

Алфьоров Олексій Ігорович,
доктор технічних наук, професор кафедри
проектування технічних систем Сумського
національного аграрного університету

Alfyorov Oleksiy,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Sumy National Agrarian University
<https://orcid.org/0000-0002-0357-3141>

**ІМОВІРНІСНО ОБГРУНТОВАНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ЗАПАСУ ЯК КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ
ПРОЄКТУВАННІ АГРАРНОЇ ТЕХНІКИ
PROBABLY-BASED STOCK COEFFICIENT AS AN OPTIMIZATION CRITERION IN THE DESIGN OF
AGRICULTURAL EQUIPMENT**

Алфьоров О. І. Імовірно обгрунтований
коефіцієнт запасу як критерій оптимізації при
проектуванні аграрної техніки. *Український
журнал прикладної економіки та техніки.*
2023. Том 8. № 1. С. 218 – 225.

Alfyorov O. Probably-based stock coefficient as
an optimization criterion in the design of
agricultural equipment. *Ukrainian Journal of
Applied Economics and Technology.*
2023. Volume 8. № 1, pp. 218 – 225.

Публікація спрямована на впровадження у виробничій процес виготовлення елементів технічних систем аналітичних моделей забезпечення надійності техніки на етапі проектування, що враховують досвід експлуатації попередніх систем або їх аналогів. Використання запропонованого методу визначення основних критеріїв оптимізації виконано на прикладі ґрунтообробних машин сільськогосподарського призначення. Виконано репрезентативний статистичний аналіз експлуатаційної інформації щодо надійності ґрунтообробних агрегатів, які мають коливальний рух робочих органів. Розглянуто результати роботи в умовах експлуатації тринадцяти культиваторів із сумарним наробітком понад 280 тис. га. Експлуатаційні дослідження проводили в 7 областях України, окрім того вони характеризуються різноманітними ґрунтово-кліматичними умовами. Встановлено виникнення раптових відмов унаслідок зламу пружних стійок робочих органів культиваторів. Зафіксовано 42 раптові відмови серед 260 стійок, які випробовували. У роботі запропоновано інверсійний метод, що дозволяє визначати параметри навантаженості пружних елементів, концепцією якого є поєднання можливостей теоретичної моделі надійності, яка пристосована до прогнозування імовірності безвідмовної роботи, обумовленої раптовими відмовами з конкретними показниками статистичної моделі, які отримані залежно від наробітку пружних стійок. Наведений підхід на прикладі оцінювання роботи ґрунтообробних агрегатів надає можливість визначити вплив навантаження на наявні конструкції машин і їх елементи, що призводять до раптових відмов. Представити такий вплив можна у вигляді ймовірно обгрунтованого коефіцієнта запасу, який має емпіричне підґрунтя і дає змогу під час проектування наступного покоління технічних систем і їх елементів корегувати теоретично припущену величину навантаження. Конструктивні та технологічні зміни під час проектування, що засновані на описаному в статті підході, надають можливість керувати рівнем надійності з економічних та іміджевих міркувань.

Ключові слова: інверсійний метод, пружний елемент, екстремальне навантаження, імовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт запасу, надійність, проектування.

The publication aims to introduce the production process of manufacturing elements of technical systems of analytical models for ensuring the reliability of equipment at the design stage, considering the experience of operating previous systems or their analogs. The proposed method of determining the main optimization criteria is used in the example of agricultural tillage machines. A representative statistical analysis of operational information on the reliability of soil tillage units, which have oscillating movement of working bodies, was performed. The work results under the operation conditions of thirteen cultivators with a total yield of more than 280 thousand ha was considered. Functional studies were conducted in 7 regions of Ukraine. In addition, they are characterized by various soil and climatic conditions. The occurrence of sudden failures due to the breakage of the adjustable racks of the working bodies of the cultivators has been established. Forty-two premature failures were recorded among the 260 racks that were tested. The paper proposes an inversion method that allows determining the load parameters of elastic elements, the concept of which is a combination of the capabilities of the theoretical model of reliability, which is adapted to forecasting the probability of failure-free operation due to sudden failures with specific indicators of the statistical model, which are obtained depending on the performance of adjustable racks. The given approach provides an opportunity to determine the impact of the load on existing machine designs and their elements, which lead to sudden failures based on evaluating the operation of tillage units. It is possible to present such an influence in the form of a probabilistically justified reserve factor, which has an empirical basis and makes it possible to correct the theoretically assumed load value during the design of the next generation of technical systems and their elements. Constructive and technological changes during the procedure, based on the approach described in the article, provide an opportunity to manage the level of reliability for economic and image reasons.

Keywords: inversion method, elastic element, extreme load, probability of failure-free operation, reserve factor, reliability, design.

Вступ

До раптових механічних відмов мобільної техніки належать різні види об'ємного і поверхневого руйнування, що призводять до втрати працездатності, наприклад, раптове квазістатичне руйнування або залишкова деформація, обумовлені екстремальними навантаженнями. Особливу увагу слід приділяти раптовим механічним відмовам тому, що їх виникнення практично неможливо діагностувати і, відповідно, передбачати моменти відмов [1-3]. Це може негативно впливати на конкурентоспроможність техніки. Тому під час проектування необхідно таким чином обирати конструктивні і технологічні параметри, щоб вони забезпечували достатній рівень його безвідмовності, що гарантується впродовж заданого періоду експлуатації.

Обов'язковим під час проектування є аналіз напружено-деформованого стану технічної системи або її елемента. Реальна оптимізація майбутньої конструкції залежить від результатів і достовірності такого аналізу, який формується умовно з трьох етапів. Побудова просторової моделі із зазначенням її фізичних властивостей, правильність побудови скінченноелементної сітки та коректне задання граничних умов. Якщо перші два етапи залежать від кваліфікації конструктора, то коректне задання граничних умов потребує знань про характер і значення навантаження на об'єкт, який проектують, що виникають під час його взаємодії з іншими об'єктами та середовищем. На ці питання можуть відповісти випробування на стендах експериментальних зразків. У такому випадку з високою імовірністю можна визначити характер навантаження. В окремих випадках можна визначити і значення навантаження, але воно буде відповідати експлуатаційному навантаженню, що, як правило, є причиною виникнення поступових відмов. Перед відповідальним виробником постає питання визначення величини та частоти виникнення екстремальних навантажень, що є причиною раптових відмов. Яскравим прикладом різноманітних за значенням і значимих за частотою виникнення екстремальних навантажень є машини галузі обробітку ґрунтів. Для надання аналітичних моделей прогнозування надійності за раптовими відмовами, як інструмента оптимізації під час конструювання, розглянуто приклад визначення ймовірно обґрунтованого коефіцієнта запасу за раптовими відмовами ґрунтообробних агрегатів.

Обстеження культиваторів, які виконують передпосівний і загальний обробіток ґрунту стрілочастими лапами, показує, що вони здебільшого закріплені до рами культиватора за допомогою S-подібних або C-подібних пружних стійок. Такі стійки, деформуючись, призводять до автоколивального руху робочих органів, що, порівняно з жорстким закріпленням, має суттєві переваги, підвищуючи якість оброблення ґрунту за рахунок додаткової динамічності. Однак практика використання культиваторів у виробничих умовах виявила і негативні наслідки збільшення динамічності робочих елементів. Насамперед підвищена гнучкість стійок, яка є необхідною умовою виникнення стаціонарних автоколивань з достатньо великою амплітудою, призводить іноді до раптових руйнувань стійок, обумовлених випадковими ущільненнями ґрунту або засміченістю ділянки, що обробляла.

Таким чином, актуальним є комплекс проблем механічної надійності культиваторів з коливальним рухом робочих органів. Його успішне вирішення пов'язане з раціональним визначенням коефіцієнта запасу міцності пружних стійок агрегату. Коефіцієнт запасу стійки має одночасно задовольняти суперечливим вимогам: забезпечувати міцність стійки і створювати необхідну гнучкість, яка призводить до якісного оброблення ґрунту за допомогою коливального руху робочих органів.

У роботах [1, 2] розроблені стохастичні моделі, використання яких дозволяє прогнозувати зміну ймовірності безвідмовної роботи залежно від наробітку у випадку раптових механічних відмов. Виконувати прогнозування надійності можливо, якщо відомі певні характеристики механічної навантаженості об'єкта, який розробляють [4]. Період проектування зазвичай достатньо обмежений у часі і тому заздалегідь отримати у достатньому обсязі експериментальні дані щодо екстремальних навантажень в експлуатації, які були б вірогідними у статистичному аспекті, практично неможливо. Залишається використовувати розрахункові методи динамічного аналізу напружено-деформованого стану або методи експертного узагальнення досвіду експлуатації виробів, які є конструктивними аналогами об'єкта, який проектують. Кожний з цих шляхів має певні недоліки. Перспективним напрямом удосконалення інженерного прогнозування та забезпечення механічної надійності є використання інверсійного методу та стохастичних моделей надійності, які інвертуються [2, 5, 6]. Моделі, наведені у [1, 2], цілком відповідають вимогам, яким мають задовольняти моделі механічної надійності, які інвертуються.

Статистичне оцінювання залежності ймовірності безвідмовної роботи від наробітку у випадку механічних відмов зазвичай виконується за цензурованими вибірками даних, які складаються з наробітків до відмови та наробітків до припинення випробувань у виробів, що не відмовляли [3].

Визначення мети та цілей дослідження

Метою дослідження є обґрунтування впровадження у виробничій процес виготовлення елементів технічних систем результатів розрахунку за аналітичними моделями забезпечення надійності техніки на етапі проектування, що враховують досвід експлуатації попередніх систем або їх аналогів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Загальна концепція застосування інверсійного методу. Компенсувати нестачу експериментальної інформації щодо можливої експлуатаційної навантаженості об'єкта, що проектують, доцільно, базуючись на статистичних даних щодо механічної надійності подібних за конструкцією та умовами використання виробів-аналогів, які мають достатньо великий наробіток в умовах реальної експлуатації. Наявність певної теоретичної моделі надійності, придатної і пристосованої до прогнозування ймовірності безвідмовної роботи залежно від узагальнених характеристик зовнішньої навантаженості об'єкта, який проектують, принципово дозволяє розв'язати за допомогою тієї ж моделі і обернену інверсійну задачу: вважаючи відомою статистично визначену залежність ймовірності безвідмовної роботи від наробітку знаходити відповідні характеристики зовнішньої навантаженості. Складність розв'язку оберненої задачі полягає в тому, що таке обернення не гарантує однозначного визначення шуканих характеристик навантаженості. Це призводить, по-перше, до необхідності визначати параметри теоретичної моделі, використовуючи якийсь з обраних критеріїв її найкращого наближення до статистичної. По-друге, з цього виходить, що еквівалентність знайдених таким чином характеристик навантаженості реальним експлуатаційним є умовною. Однак безсумнівною перевагою інверсійного методу є стимулювання корисного використання реальних статистичних даних, які можливо отримувати у значному обсязі шляхом моніторингу надійності, що не потребує великих витрат.

Отримано експлуатаційні дані щодо раптових відмов культиваторів з пружними С-подібними стійками, на яких закріплені стріласті лапи (для збереження комерційної таємниці та відсутності згоди виробника на публічне висвітлювання результатів досліджень, марка та модель агрегатів не вказується). Експлуатаційні випробування за обсягом є статистично репрезентативними і їх проводили в 7 областях України, а саме у Харківській, Сумській, Донецькій, Дніпропетровській, Полтавській, Запорізькій та Одеській, що охоплюють різноманітні ґрунтово-кліматичні умови: механічні властивості ґрунту, щільність, вологість і таке ін. Спостереження проводили впродовж одного року виконання робіт від початку експлуатації всіх культиваторів, фіксували наробіток до раптової відмови окремої стійки та загальний наробіток культиватора. Наведені ґрунтово-кліматичні умови, а також відповідність регулювань обладнання регламентним показникам не фіксували, адже метою було визначення середнього наробітку до раптової відмови, що відповідає реальним умовам експлуатації. В усіх випадках руйнування стійок мав місце раптовий злам. Нарробіток до раптових відмов фіксували у гектарах обробленої площі.

Загалом спостереження за експлуатацією пружних стійок проводили на 13 культиваторах. Напрацювання агрегатів складало від однієї до сорока тисяч гектарів обробленої площі. Було зафіксовано 42 раптові відмови: злам стійок. За час спостережень сумарний наробіток культиваторів склав понад 280 тис. га. Враховуючи кількість пружних стійок на кожному культиваторі, обсягом випробувань слід вважати роботу 260 стійок до першої відмови або до призупинення випробувань, які утворюють багаторазово цензуровану за наробітком вибірку статистичних даних.

Методологією статистичного аналізу інформації щодо надійності є непараметричний метод аналізу [7-11] цензурованої вибірки, згрупованої за інтервалами. У табл. 1 наведені результати проміжних розрахунків за виразами 1-4, а також значення ймовірності безвідмовної роботи пружних стійок культиватора, що відповідає розрахунку за виразом 5.

У межі кожного інтервалу наробітку потрапляла певна кількість стійок, що відмовили (були зруйновані) – n_o , або випробування яких на момент аналізу були призупинені – n_{np} , хоча руйнування не відбулось. Усі наробітки до відмови та до призупинення випробувань (без відмови) утворюють єдину загальну вибірку випадкових наробітків. Цю єдину вибірку наробітків до відмови та наробітків до призупинення випробувань, якщо відмова ще не відбулась,

поділяють на однакові інтервали, починаючи з того першого інтервалу, де відмов нема. Емпірична функція розподілу F_c , яка побудована за допомогою цієї загальної нецензурованої вибірки, наведена у табл. 1. Вибірка є повною і показує залежність, за якою оцінюється функція сумарної імовірності потрапляння відмов або призупинення випробувань у відповідний інтервал. Треба відзначити, що потрапляння в інтервал наробітку до призупинення випробувань визначалось по кожному з 13 культиваторів, у яких виникала перша відмова стійки. Кількість наробітків до призупинення випробувань n_{np} в інтервалі визначалась з урахуванням кількості стійок, які одночасно працюють, у агрегаті.

Таблиця 1. Статистичні дані та результати аналізу

№ інт.	Межі інтервалу, га	n_o	n_{np}	F_c	N_{ci}	W_i	θ_i	N_i	R_i
1	1000 ÷ 4000	13	38	0,19615	260	0,19615	0,5270	239,97	0,9458
2	4000 ÷ 7000	9	17	0,29615	209	0,12440	0,5166	200,22	0,9033
3	7000 ÷ 10000	9	69	0,59615	183	0,42623	0,5690	143,74	0,8467
4	10000 ÷ 13000	2	17	0,66923	105	0,18095	0,5249	96,08	0,8291
5	13000 ÷ 16000	3	16	0,74230	86	0,22090	0,5312	77,50	0,7970
6	16000 ÷ 19000	2	32	0,87307	52	0,65380	0,6296	46,85	0,7630
7	19000 ÷ 22000	0	0	0,87307	52	0	0	33,00	0,7630
8	22000 ÷ 25000	1	0	0,87692	51	0,0196	0,5025	32,00	0,7391
9	25000 ÷ 28000	2	16	0,94615	33	0,54545	0,5973	22,44	0,6733
10	28000 ÷ 31000	0	0	0,94615	33	0	0	14,00	0,6733
11	31000 ÷ 34000	1	13	1,000	19	-	-	-	-

Потім послідовно в кожному інтервалі визначають сумарну кількість стійок, які випробували до цього інтервалу, або обсяг цензурованої вибірки наробітків в i -му інтервалі:

$$N_{ci} = N - \sum_{k=1}^{i-1} (n_{ок} + n_{npk}), \quad (1)$$

де N – загальний обсяг вибірки наробітків до відмови та до припинення випробувань. У вибірці, що розглядається, $N = 260$.

Визначають значення відносної частоти W_i наробітків у кожному інтервалі:

$$W_i = \frac{n_{ок} + n_{npk}}{N_{ci}}. \quad (2)$$

Визначають частку наробітків, які враховуються у кожному інтервалі, до призупинення випробувань:

$$\theta_i = \begin{cases} \frac{1 - \sqrt{1 - W_i}}{W_i}, & \text{якщо } W_i > 0; \\ 0, & \text{якщо } W_i = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Кількість стійок, які були умовно випробувані в кожному інтервалі групування вибірки, враховували за формулою:

$$N_i = N_{ci} - \theta_i \cdot n_{npi}; \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

Статистичне оцінювання імовірності безвідмовної роботи пружних стійок культиватора виконували за допомогою множникового [3, 7] методу непараметричного оцінювання:

$$R_i = \prod_{k=1}^i \left(1 - \frac{n_{ок}}{N_k}\right). \quad (5)$$

Вихідні дані та результати статистичного аналізу надійності пружних стійок за раптовими відмовами наведені у табл. 1. Аналіз згрупованої вибірки закінчується передостаннім інтервалом. Статистичний аналіз вибірових даних щодо раптових відмов культиваторів показав (рис. 1), що функція зміни ймовірності безвідмовної роботи пружних стійок щодо раптових відмов має типовий вигляд. Це свідчить, що статистична модель надійності відповідає теоретичній моделі квазістатичного руйнування послідовних систем [1, 2].

Графік на рис. 1 і дані, наведені у табл. 1, дозволяють, наприклад, визначити, що 90% гамма – відсотковий наробіток стійки до раптової відмови складає приблизно 7 тис. га, а 80% стійок відпрацюють безвідмовно приблизно на 16 тис. га площі. Враховуючи, що кожний злам стійки потребує не тільки її заміни, але і призводить до втрат робочого часу культиватора у сезон виконання необхідних польових робіт, слід вважати, що рівень конкурентоспроможності виробника пружних стійок не є достатнім, а їх якість потребує покращення.

Дані, отримані за результатами статистичного аналізу надійності пружних стійок, дозволяють використати інверсійний метод керування надійністю [1-3]. Реалізація цього методу можлива тоді, коли побудована репрезентативна статистична модель надійності, отримана в умовах експлуатації досліджуваного об'єкта. Побудова такої моделі дозволяє додатково використати теоретичну модель надійності у разі раптових відмов.

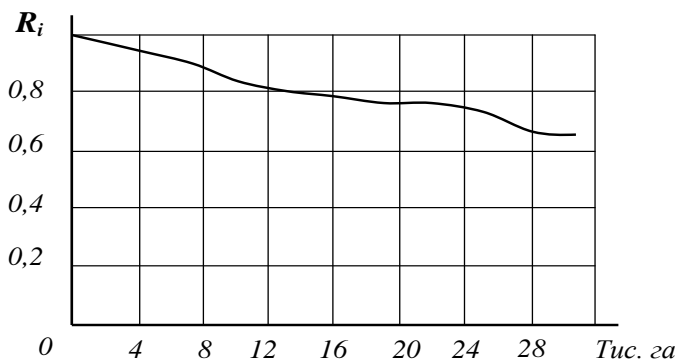


Рис. 1. Зміна ймовірності безвідмовної роботи стійок залежно від наробітку

вантажень. За використання такого підходу покращення якості стійок буде керованим і прогнозованим.

Оскільки екстремальні навантаження належать до рідкісних випадкових подій [12-16], то прогнозування показників надійності залежно від напрацювання доцільно проводити у припущенні, що випадковий потік екстремальних навантажень є пуассонівським [4, 5].

Якщо потік екстремальних навантажень є стаціонарний з постійною інтенсивністю $\omega_o = 1/T_o$ (де T_o – середній період між випадковими навантаженнями), то ймовірність безвідмовної роботи визначається виразами:

$$R(t) = \int_0^1 e^{-\omega_o t [1 - F_1(G)]} dG = \int_0^1 e^{-\omega_o t (1 - F)} g_1(F) dF. \quad (6)$$

Функція одиничного розподілу навантаження $F_1(G)$, що входить до виразу (6), залежить як від виду розподілів навантаження і тримальної здатності, так і від величини їх параметрів [1, 2].

В окремому випадку, якщо екстремальні навантаження і тримальна здатність є подібними випадковими величинами і розподілені за законом Вейбулла з одним і тим же параметром форми b , то з (6) можна отримати аналітичний вираз для прогнозування ймовірності безвідмовної роботи залежно від напрацювання [1, 2]. У такому разі функція одиничного розподілу навантаження $F_1(G) = 1 - (1 - G)^{\bar{K}^b}$, і після підстановки якої в (6) отримаємо:

$$R(t) = \int_0^1 e^{-\omega_o t (1 - G)^{\bar{K}^b}} dG. \quad (7)$$

Заміна змінної $x = (1 - G)^{\bar{K}^b}$ призводить цей інтеграл до вигляду:

$$R(t) = \frac{1}{\bar{K}^b} \int_0^1 e^{-\omega_o t x} x^{\frac{1}{\bar{K}^b} - 1} dx. \quad (8)$$

Після інтегрування і перетворень (8) виражається за допомогою табульованих гамма-функцій [1, 2] у вигляді:

$$R(t) = \frac{\Gamma(1 + 1/\bar{K}^b) - \Gamma(1 + 1/\bar{K}^b, \omega_o t)}{(\omega_o t)^{1/\bar{K}^b}} + e^{-\omega_o t}, \quad (9)$$

де $\Gamma(\alpha, \omega_o t) = \int_{\omega_o t}^{\infty} e^{-y} y^{\alpha - 1} dy$ – неповна гамма-функція.

Обчислення в (9) повної $\Gamma(1 + 1/\bar{K}^b)$ і неповної $\Gamma(1 + 1/\bar{K}^b, \omega_o t)$ гамма-функцій можна здійснювати за допомогою комп'ютерного математичного пакета. Для наближених обчислень неповної гамма-функції в інженерних розрахунках можна використовувати [1, 2] її розклад Лежандра в безперервний (ланцюговий) дріб:

$$\Gamma(1 + 1/\bar{K}^b, \omega_o t) \cong \frac{e^{-\omega_o t} (\omega_o t)^{1 + 1/\bar{K}^b}}{\omega_o t - \frac{1/\bar{K}^b}{1 + \frac{1/\bar{K}^b}{\omega_o t + \frac{2}{1 + \frac{1/\bar{K}^b}{\omega_o t + 2 - 1/\bar{K}^b}}}}} \quad (10)$$

На рис. 2 показані графіки ймовірності безвідмовної роботи залежно від безрозмірного напрацювання $\tau = \omega_o t$. Криві на рис. 2 побудовані за допомогою загального виразу (6) при

$F_1(G) = 1 - (1 - G)^{\bar{K}^b}$, що відповідає розподілу Вейбулла для навантаження і тримальної здатності. При цьому $b = 12,15$ (коефіцієнт варіації навантаження і тримальної здатності $V = 0,1$). Треба розуміти, що в наведених дослідженнях значення коефіцієнтів варіацій прийняті з припущеннями, однак для більш достовірного їх значення треба провести низку досліджень із статистичного оцінювання навантаження при різних швидкостях обробітку ґрунту з урахуванням розсіювання опору на різних типах ґрунтів з різною їх вологістю і т. ін., а також зробити контроль якості виготовлення стійок на виробництві. Коефіцієнти варіації навантаження і тримальної здатності слід сприймати, як критерії, що корегують теоретичну модель і наближають її до статистичної. Наведені середні ймовірносно обґрунтовані коефіцієнти запасу \bar{K}_n на рис. 2 також відповідають наведеним значенням коефіцієнтів варіацій 0,1.

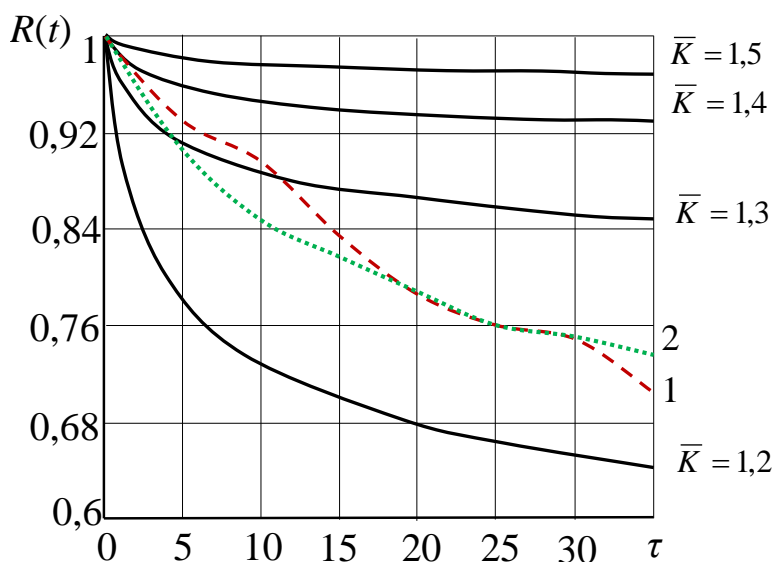


Рис. 2. Графіки кривих зміни ймовірності безвідмовної роботи залежно від напрацювання і коефіцієнта запасу

Емпіричну залежність імовірності безвідмовної роботи пружної стійки культиватора R_i (рис. 1) відображаємо на графіку 2 у відповідних координатах (рис. 2, крива 1). Це дозволяє визначити наближене значення параметру навантажувальності $\omega_n = 0,00161$, що відповідає середньому періоду між випадковими навантаженнями $T_n = 625$ Га. Відповідне середнє значення наближеного коефіцієнта запасу $\bar{K}_n = 1,22$. Це дозволяє за допомогою виразу (9) визначити наближену теоретичну залежність імовірності безвідмовної роботи $R(t)$.

Для визначення адекватних значень параметрів навантаження мінімізуємо функцію (10) методом найшвидшого спуску [17]:

$$\phi(\omega_0, \bar{K}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (R(t_i) - R_i)^2} \Rightarrow \min \quad (11)$$

Значення $\omega_0 = 0,00097$, що відповідає $T_0 = 1031$ Га та $\bar{K} = 1,24$, отримані за умов мінімізації, дозволяють за допомогою моделі (9) отримати адекватну теоретичну модель імовірності безвідмовної роботи пружних стійок (рис. 2, крива 2) під час їх експлуатації на різноманітних видах чорноземів, згідно з географічним розташуванням дослідних господарств.

Такі результати надають можливість оцінити реальну величину випадкового екстремального навантаження, яке може призвести до раптової відмови. Їх слід порівнювати з відповідними критеріями, такими як коефіцієнт запасу та максимальні навантаження, що були закладені під час проектування. Для спрощення розуміння результатів використання наведеного інверсійного методу наведемо такий теоретичний приклад. Припустимо, що під час проектування наведених пружних стійок виробник заклав теоретичне максимальне навантаження, яке у відношенні до допустимого навантаження забезпечувало коефіцієнт запасу за раптовими відмовами 1,5, що формувало конструктивні та фізико-технічні параметри стійки. Однак на практиці виявилось, що в ґрунтово-кліматичних умовах України максимальні навантаження дещо перевищують теоретично задані під час проектування навантаження, а отже не відповідають параметрам проектування та забезпечують коефіцієнт запасу за раптовими відмовами лише на рівні 1,24, що, своєю чергою, позначається на ймовірності безвідмовної роботи. Таким чином, під час проектування наступного покоління стійок (більш оптимізованого), на етапі задання граничних умов під час аналізу напружено-деформованого стану слід враховувати досвід експлуатації попереднього покоління стійок (або аналогів), збільшивши рівень допустимого навантаження до рівня, що за встановлених значень коефіцієнтів варіації навантаження та тримальної здатності забезпечить необхідний рівень безвідмовності.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Кожне наступне покоління технічних систем прагне бути більш оптимізованим, більш досконалим. Сучасні методи моделювання надають можливість достовірного проектування та зменшують витрати на стадії випробувань дослідних зразків. Однак існує ще багато випадкових факторів, які не можливо передбачити, але деякі можливо спрогнозувати з достатньою імовірністю. Автори запропонували нескладні аналітичні моделі, як побутовий інструмент сучасного конструктора. Маючи результати наведених у статті досліджень, виробник отримує чіткий і зрозумілий критерій оцінювання у вигляді коефіцієнтів запасу, який може регламентувати, забезпечуючи при цьому необхідний рівень імовірності безвідмовної роботи.

Реалізація інверсійного методу разом з побудованими моделями прогнозування імовірності безвідмовної роботи залежно від наробітку та коефіцієнта запасу (рис. 2) дає виробнику очевидну можливість ефективного управління надійністю за допомогою зміни коефіцієнтів запасу за середніми \bar{k} , що призведе до стабілізації рівня безвідмовності елементів шляхом збільшення коефіцієнтів запасу і відповідного зменшення впливу напрацювання на ймовірність безвідмовної роботи.

Зокрема, визначивши середнє значення наближеного коефіцієнта запасу за раптовими відмовами пружної стійки культиватора на рівні 1,24, виробник ухвалює рішення щодо доцільності його корегування. Визначає ризики падіння попиту через здорожчання в разі підвищення ресурсу шляхом конструктивних і технологічних покращень або прибутків шляхом реалізації запасних частин тощо. Такі висновки потрібно робити з залученням результатів технологічного, облікового та маркетингового аналізів.

Список літератури

1. Grynchenko, O.; Alfyorov, O. Mechanical Reliability. In Prediction and Management under Extreme Load Conditions; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2020; 125 p.
2. Гринченко, А.; Алферов, А. Основы прогнозирования и управления надежностью в условиях экстремальных нагрузок; ТОВ «Планета - Принт»: Харьков, Украина, 2017; 136с.
3. Гринченко, А.С. Механическая надежность мобильных машин: Оценка, моделирование, контроль; Віровець А.П. "Апостроф": Харьков, Украина, 2012; 259с.
4. Wan, L.; Chen, H.; Ouyang, L.; Chen, Y. A new ensemble modeling approach for reliability-based design optimization of failure-based bridge-type amplification mechanisms. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020, 106, 47–63.
5. Гринченко, А.С.; Алферов, А.И. Прогнозирование надежности элементов машин при случайном пуассоновском потоке экстремальных нагрузжений. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*. 2017, 7, 141–148.
6. Гринченко, О.С.; Алфьоров, 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, 210–213.
7. Upton, G.; Cook, I. Oxford Dictionary of Statistics; Oxford University Press: Oxford, UK, 2008; 453p.
8. Xiao, N.C.; Zuo, M.J.; Zhou, C.N. A new adaptive sequential sampling method to construct surrogate models for efficient reliability analysis. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2018, 169, 330–338.
9. Xiao, N.C.; Zhan, H.Y.; Kai, Y. A new reliability method for small failure probability problems by combining the adaptive importance sampling and surrogate models. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2020, 372, 113336.
10. Soong, T.T. Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers; State University of New York at Buffalo: Buffalo, NY, USA, 2004.
11. Grynchenko, O.S.; Kukhtov, V.G. Надійність машин: Практикум; ТОВ «Планета - Принт»: Харьков, Украина, 2018; 140 с.
12. 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.
13. Biorolini, A. Reliability Engineering; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017.
14. Blischke, W.R.; Murthy, D.N.P. Reliability Modeling, Prediction, and Optimization; Wiley: New York, NY, USA, 2000.
15. McPherson, J.W. Reliability Physics and Engineering: Time-To Failure Modeling; Springer: Cham, Switzerland, 2019.
16. Tuinema, B.W.; Rueda Torres, J.L.; Stefanov, A.I.; Gonzalez, F.M.; van der Longatt, M.A.M. Probabilistic Reliability Analysis of Power Systems; Springer: Cham, Switzerland, 2020.
17. Дмитрієнко Г.М. Теоретичні матеріали лекцій за курсом "Чисельні методи" для студентів денної та заочної форми навчання за спеціальностями: «Комп'ютерні системи та мережі», «Системне програмування»; Сєверодонецьк, 2006.

References

1. Grynchenko, O.; Alfyorov, O. (2020). Mechanical Reliability. In Prediction and Management under Extreme Load Conditions; Springer Nature: Cham, Switzerland.

-
2. Grynchenko, A.; Alforyov, A. (2017). *Osnovy prohnozyrovanyia y upravleniia nadezhnost'iu v usloviakh ekstremal'nykh nahruzok*. [Fundamentals of Predicting and Managing Reliability under Extreme Loads]. PLANETA-PRINT Ltd. Kharkiv, Ukraine.
 3. Grynchenko, A.S. (2012). *Mekhanicheskaia nadezhnost' mobil'nykh mashyn: Otsenka, modelyrovanye, kontrol'*. [Mechanical Reliability of Mobile Machines: Assessment, Modeling, Control]. Publishing House is a Group "Apostrophe". Kharkov, Ukraine.
 4. Wan, L., Chen, H., Ouyang, L., Chen, Y. (2020). A new ensemble modeling approach for reliability-based design optimization of flexure-based bridge-type amplification mechanisms. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 106, pp. 47–63.
 5. Grynchenko, A.S.; Alforyov, A.I. (2017). Predicting the reliability of machine elements under a random *Naukovyj zhurnal «Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv»*. *Sci. J.* 7, 141–148.
 6. Grynchenko, O.S.; Alforyov, O.I.; Yur'yeva, G.P. (2018). Forecasting that keruvannya by mechanical hope for an additional inversion method. *Naukovyj zhurnal «Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv»*. 12, 210–213.
 7. Upton, G.; Cook, I. (2008). *Oxford Dictionary of Statistics*; Oxford University Press: Oxford, UK.
 8. Xiao, N.C.; Zuo, M.J.; Zhou, C.N. (2018). A new adaptive sequential sampling method to construct surrogate models for efficient reliability analysis. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 169, 330–338.
 9. Xiao, N.C.; Zhan, H.Y.; Kai, Y. (2020). A new reliability method for small failure probability problems by combining the adaptive importance sampling and surrogate models. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 372, 113336.
 10. Soong, T.T. (2004). *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*; State University of New York at Buffalo: Buffalo, NY, USA.
 11. Grynchenko, O.S.; Kukhtov, V.G. (2018). *Nadijnist' mashyn: Praktykum*. [The reliability of machines: Workshop]. PLANETA-PRINT Ltd. Kharkiv, Ukraine.
 12. Woo, S. (2020). *Reliability Design of Mechanical Systems a Guide for Mechanical and Civil Engineers*, 2nd ed.; Springer Nature Singapore Pte Ltd.: Singapore.
 13. Birolini, A. (2017). *Reliability Engineering*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
 14. Blischke, W.R.; Murthy, D.N.P. (2000). *Reliability Modeling, Prediction, and Optimization*; Wiley: New York, NY, USA.
 15. McPherson, J.W. (2019). *Reliability Physics and Engineering: Time-To Failure Modeling*; Springer: Cham, Switzerland.
 16. Tuinema, B.W.; Rueda Torres, J.L.; Stefanov, A.I.; Gonzalez, F.M.; van der Longatt, M.A.M. (2020). *Probabilistic Reliability Analysis of Power Systems*; Springer: Cham, Switzerland.
 17. Dmytrienko, H.M. (2006). *Teoretychni materialy lektsij za kursom "Chysel'ni metody" dlia studentiv dennoi ta zaochnoi formy navchannia za spetsial'nostiamy: «Komp'uterni systemy ta merezhi», «Systemne prohramuvannia»*. [Theoretical lecture materials for the course "Numerical methods" for full-time and part-time students majoring in: "Computer systems and networks", "System programming"]. Severodonetsk.

Стаття надійшла до редакції 29.12.2022 р.