

Прогнозування показників надійності технічних систем агропромислового виробництва за результатами статистичного моделювання

O.I. Алфьоров ¹, В.Б. Савченко ², М.Р. Гроссу

*Харківський національний технічний університет сільського господарства
імені Петра Василенка (м.Харків, Україна)
email: ¹ alfogor@i.ua, ² nadezhnost@ukr.net ;
ORCID: ¹ 0000-0002-0357-3141, ² 0000-0003-1303-6494*

В пропонованій статті розглянуто задачу прогнозування показників надійності водокільцевого вакуумного насоса, який входить до складу агрегату індивідуального доїння. Особливістю цього насоса є використання крильчатки, яка виготовлена з поліпропілену. В процесі роботи лопаті крильчатки, які знаходяться під впливом підвищеної температури, деформуються від дії зовнішніх навантажень. Враховуючи явище повзучості поліпропілену, з часом зазор між лопатями крильчатки і корпусом насоса поступово зменшується аж до заклинювання. Значною мірою цей процес визначає величину ресурсу насоса.

В попередніх роботах були детально розглянуті питання визначення параметрів напружено-деформованого стану лопатей водокільцевого вакуумного насоса, а також дана інтервальна оцінка довговічності крильчатки. Але, для прогнозування показників надійності насосу в цілому, необхідна розробка математичної моделі, яка б дозволяла за параметрами конструкції визначати її очікуваний ресурс.

Для вирішення поставленої задачі було використано статистичну модель, основу на використанні бутстреп-моделювання. На відміну від моделювання псевдовипадкових вибірових значень, статистична бутстреп модель використовує реальні значення складових ресурсу окремих елементів конструкції, які були отримані за результатами ресурсних випробувань. З них, випадковим чином, формуються необхідні для статистичного аналізу вибірки. Такий підхід до моделювання вибірок, за якими визначається ресурс деталі, має ряд переваг у порівнянні з класичними методами формування псевдовипадкових вибірок, оскільки не потребує визначення виду і параметрів законів розподілу досліджуваних параметрів, а також дозволяє використовувати взаємопов'язані (векторні) параметри, які визначають ресурс окремого елемента конструкції.

Таким чином, використання статистичного бутстреп-моделювання дозволило отримати інтервальну оцінку гарантованого середнього ресурсу поліпропіленової крильчатки, а також рекомендувати мінімальну величину зазору, яка забезпечить ресурс крильчатки по деформації повзучості не менше ніж нормативний ресурс доільної установки.

Ключові слова: надійність, прогнозування, ресурс, статистичне моделювання, щільність закону розподілу, довірчий інтервал.

Розвиток науково-технічного прогресу, ускладнення конструкцій машин і інтенсифікація режимів їх експлуатації обумовлюють необхідність підвищення надійності технічних систем агропромислового виробництва. Вирішення цієї проблеми – величезний резерв підвищення ефективності виробництва і продуктивності праці.

В процесі розробки нової техніки, задачам забезпечення належного рівня надійності, завжди приділялась значна увага [1-5]. Але, якщо в цілому задачі оцінки і планування надійності техніки успішно вирішуються на загальному рівні, то задачі прогнозування показників надійності із заданим ступенем достовірності, для кожної технічної системи, яка розглядається, в кожному окремому випадку, вирішується індивідуально. Тому,

розробка новітніх методів прогнозування показників надійності технічних систем є актуальною.

Розглянемо задачу прогнозування показників надійності на прикладі водокільцевого вакуумного насоса, який входить до складу агрегату індивідуального доїння. Основні питання розрахунків на міцність та довговічність крильчатки цього насоса, а також питання визначення величини залишкових деформацій її лопатей, були висвітлені в [6-8]. Але, для вирішення питань прогнозування надійності, необхідно детально розглянути процеси, які призводять до виходу з ладу окремих деталей і вузла в цілому.

В ході проведення випробувань, було встановлено, що сталий температурний режим роботи водокільцевого вакуумного насоса у складі

агрегату індивідуального доіння, який оснащений електродвигуном потужністю 11кВт з частотою обертання 3000 об/хв., складає 55 – 57 С°. Літературні джерела [9-12] свідчать про те, що в поліпропілені при температурі, яка вище за 20 С°, і механічному навантаженні, окрім пружних виникають також деформації повзучості.

Найбільш ймовірний вид пошкоджень внаслідок повзучості – це зростаючі залишкові деформації, які можуть привести до зміни геометрії лопатей [6, 7], тертю крильчатки об корпус насоса в перетині А-А (зазор $\delta = 0,4 - 0,5$ мм;) (рис. 1), і в наслідок цього, до можливості заклинювання насоса і втрати працездатності. З метою визначення довговічності поліпропіленової крильчатки по накопиченню деформації повзучості, а також вибору величини мінімального зазору δ з умов забезпечення бажаного ресурсу, необхідне проведення прискорених випробувань.

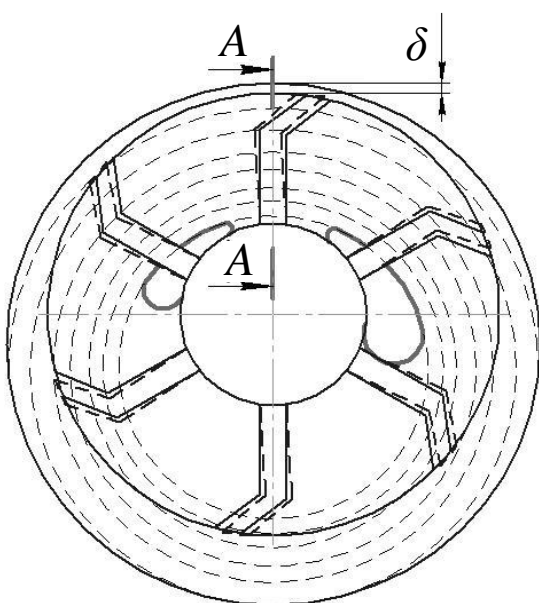


Рис. 1. Схема водокільцевого вакуумного насоса.

При розробці методики прискорених випробувань водокільцевого вакуумного насоса агрегату індивідуального доіння, для отримання достовірних даних про залишкові деформації лопатей поліпропіленової крильчатки насоса, за основу був прийнятий метод проведення випробувань в комбінованому режимі навантаження [3,4].

Проведення прискорених комбінованих випробувань з контролем величини деформаційного пошкодження крильчатки водокільцевого вакуумного насоса внаслідок повзучості поліпропілену, здійснювалося на чотирьох зразках крильчатки [8]. Була обрана двоступенева система навантаження для кожного зразка, який

випробувався. Режими навантаження відповідали експлуатаційному – рівень вакууму 53% (47 кПа залишковий тиск) і жорсткому – рівень вакууму 85% (15 кПа залишковий тиск) режимам роботи насоса. Завдання потрібного режиму навантаження проводилася дроселюванням за допомогою індикатора KI-4840. Експлуатаційний режим відповідав рівню вакууму, який встановлено для процесу доіння. Посилений режим досягався шляхом максимального перекриття подачі повітря з атмосфери в ресивер доїльної установки. При цьому слід враховувати той факт, що індикатор KI-4840 призначений для поточного контролю робочого вакууму. Тому посилений режим навантаження може виникати в процесі експлуатації вакуумної установки індивідуального доіння при певних екстремальних умовах.

При випробуванні першого зразка поліпропіленової крильчатки, частка часу навантаження у посиленому режимі дорівнювала 100% ($\alpha_1 = 1$), а друга ступінь, при якій навантаження відповідає експлуатаційному, задіяна не була ($\alpha_2 = 0$). Оцінка величини деформації повзучості матеріалу крильчатки здійснювалася розробленим раніше методом [7]. Після навантаження першого зразка протягом 80 годин, середня величина абсолютної деформації повзучості поліпропіленової лопатки склала 0,232 мм, що одразу підтвердило наявність накопичення залишкових деформацій, які можуть привести до відмови.

При випробуваннях другого зразка, частка часу, що відповідає верхньому посиленому ступеню навантаження, складала $\alpha_1 = 0,47$ при тривалості випробувань 80 годин, а ступеня навантаження, який відповідає експлуатаційному режиму роботи насоса, дорівнювала $\alpha_2 = 0,53$ з тривалості 90 годин. Таким чином, частка тривалості роботи на першому ступені навантаження α_1 , при випробуваннях першого і другого зразків крильчатки, залишалася однаковою. Це дозволило оцінити вплив експлуатаційного режиму навантаження на деформацію повзучості крильчатки. Другий зразок крильчатки, як і всі наступні випробовувані зразки, навантажували в ході випробувань поперемінно то першим ступенем навантаження, то другим, Такий підхід дозволив усунути можливість впливу ефекту післядії на результати випробувань.

Таким чином, навантажуючи другий зразок циклами по 10 годин експлуатаційного режиму і 10 годин посиленого, після загального напрацювання 170 годин, середня величина абсолютної деформації повзучості поліпропілену, визначена за чотирма лопатками крильчатки, склала 0,364 мм. Виходячи з цього можна зробити висновок, що експлуатаційний режим роботи насоса також спричиняє ушкодження, і

сприяє накопиченню залишкових деформацій внаслідок повзучості поліпропілену. Однак слід зауважити, що експлуатаційний режим роботи насоса доїльного агрегату призводить до меншої інтенсивності зростання деформації повзучості полімеру, ніж посилений режим. Це також підтверджують і результати, які було отримано в ході випробувань третього і четвертого зразків.

Навантаження третього зразка здійснювалося в посиленому і експлуатаційному режимах у співвідношенні $\alpha_1 = 0,34$, $\alpha_2 = 0,66$. Навантаження проводилися циклами – 10 годин посиленого і 20 годин експлуатаційного режиму. Після загального напрацювання крильчатки у 150 годин, була визначена середня величина залишкових деформацій по всіх лопатках крильчатки, яка склала 0,202 мм.

Четвертий зразок крильчатки випробовувався відповідно до обраного режиму з частками часу навантаження $\alpha_1 = 0,25$, $\alpha_2 = 0,75$, що відповідало циклам у 10 годині жорсткого і 30 годин експлуатаційного режиму. Таким чином, після закінчення загального часу навантаження, який відповідав 160 годинам, величина залишкових деформацій склала 0,211 мм. План проведення та результати випробувань наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Режими комбінованого навантаження та результати випробувань.

№ крильчатки	1	2	3	4
α_1 – частка часу випробування крильчатки в посиленому режимі навантаження	1	0,47	0,333	0,25
α_2 – частка часу випробування крильчатки в експлуатаційному режимі навантаження	0	0,53	0,667	0,75
Загальний час випробувань, год.	80	170	150	160
Повна деформація повзучості, мм	0,232	0,364	0,202	0,211

Результати проведених випробувань дозволили отримати лінійну регресійна модель пошкоджуваності крильчатки вакуумного водокільцевого насоса. Для цього, введемо такі позначення:

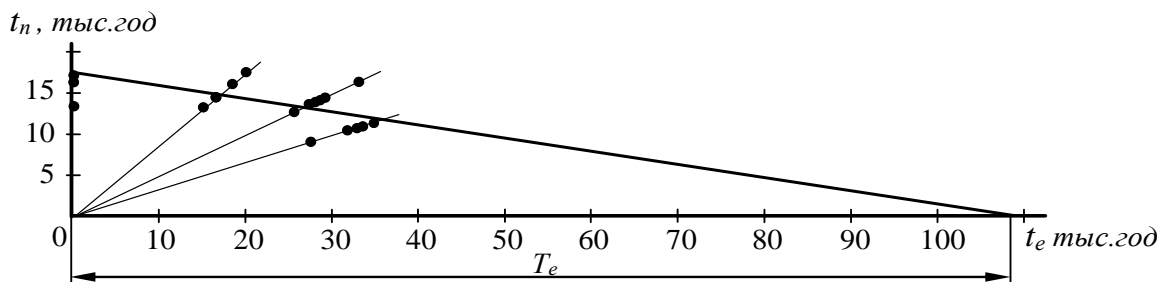


Рис.2. Графік лінійної регресійної моделі пошкоджуваності крильчатки

t_{ni} , t_{ei} – складові ресурсу, які крильчатка відпрацювала в посиленому і експлуатаційному режимах випробувань; τ_{ni} , τ_{ei} – складові напрацювання i -ої лопатки в посиленому і експлуатаційному режимах випробувань. Тоді зв'язок між відповідними значеннями t і τ буде визначатися залежностями [8]:

$$t_{ni} = \frac{\tau_{ni}}{\left(\frac{l_i}{\delta}\right) \cdot \bar{l}^{(1/\nu-1)}};$$

$$t_{ei} = \frac{\tau_{ei}}{\left(\frac{l_i}{\delta}\right) \cdot \bar{l}^{(1/\nu-1)}}$$

де $\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}$ – середня радіальна складова деформації повзучості; $\nu = 0,37$; $\delta = 1$ мм; l_i – радіальна складова деформації повзучості i -ої лопатки, мм.

Результати розрахунків відображує графік лінійної регресійної моделі пошкоджуваності крильчатки, який представлено на рис. 2.

Для побудови довірчих інтервалів можна використовувати відомі аналітичні методи [13-16], однак для таких процедур необхідно знати закон розподілу випадкових величин. В даному випадку при обмеженому обсязі вибірки та відсутності інформації про закон розподілу слід використовувати чисельний метод оцінювання довірчих інтервалів.

Універсальним чисельним методом, зручним і ефективним, як для точкового, так і для інтервального оцінювання параметрів розподілів і показників надійності, є метод непараметричного статистичного моделювання, який часто називають бутстреп-моделюванням [17-20]. Сутність цього методу полягає в тому, що вихідна емпірична вибірка даних про надійність, яка була отримана шляхом вимірювань або випробувань, багаторазово моделюється (відтворюється) за схемою, що відповідає класичній "урновій" ймовірнісній моделі випадкового вибору з поверненням.

При цьому, будь-який з елементів емпіричної вибірки, повинен мати однакову ймовірність, і бути відібраним в модельовану бутстреп-вибірку, обсяг якої при інтервальному оцінюванні має збігатися з обсягом вихідної реальної вибірки.

В силу обмеженості обсягу і випадковості формування модельованої бутстреп-вибірки, вона може мати випадкові відхилення за своїм складом від вихідної емпіричної: якісь елементи емпіричної вибірки можуть не потрапити в бутстреп-вибірку, а інші, відповідно, потраплять в неї кілька разів.

При комп'ютерній реалізації бутстреп-моделювання рівномірно випадкового відбору елементів у бутстреп-вибірку, забезпечується використанням генератора псевдовипадкових чисел, які мають рівномірний розподіл. Для цього можна використовувати наступний алгоритм. Перш за все, дамо кожному елементу вихідної емпіричної вибірки певний порядковий номер. Після цього, діапазон можливих значень рівномірно розподіленої випадкової величини, що генерується, слід розділити на однакові за величиною пронумеровані інтервали, кількість яких збігається з обсягом емпіричної вибірки. При попаданні псевдовипадкового числа, яке генерується, в якійсь з інтервалів, в бутстреп-вибірку відбирається той елемент з емпіричної вибірки, у якого порядковий номер збігається з номером цього "розіграного" інтервалу. Моделювання кожної бутстреп-вибірки закінчується після того, як її обсяг стане рівним з обсягом емпіричної вибірки. Таким способом можна багаторазово відтворювати (моделювати) вибірки даних, імітуючи при цьому можливі випадкові відхилення від вихідної емпіричної вибірки, обумовлені обмеженістю її обсягу. При обсязі вихідної емпіричної вибірки n , загальна кількість модельованих бутстреп-вбірок обмежена числом np . Практично це дозволяє достатньо ефективно використовувати непараметричне моделювання малих вибірок, починаючи з $n = 5$.

Істотною перевагою бутстреп-моделювання перед традиційними методами [19] є відсутність необхідності заздалегідь задавати вид і параметри закону розподілу величини, яка моделюється. Цим способом можуть моделюватися цензуровані вибірки, а також вибірки значень випадкової векторної величини. При бутстреп-моделюванні цензурованих вибірок, напрацювання до відмов і до цензурувань розглядаються як рівноцінні елементи. Вони розглядаються як складові загального варіаційного ряду, але зберігають в процесі моделювання приналежність до своєї категорії.

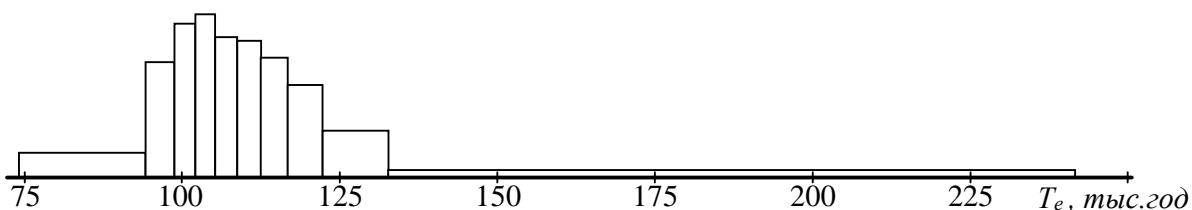


Рис. 3. Гістограма розподілу середнього ресурсу поліпропіленової крильчатки при моделюванні з $\delta = 1$

Тому кількість напрацювань до цензурування, в кожній бутстреп-вибірці, буде різним і випадковим. У разі бутстреп-моделювання векторної величини, всі компоненти випадкового вектора розглядаються і моделюються як один елемент вибірки, геометричною інтерпретацією якого є "вибіркова точка" в просторі з розмірністю, рівною числу компонентів вектора. Наявність вихідної емпіричної вибірки, яка складається з таких точок, дозволяє отримувати бутстреп-вибірки, в яких відтворюється реальний стохастичний взаємозв'язок між компонентами випадкового вектору, що моделюється.

Ще однією перевагою використання бутстреп-моделювання при побудові довірчих інтервалів для прогнозованої величини середнього ресурсу лопатки поліпропіленової крильчатки, є те, що попарне моделювання параметрів tp і te легко здійснюється цим методом.

Використання статистичного моделювання бутстреп-методом, результати якого при $\delta = 1$ мм наведені в табл. 2, дозволило інтервально оцінити величину середнього ресурсу поліпропіленової крильчатки. У таблиці наведено значення T_{min} – нижньої довірчої межі середнього ресурсу.

Таблиця 2. Результати статистичного моделювання ресурсу крильчатки з поліпропілену

Довірча ймовірність	N – кількість вибірок, що моделюються			
	1000	2000	3000	4000
	T_{min} , тыс.год	T_{min} , тыс.год	T_{min} , тыс.год	T_{min} , тыс.год
0,99	83,59	83,27	83,27	83,38
0,95	88,96	89,08	89,08	89,08

Дані, наведені у таблиці 2, свідчать про те, що при довірчій ймовірності 0,99, нижня довірча межа середнього ресурсу поліпропіленової крильчатки становить не менше 83,27 тис.год., а при 0,95 – не менше ніж 88,96 тис.год.

Гістограма, яка побудована на основі моделювання величини середнього ресурсу крильчатки, приведена на рис. 3. Вона має явно несиметричну форму, що свідчить про неможливість використання нормального закону розподілу при оцінці довірчих меж, і підтверджує необхідність застосування методу статистичного моделювання.

Отже, використання статистичного бутстреп-моделювання дозволило отримати інтервальну оцінку гарантованого середнього ресурсу поліпропіленової крильчатки, нижня межа якого при довірчій ймовірності 0,95 і $\delta = 1$ мм, становить близько 89 тис. годин.

Однак на величину ресурсу впливає граничне значення допустимої деформації, яке лімітується найменшим зазором δ між крильчаткою і корпусом насоса. Використання бутстреп-моделювання, дозволило інтервально оцінити середній ресурс крильчатки в залежності від величини мінімального зазору (рис.4).

При визначенні значень складових ресурсу задавалася величина мінімального зазору δ від 0,5 мм до 1 мм. Кількість модельованих вибірок по кожному варіанту величини мінімального зазору становило від 1000 шт.

Таке моделювання дозволило отримати ряд розподілів ресурсу T_e крильчатки і встановити, що залежність середнього ресурсу (позначений хрестиками на рис. 4) від мінімального зазору δ , має нелінійний характер.

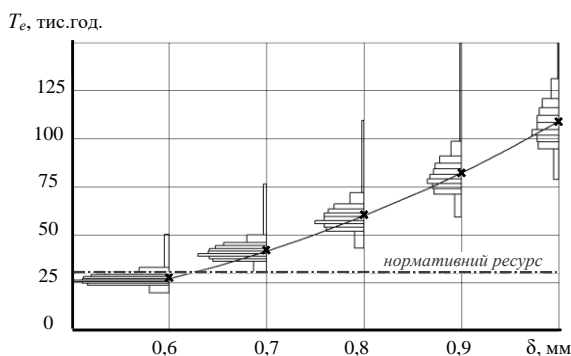


Рис.4. Залежність розподілів ресурсу поліпропіленової крильчатки від мінімального зазору δ .

Аналіз розподілів ресурсу, які були отримані за допомогою статистичного моделювання, дозволив вибрати мінімальну величину зазору $\delta = 0,7$ мм, який при радіусі крильчатки $r_2 = 52$ мм, з ймовірністю 95%, забезпечить ресурс по деформації повзучості не менше 33,9 тис.год., що перевищує нормативний ресурс доїльної установки – 30 тис.год. Для забезпечення такого ресурсу насосів з поліпропіленовими крильчатками і геометрично подібними параметрами, значення відносного мінімального зазору $\Delta = \delta / r_2$ має перебувати в межах 0,0135 ... 0,03

Висновки

1. За результатами випробувань було проведено точкову оцінку ресурсу поліпропіленової крильчатки по накопиченню деформаційних ушкоджень, які визначаються радіальною складовою деформації повзучості лопатки. При

мінімальному зазорі $\delta = 1$ мм, ресурс крильчатки становить 109 тис. годин.

2. Використання статистичного бутстреп-моделювання дозволило отримати інтервальну оцінку гарантованого середнього ресурсу поліпропіленової крильчатки, нижня межа якого при довірчій ймовірності 95% становить близько 89 тис.годин.

3. На підставі аналізу результатів статистичного моделювання, рекомендовано мінімальну величину зазору $\delta = 0,7$ мм, яка забезпечить ресурс крильчатки по деформації повзучості не менше ніж 33,9 тис.год., що перевищує нормативний ресурс доїльної установки.

Література:

1. Гринченко А. С. Механическая надежность мобильных машин: оценка, моделирование, контроль: моногр. / А. С. Гринченко. - Харьков: Віровець А. П. "Апостроф", 2012. - 259 с.
2. Аронов И.З., Бурдасов Е.И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1987.- 184 с.
3. Анилович В.Я., Гринченко А.С., Литвиненко В.Л. Надежность машин в задачах и примерах. – Харьков: Око, 2001. – 320 с.
4. Надійність машин: Практикум. / О. С. Гринченко, В. Г. Кухтов, О. І. Алфьоров, В. Б. Савченко, Є. І. Калінін, В. І. Іванов, Г. П. Юр'єва; За ред. О. С. Гринченка, В. Г. Кухтова. – Х.: ТОВ «Планета-прінт», 2018. – 140 с.
5. О. Grynchenko, O. Alfyorov, "Mechanical Reliability: Prediction and Management Under Extreme Load Conditions", Springer Nature Switzerland AG, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41564-8>
6. Гринченко А. С., Алфьоров А. И. Анализ нагруженности и напряженно-деформированного состояния лопаток водокольцевых вакуумных насосов агрегатов индивидуального доения. // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Збірник наукових праць / Укр. НДІ прогнозування техніки і технологій для с.-г. виробництва імені Л. Погорілого. – Дослідницьке, 2006. – Вип. 9, кн. 2. - С.51-58
7. Гринченко А. С., Алфьоров А. И. Определение остаточных деформаций крыльчатки водокольцевого вакуумного насоса с применением компьютерных технологий. // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка: Механізація сільськогосподарського виробництва. – Харків, 2006. – Вип. 44, том 2.- С.269-273.
8. Гринченко А. С., Савченко В. Б., Алфьоров А. И. Интервальное оценивание долговечности крыльчатки вакуумного насоса на основе ресурсных испытаний // Вдосконалення технологій та обладнання виробництва продукції тваринництва: вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: 2007. - вип.62. - с.20-25.

9. Бокшицкий М. Н., Кликов И. Я., Бокшицкая Н. А. Статическая усталость полиэтилена. М., «Машиностроение», 1967. 282 с.

10. Журков С. Н., Регель В. Р Санфирова Т. А. Связь между температурно-временной зависимостью прочности и характером термической деструкции полимеров. – «Высокомолекулярные соединения», 1964, № 6, С. 1092 – 1098.

11. Архипова З. В., Григорьев В. А., Веселовская Е. В., и др. Полиэтилен низкого давления – Л., Химия, 1980. 235 с.

12. Земляков И. П. Прочность деталей из пластмасс. – М., «Машиностроение», 1972., 158 с.

13. Беляев Ю. К. Статистические методы обработки неполных данных о надежности изделий. - М.: Знание, 1987.- 55 с.

14. Гринченко А. С., Алферов А. И. Прогнозирование надежности элементов машин при случайном пуассоновском потоке экстремальных нагружений / А. С. Гринченко, А. И. Алферов // Техн. сервіс агропром., ліс. та трансп. комплексів. - 2017. - № 7. - С. 141-148.

15. Upton G., Cook I. Oxford dictionary of Statistics. 2008 - 453 p.

16. Xiao NC, Zhan HY, 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 - Volume 372, 1 December 2020, 113336

17. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Статистическое моделирование. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1982. – 296 с.

18. Efron B., Gong G. Aleisurely look at the bootstrap, the jackknife, and crossvalidation// Amer. Statist.- 1983.- Vol. 37, № 1 – p. 36-48.

19. Кучер, Д. Я. Аналіз якості математичних моделей методом бутстреп моделювання : дипломна робота бакалавра : 6.040301 Прикладна математика / Кучер Данило Ярославович. – Київ, 2019. – 36 назв. – режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31537> – Дата звернення: 09.04.2021 – Назва з екрану.

20. Портал знаний. Глобальный интеллектуальный ресурс [Электронный ресурс] : Бутстреп, малые выборки, применение в анализе данных – Режим доступу: <http://statistica.ru/theory/method-butstrepa-i-ego-primenenie-v-sovremennom-analize-dannykh/> (дата звернення 09.04.2021) – Назва з екрана.

References:

1. Hrynchenko A. S. (2012) *Mekhanicheskaya nadezhnost' mobilnykh mashyn: otsenka, modelirovaniye, kontrol*. Kharkov: "Apostrof", - 259 p.

2. Aronov Y. Z., Burdasov E. Y. (1987) *Otsenka nadezhnosti po rezul'tatam sokrashchennykh ispytaniy*. Moscow: Yzd-vo standartov, 184 p.

3. Anylovych V.Ya., Hrynchenko A. S., Lytvynenko V. L. (2001) *Nadezhnost' mashyn v zadachakh y prymerakh*. Kharkov: Oko, 320 p.

4. Hrynchenko O. S., Kukhtov V. H., (2018) *Nadiinist mashyn: Praktykum*. Kharkiv: TOV «Planeta-print», 140 p.

5. Grynchenko O., Alforyov O. (2020) *Mechanical Reliability. Prediction and Management Under Extreme Load Conditions*. Springer Nature Switzerland AG., 125 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41564-8>

6. Hrynchenko A. S., Alferov A. Y. (2006) 'Analiz nahruzhenosti y napriazhenno-deformirovanoho sostoianiya lopatok vodokoltsevykh vakuumnykh nasosov ah-rehatov yndyvydualnogo doenyia'. *Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprovuvannia novoi tekhniki i tekhnologii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy: Zbirnyk naukovykh prats Ukr. NDI prohnouzuvannia tekhniki i tekhnologii dlia s.-h. vyrobnytstva imeni L. Pohoriloh*, (9(2)), pp. 51-58

7. Hrynchenko A. S., Alferov A. Y. (2006) 'Opre-delenye ostatochnykh deformatsiy kryl-chatky vodokoltsevoho vakuumnogo nasosa s pry-meneniem kompiuternykh tekhnologiy'. *Visnyk KhNTUSH im. Petra Vasylenka*. Kharkiv, (44(2)), pp. 269-273.

8. Hrynchenko A. S., Savchenko V. B., Alferov A. Y. (2007) 'Yntervalnoe otsenyvaniye dol-hovechnosti krylchatky vakuumnogo nasosa na os-nove resursnykh ispytaniy'. *Vdoskonalennia tekhnologii ta obladnannia vyrobnytstva produktsii tvarynnytstva: visnyk KhNTUSH im. Petra Vasylenka*. Kharkiv, №62, pp. 20-25.

9. Bokshytskyi M. N., Klykov Y. Ya., Bokshytskaia N. A. (1967) *Statycheskaia ustalost' polyetylena*. Moskva: Mashynostroeniye, 282 p.

10. Zhurkov S. N., Rehel V. R., Sanfyrova T. A. (1964) *Sviaz mezhdru temperaturno-vremennoi zavysymosti prochnosti y kharakterom termicheskoi destruktssy polymerov*. *Vysokomolekuliarnye soedyneniya*, № 6, pp. 1092-1098.

11. Arkhypova Z. V., Hryhorev V. A., Veselovskaia E. V., (1980) *Polyetylen nyzkoho davleniya* L: Khymia, 235 p.

12. Zemliakov Y. P. (1972) *Prochnost' detalei yz plastmass*. Moskva: Mashynostroeniye, 158 p.

13. Beliaev Yu. K. (1987) *Statysticheskiye metody obrabotky nepolnykh dannykh o nadezhnosti yzdelyi*. Moskva: Znanye, 55 p.

14. Hrynchenko A. S., Alferov A. Y. (2017) 'Prohnouzirovaniye nadezhnosti elementov mashyn pry sluchainom puassonovskom potoke ekstremalnykh nahruzheniy'. *Tekhn. servis ahroprom., lis. ta transp. kompleksiv*. № 7, pp. 141-148.

15. Upton G., Cook I. (2008) Oxford dictionary of Statistics. 453 p.

16. Xiao NC, Zhan HY, 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

17. Ermakov S. M., Mykhailov H. A. (1982) *Statystycheskoe modelirovaniye*. Moskva: Nauka. Hl. red. Fyz.-mat. lyt., 296 p.

18. Efron B., Gong G. (1983) 'Aleisurely look at the bootstrap, the jackknife, and crossvalidation' *Amer. Statist.* Vol. 37, № 1, pp. 36-48.

19. Kucher, D. Ya. (2019) *Analiz yakosti matematychnykh modelei metodom butstrep modeliu-vannia: diplomna robota bakalavra*. Kyiv: KPI ym Ihora Sikorskogo. 36p.

20. *Butstrep, malye vyboroky, prymerenyye v anallyze dannykh*. (2021) *Portal znanyi. Hlobalnyi yntellektualnyi resurs*. Available at: <http://statistica.ru/theory/metod-butstrepa-i-ego-primerenie-v-sovremen-nom-analize-dannykh/> (Accessed: 9 April 2021)/

Аннотация

Прогнозирование показателей надежности технических систем агропромышленного производства по результатам статистического моделирования

А.И. Алфьоров, В.Б. Савченко, М.Р. Гроссу

В предлагаемой статье рассмотрена задача прогнозирования показателей надежности водокольцевого вакуумного насоса, который входит в состав агрегата индивидуального доения. Особенностью этого насоса является использование крыльчатки, которая изготовлена из полипропилена. В процессе работы лопасти крыльчатки, которые находятся под влиянием повышенной температуры, деформируются от воздействия внешних нагрузок. Учитывая склонность полипропилена к ползучести, со временем зазор между лопастями крыльчатки и корпусом насоса постепенно уменьшается вплоть до заклинивания. В значительной степени этот процесс определяет величину ресурса насоса.

В предыдущих работах были подробно рассмотрены вопросы определения параметров напряженно-деформированного состояния лопастей водокольцевого вакуумного насоса, а также дана интервальная оценка долговечности крыльчатки. Но, для прогнозирования показателей надежности насоса в целом, необходима разработка математической модели, позволяющей по параметрам конструкции определять ее ожидаемый ресурс.

Для решения поставленной задачи была разработана статистическая модель, основанная на использовании бутстреп-моделирования. В отличие от моделирования псевдослучайных выборочных значений, статистическая бутстреп модель использует реальные значения составляющих ресурса отдельных элементов конструкции, которые были получены по результатам ресурсных испытаний. Из них случайным образом, формируются необходимые для статистического анализа выборки. Такой подход к моделированию выборок, по которым определяется ресурс детали, имеет ряд преимуществ по сравнению с классическими методами формирования псевдослучайных выборок, поскольку не требует определения вида и параметров законов распределения исследуемых параметров, а также позволяет использовать взаимосвязанные (векторные) параметры, которые определяют ресурс отдельного элемента конструкции.

Таким образом, использование статистического бутстреп моделирования позволило получить интервальную оценку гарантированного среднего ресурса полипропиленовой крыльчатки, а также рекомендовать минимальную величину зазора, которая обеспечит ресурс крыльчатки по деформации ползучести не меньше, чем нормативный ресурс доильной установки.

Ключевые слова: надежность, прогнозирование, ресурс, статистическое моделирование, плотность закона распределения, доверительный интервал.

Abstract

Forecasting the reliability of technical systems of agro-industrial production based on the results of statistical modeling

O.I. Alforov, V.B. Savchenko, M.R. Hrosu

In the offered article the problem of forecasting of indicators of reliability of the water ring vacuum pump which is a part of the unit of individual milking is considered. A feature of this pump is the use of an impeller, which is made of polypropylene. During operation, the blades of the impeller, which are under the influence of elevated temperature, are deformed by external loads. Given the tendency of polypropylene to creep, over time, the gap between the impeller blades and the pump housing gradually decreases until jamming. To a large extent, this process determines the amount of pump life.

In previous works, the issues of determining the parameters of the stress-strain state of the blades of a water ring vacuum pump were considered in detail, as well as an interval assessment of the durability of the

impeller. But, to predict the reliability of the pump as a whole, it is necessary to develop a mathematical model that would allow the design parameters to determine its expected life.

To solve this problem, a statistical model was developed, which is based on the use of bootstrap modeling. In contrast to the simulation of pseudo-random sample values, the statistical bootstrap model uses the real values of the resource components of individual structural elements, which were obtained by the results of resource tests. From them, randomly, the samples necessary for statistical analysis are formed. This approach to modeling samples, which determines the resource of the part, has a number of advantages over classical methods of forming pseudo-random samples, as it does not require determining the type and parameters of the distribution laws of the studied parameters, and allows the use of interconnected (vector) parameters, the resource of a single structural element.

Thus, the use of statistical bootstrap modeling allowed to obtain an interval estimate of the guaranteed average resource of polypropylene impeller, as well as to recommend a minimum gap that will provide the impeller resource for creep deformation not less than the normative resource of the milking parlor.

Keywords: *reliability, forecasting, resource, statistical model, compliance with the law of the dispute, prevailing interval.*

Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard

Alforov, O. I., Savchenko, V. B. and Hrosu, M. R. (2021) 'Forecasting the reliability of technical systems of agro-industrial production based on the results of statistical modeling', *Engineering of nature management*, (3(21), pp. 89 - 96.

Подано до редакції / Received: 25.04.2021