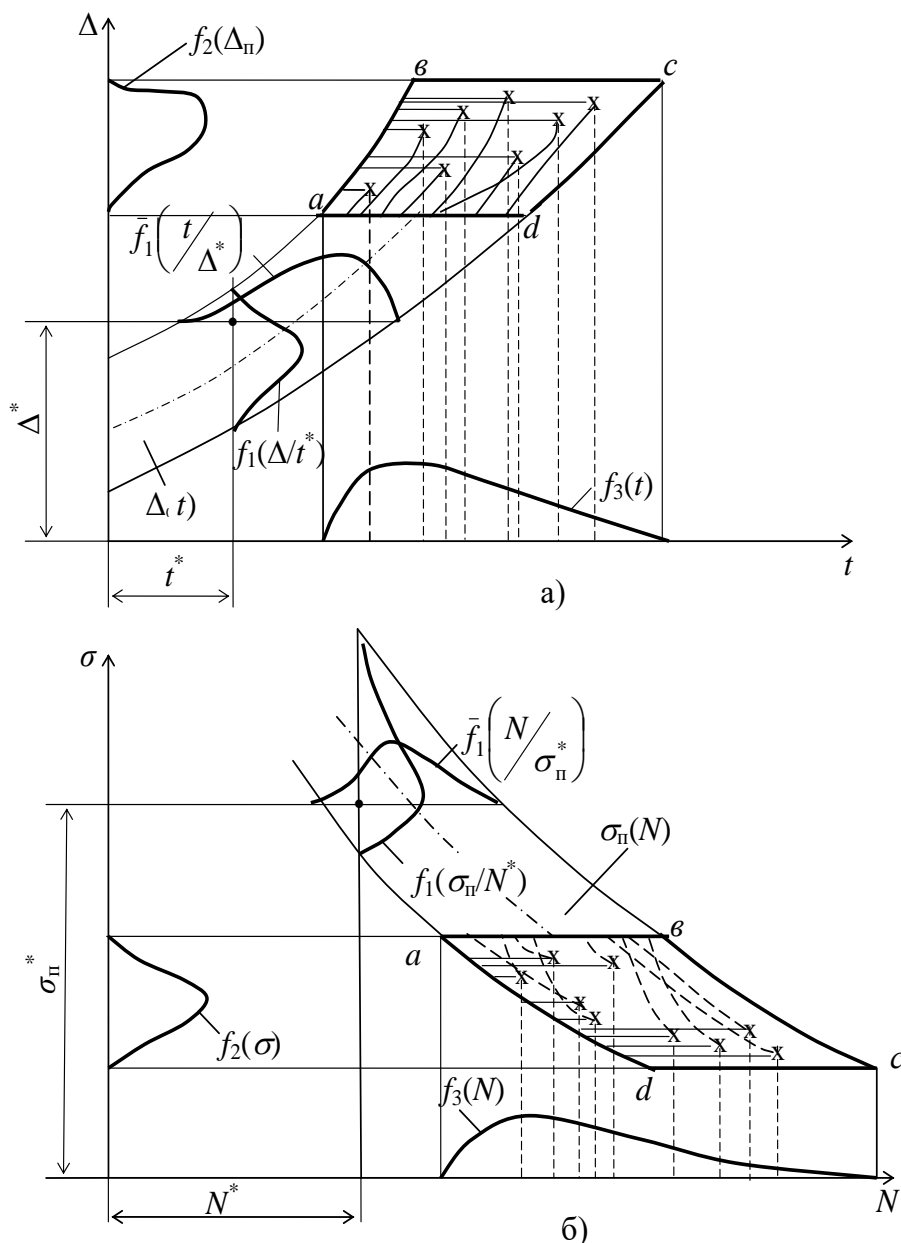


Рис. 1. Схеми комплексів моделей механічної надійності:
а – при зношуванні; б – втомному руйнуванні

Формування деградаційних відмов і розподілу ресурсу елементів машин зі зношування (рис. 1, а) і втомі (рис. 1, б) відповідно до наведеної схеми відбувається в результаті перетинів випадкових монотонних реалізацій деградаційних процесів $\Delta(t)$ і $\sigma_{II}(N)$ з фіксованими в часі випадковими рівнями величин Δ_{II} та σ .

Області *abcd*, показані на схемі, обмежують діапазон розсіювання деградаційних відмов, а ймовірнісні

характеристики ресурсу визначаються щільністю розподілу $f_3(t)$ при зношуванні та щільністю $f_3(N)$ при втомному руйнуванні. Ці щільності розподілів є третьою складовою кожного з розглянутих комплексів моделей механічної надійності.

Щодо монотонності аналізованих деградаційних процесів між щільностями розподілів у взаємно перпендикулярних перерізах, то справедливі [6, 7] співвідношення

$$\int_0^{\Delta} f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right) \cdot d\Delta = 1 - \int_0^t \bar{f}_1\left(\frac{t}{\Delta}\right) \cdot dt, \quad (1)$$

$$\int_0^{\sigma_{II}} f_1\left(\frac{\sigma_{II}}{N}\right) \cdot d\sigma_{II} = \int_0^N \bar{f}_1\left(\frac{N}{\sigma_{II}}\right) \cdot dN.$$

Щільність розподілу ресурсу елемента при зношуванні при незалежності величин Δ і Δ_{II} може бути визначена [5] одним із виразів

$$f_3(t) = -\frac{d}{dt} \left\{ \int_0^{\infty} f_2(\Delta) \left[\int_0^{\Delta} f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right) \cdot d\Delta \right] \cdot d\Delta \right\} =$$

$$= \frac{d}{dt} \left\{ \int_0^{\infty} f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right) \left[\int_0^{\Delta} f_2(\Delta) \cdot d\Delta \right] \cdot d\Delta \right\}. \quad (2)$$

Аналогічно при втомному руйнуванні

$$f_3(N) = -\frac{d}{dN} \left\{ \int_0^{\infty} f_1\left(\frac{\sigma}{N}\right) \left[\int_0^{\sigma} f_2(\sigma) \cdot d\sigma \right] \cdot d\sigma \right\} =$$

$$= \frac{d}{dN} \left\{ \int_0^{\infty} f_2(\sigma) \left[\int_0^{\sigma} f_1\left(\frac{\sigma}{N}\right) \cdot d\sigma \right] \cdot d\sigma \right\}. \quad (3)$$

Співвідношення (2) та (3) однозначно пов'язують щільності $f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right)$, $f_2(\Delta_{II})$, $f_3(t)$ або $f_1\left(\frac{\sigma}{N}\right)$, $f_2(\sigma)$, $f_3(N)$, що входять до кожного з аналізованих комплексів моделей. Тому щільності розподілів, що входять до єдиного комплексу, обов'язково повинні мати загальні параметри.

Щільності вигляду $f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right)$ і $\bar{f}_1\left(\frac{t}{\Delta}\right)$ моделі деградаційних процесів містять параметричні функції, коефіцієнти яких при побудові моделей мають оцінюватися за статистичними даними про процес. Зазвичай такі дані мають дискретний характер, тобто задаються як координати вибіркової точки (t_i^*, Δ_i^*) . Статистичні дані

про ресурс елемента можуть містити випадкові напрацювання до граничного стану t_i і напрацювання працездатних об'єктів τ_i [8, 9]. За наявності вибірових даних про граничний рівень параметра відмови Δ_{pi} їх також слід використовувати при спільному оцінюванні параметрів і

коефіцієнтів параметричних функцій комплексу моделей. Найбільш ефективним способом спільного оцінювання параметрів розподілів і коефіцієнтів параметричних функцій є метод максимуму правдоподібності, що полягає в оцінюванні зазначених величин за умови [5]

$$L = \sum \ln f_1\left(\frac{\Delta_i^*}{t_i^*}\right) + \sum \ln \bar{f}_1\left(\frac{t_i^*}{\Delta_i^*}\right) + \sum \ln f_2(\Delta_{pi}) + \sum \ln f_3(t_i) + \sum \ln [1 - F_3(\tau_i)] \Rightarrow \max, \quad (4)$$

де $F_3(\tau_i)$ – функція розподілу ресурсу.

Зазвичай оцінювання параметрів з умови (4) потребує використання чисельних методів оптимізації. При розгляді комплексу моделей втомного руйнування (рис. 1, б) підхід до статистичного

оцінювання параметрів і коефіцієнтів буде аналогічним.

Конкретний вид розподілів, що описують моделі комплексів, можна вибирати з класу розподілів, що є узагальненням розподілу Л. Я. Пешеса [10]:

$$f\left(\frac{x}{t}\right) = \frac{\lambda^\alpha(t) \cdot e^{-\lambda(t)\varphi(x)}}{\Gamma(\alpha, \varphi(x_o))} [\varphi(x)]^{\alpha-1} \cdot \frac{d\varphi(x)}{dx}, \quad x_o < x < \infty, \quad (5)$$

де $\varphi(x)$ – позитивна монотонно зростаюча функція параметра відмови x ;

$x_o \geq 0$ – нижня межа можливих значень параметра;

$\Gamma(\alpha, \varphi(x_o)) = \int_{\varphi(x_o)}^{\infty} e^{-z} \cdot z^{\alpha-1} \cdot dz$ – неповна гамма-функція;

$\lambda(t)$ – параметрична функція, що визначає залежність деградаційного процесу від напрацювання.

Так, ураховуючи, що

$$f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right) = \lambda(t) \cdot e^{-\lambda(t)\varphi(\Delta)} \cdot \frac{d\varphi(\Delta)}{d\Delta},$$

$$f_2(\Delta_{pi}) = \frac{\lambda_{pi}^\alpha \cdot e^{-\lambda_{pi}\varphi(\Delta_{pi})}}{\Gamma(\alpha, \varphi(\Delta_o))} [\varphi(\Delta_{pi})]^{\alpha-1} \cdot \frac{d\varphi(\Delta_{pi})}{d\Delta_{pi}},$$

за допомогою формули (2) отримаємо вираз для щільності розподілу ресурсу

$$f_3(t) = -\frac{\alpha \cdot \lambda_{pi}^\alpha}{[\lambda_{pi} + \lambda(t)]^{\alpha+1}} \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt},$$

звідки випливає, що параметрична функція $\lambda(t)$ має бути монотонно спадною.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. Теоретичний аналіз основних деградаційних процесів, що визначають механічну надійність елементів машин, дав змогу розробити універсальний підхід до побудови комплексів стохастичних моделей надійності, що

забезпечує можливість спільного статистичного оцінювання параметрів моделей для процесів, зумовлених зношуванням і втомним руйнуванням. Практичне використання пропозованих комплексів моделей механічної надійності є доцільним як при прискореному оцінюванні, так і прогнозуванні надійності на стадії ресурсного проектування елементів мобільних машин.

Список використаних джерел

1. Woo S. Reliability Design of Mechanical Systems a Guide for Mechanical and Civil Engineers, 2nd ed. Springer Nature Singapore Pte Ltd. Singapore, 2020. 476 p.
2. Birolini A. Reliability Engineering. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017.
3. Grynchenko O., Alfyorov O. Mechanical Reliability. In Prediction and Management under Extreme Load Conditions. Springer Nature: Cham, Switzerland, 2020. 125 p. doi.org/10.1007/978-3-030-41564-8.
4. Гринченко А., Алфєров А. Основы прогнозирования и управления надежностью в условиях экстремальных нагрузок. Харьков: ТОВ «Планета - Принт», 2017. 136 с.
5. Гринченко А. С. Механическая надежность мобильных машин: Оценка, моделирование, контроль. Харьков: Віровець А. П. «Апостроф», 2012. 259 с.
6. Гринченко А. С. Особенности построения инвертируемых стохастических моделей механической надежности при параметрических отказах. *Вісник ХДТУСГ*. Харків, 2004. Вип. 23. С. 140-145.
7. Гринченко О. С., Алфєров О. І., Юр'єва Г. П. Прогнозування та керування механічною надійністю за допомогою інверсійного методу. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*. 2018. № 12. С. 210–213.
8. Alfyorov O., Grynchenko O., Ponomarenko V., Shchur T., Tomporowski A., Kruszelnicka W., Walichnowska P. Agricultural Equipment Design Optimization Based on the Inversion Method. *Agriculture*. 2022. № 12. P. 1410. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091410>.
9. Алфєров О., Савченко В., Свіргун О. Оцінювання показників надійності на основі результатів випробувань на стендах та в експлуатації. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. Мелітополь: ТДАТУ, 2023. Вип. 13. т. 2. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-2-8.
10. Пешес Л. Я., Степанова М. Д. Основы теории ускоренных испытаний на надежность. Минск: Наука и техника, 1972. 168 с.

Алфєров Олексій Ігорович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри проектування технічних систем, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0002-0357-3141. Тел.: +38 (099) 18-50-338. E-mail: alfogor@i.ua.

Alfyorov Oleksiy, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, Professor of the Department of Engineering Systems Design, Sumy National Agrarian University. ORCID iD: 0000-0002-0357-3141. Тел.: +38 (099) 18-50-338. E-mail: alfogor@i.ua.

Статтю прийнято 19.06.2023 р.