

УДК 621.81

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ МЕХАНІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПРИСКОРЕНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Гринченко О.С., к.т.н., проф., Алфьоров О.І., к.т.н., доцент
(Харківський національний технічний університет сільського
господарства імені Петра Василенка)

Викладено зміст і розглянуті особливості методу прискорених визначальних випробувань на надійність елементів машин в граничних комбінованих режимах. Вказано на можливості стандартизації методу в галузі сільськогосподарського машинобудування.

Вступ. Прискорення проведення визначальних випробувань на надійність машин і їх елементів потребує вирішення багатьох технічних і методичних проблем. Ключові з них полягають в необхідності задовільнити умові фізичної подібності відмов, виникаючих в реальній експлуатації і при випробуваннях, маючи при цьому можливість прискореного визначення шляхом прогнозування показників надійності, очікуємих від об'єкта в режимах його реального використання. У багатьох випадках можливо одночасно задовільнити цим умовам, використовуючи граничні комбіновані режими прискорених випробувань [1]. Нижче розглянуті варіанти реалізації такого підходу і можливості стандартизації методів визначення показників механічної надійності за результатами випробувань.

Основний зміст. Мобільна сільськогосподарська і транспортна техніка звичайно використовується в декількох режимах, які суттєво відрізняються за своєю пошкоджуючою дією на елементи. Маючи інформацію про основні механічно пошкоджуючі фактори і режими, які виникають в умовах реальної експлуатації, необхідно до проведення визначальних випробувань проаналізувати пошкоджуючу дію кожного з режимів використання об'єкта. Реальну сукупність (спектр) можливих експлуатаційних режимів треба поділити за пошкоджуючою дією на дві складові. Один або декілька екстремальних режимів, що призводять до найбільшої інтенсивності накопичення механічних пошкоджень об'єкта повинні бути віднесені до прискорюючого режиму при його випробуваннях. Решта спектру режимів утворює другу складову - доповнюючий режим випробувань. Граничний комбінований режим випробувань формується з цих двох складових, які відтворюються у певній пропорції.

Запланована для випробувань кількість зразків об'єкта поділяється на декілька груп (вибірок). Кожна група випробовується в певному комбінованому режимі, які відрізняються між собою часткою наробітку, що відпрацьовується об'єктом в прискорюючому режимі. Принцип прискорення випробувань

полягає в тому, що в граничних комбінованих режимах частка прискорюючого режиму завжди більша, ніж це є в умовах реальної експлуатації. Кожний зразок випробовується до виникнення механічної відмови або заданого граничного рівня пошкодження. Умова фізичної подібності відмов в певній мірі повинна виконуватись за рахунок того, що граничні комбіновані режими випробувань складаються тільки з тих режимів, які мають місце в реальній експлуатації. Разом з тим фізичну подібність процесів пошкодження треба постійно контролювати за основними параметрами, щоб не перебільшувати при випробуваннях допустиму величину частки прискорюючого режиму. При цьому слід також забезпечувати в процесі випробувань достатньо велику кількість почергових змін прискорюючого режиму на доповнюючий і навпаки.

Проведення випробувань за викладеною програмою дає можливість прискореного визначення або прогнозування показників механічної надійності. При цьому зручно використати відому лінійну гіпотезу накопичення механічних пошкоджень [1], яка широко застосовується при випробуваннях і розрахунках на втомну міцність. Математичний вираз, який відповідає цій гіпотезі, має вигляд:

$$\frac{\bar{t}_1}{T_1} + \frac{\bar{t}_2}{T_2} = 1, \quad (1)$$

де \bar{t}_1 - середня складова наробітку до відмови, відпрацьована в прискорюючому режимі; \bar{t}_2 - середня складова наробітку до відмови, відпрацьована в доповнюючому режимі; T_1 - середній наробіток до відмови при роботі об'єкта тільки в прискорюючому режимі; T_2 - середній наробіток до відмови об'єкта тільки в доповнюючому режимі.

Величини \bar{t}_1 і \bar{t}_2 характеризують надійність об'єкта при роботі в певному комбінованому режимі, а їхня сума дорівнює відповідній величині середнього наробітку до відмови. Існує [1] геометрична інтерпретація співвідношення (1), згідно з якою його слід розглядати, як лінійну регресійну залежність, з параметрами T_1 і T_2 , що можуть бути знайдені за результатами ресурсних випробувань, проведених в декількох комбінованих режимах. Кожний такий режим характеризується певною величиною частки α реалізації в ньому прискорюючого режиму.

Результатами випробувань в граничних комбінованих режимах є вибіркові середні складові наробітку до відмови: \bar{t}_{1i} - в прискорюючому режимі і \bar{t}_{2i} - в доповнюючому режимі, які відповідають заздалегідь заданим значенням частки α_i прискорюючої складової в комбінованому режимі. Прискорення випробувань забезпечується обов'язковим виконанням умов: $\alpha_i > \alpha^*$, де α^* - середня частка прискорюючого режиму в реальній експлуатації об'єкта.

Розглядаючи (1) в якості рівняння лінійної регресії, доцільно вважати таку регресію ортогональною [1]. Це потребує проведення розрахунків

середнього наробітку до відмови або середнього ресурсу в наступній послідовності:

- за результатами випробувань зразків об'єкта в комбінованих режимах визначають загальні середні складові наробітку до відмови в прискорюючому і доповнюючому режимах

$$\bar{t}_1 = \sum_{i=1}^k \omega_i \bar{t}_{1i}; \quad \bar{t}_2 = \sum_{i=1}^k \omega_i \bar{t}_{2i}, \quad (2)$$

де $\omega_i = \frac{n_i}{N}$ - "вагові" коефіцієнти;

$N = n_1 + n_2 + \dots + n_k$ - загальна кількість випробуваних зразків об'єкта;

$$S = \sum_{i=1}^k \omega_i \bar{t}_{1i} \bar{t}_{2i}$$

- розраховують величину суми S і порівнюють її з добутком $\bar{t}_1 \cdot \bar{t}_2$;

- якщо $S < \bar{t}_1 \cdot \bar{t}_2$, то визначають допоміжні коефіцієнти

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i (\bar{t}_{2i})^2 - \sum_{i=1}^k \omega_i (\bar{t}_{1i})^2 + (\bar{t}_1)^2 - (\bar{t}_2)^2}{2(\bar{t}_1 \cdot \bar{t}_2 - S)} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{1 + \chi^2} - \chi, \quad (4)$$

а потім прогнозують середній наробіток до відмови в умовах реальної експлуатації за допомогою виразу

$$T = \frac{\bar{t}_1 + \beta \bar{t}_2}{\beta + \alpha^* (1 - \beta)}, \quad (5)$$

- якщо $S \geq \bar{t}_1 \cdot \bar{t}_2$, то це означає, що проведені випробування не виявили пошкоджуючої дії доповнюючого режиму і тоді прогнозуемий середній наробіток до відмови визначають за формулою

$$T = \bar{t}_1 / \alpha^*. \quad (6)$$

Прогнозування гамма-відсоткових показників: гамма-відсоткового ресурсу або наробітку до відмови [2] можливо виконувати за допомогою загального виразу:

$$T_\gamma = T \cdot \theta(\gamma, V_t), \quad (7)$$

де $\theta(\gamma, V_t)$ - коефіцієнт, який залежить від імовірності безвідмовної роботи γ , очікуемого коефіцієнта варіації ресурсу V_t та виду розподілу ресурсу.

Для найбільш розповсюджених законів розподілу ресурсу величина $\theta(\gamma, V_t)$ обчислюється за формулами:

- нормальний розподіл

$$\theta_n = 1 - U_\gamma V_t, \quad (8)$$

де U_γ - квантіль нормального розподілу;

- логарифмічно нормальний розподіл

$$\theta_n = \left\{ \sqrt{1 + V_t^2} \exp \left[U_\gamma \sqrt{\ln(1 + V_t^2)} \right] \right\}^{-1}; \quad (9)$$

- розподіл Вейбулла

$$\theta_B = (\ln 1/\gamma)^{1/b} / \Gamma(1 + 1/b), \quad (10)$$

$$\text{де } b \approx \frac{1,126}{V_t} + \frac{0,011}{V_t^2} - 0,137$$

На практиці найбільш розповсюджений варіант, коли інженер не має вірогідних відомостей про очікуємиий вид розподілу до відмови або ресурсу в умовах експлуатації. Враховуючи можливість такої невизначеності, з точки зору забезпечення гарантованого від завищення прогнозування гамма-відсоткових показників, доцільно, використовуючи (7) визначати коефіцієнт $\theta(\gamma, V_t)$ таким, що задовільняє умові: $\theta(\gamma, V_t) = \min\{\theta_n, \theta_n, \theta_B\}$. Відповідні значення цього "мінімізованого" за трьома розподілами коефіцієнта наведені в таблиці 1 в залежності від коефіцієнта варіації V_t та імовірності безвідмовної роботи γ .

Таблиця 1. Мінімізований коефіцієнт θ

V_t	$\gamma, \%$				
	50	80	90	95	99
0,20	0,981	0,830	0,733	0,647	0,489
0,25	0,970	0,787	0,667	0,569	0,398
0,30	0,958	0,740	0,604	0,498	0,302
0,40	0,928	0,645	0,488	0,374	0,204
0,50	0,894	0,553	0,387	0,274	0,126
0,60	0,857	0,468	0,302	0,199	0,077
0,70	0,819	0,392	0,234	0,142	0,046
0,80	0,781	0,326	0,180	0,101	0,028
0,90	0,743	0,270	0,138	0,072	0,017
1,00	0,693	0,223	0,105	0,051	0,010

Найбільш вірогідну інформацію що до коефіцієнтів варіації V_t може дати

аналіз статистичних даних про ресурс конструктивно близького за призначенням і параметрами аналога-попередника, який експлуатувався досить довгий час в тих умовах використання, що і випробовується об'єкт. При необхідності орієнтовні відомості відносно величини коефіцієнтів V_i в залежності від типу елемента машини, виду пошкоджуючого процесу та інших чинників можливо отримати з [3, 4, 5, 6, 7].

Реалізацію розглянутого методу прогнозування показників довговічності за результатами прискорених випробувань покажемо на прикладі. Ресурс крильчатки водокільцевого вакуумного насосу агрегату індивідуального доїння визначається залишковою деформацією повзучості полімеру з якого вона виготовлена. Пошкоджуваність виникає внаслідок комплексної дії механічного навантаження та впливу температури робочої рідини на лопатки при усталеному рівні тиску в насосі. Але окрім усталеного експлуатаційного режиму роботи, крильчатка насоса деякий період (приблизно 2%) працює в екстремальному режимі під час налаштування насоса, запуску, та ін. Отже в експлуатації має місце двоступенева схема режиму роботи крильчатки, керуючись якою були сплановані та проведені прискорені випробування в комбінованих режимах для визначення середнього і гамма-відсоткового ресурсів крильчатки. Випробування проводились до досягнення граничного стану, коли залишкова деформація лопатки перевищувала мінімальний зазор між крильчаткою та корпусом насоса.

Проведено чотири серії випробувань лопаток крильчаток з різною часткою часу випробувань в екстремальному (прискорюючому) режимі. Отримані результати наведені в таблиці 2.

Визначення значень загальних середніх складових ресурсу, які відпрацьовані в прискорюючому \bar{t}_1 та доповнюючому \bar{t}_2 режимах виконується за формулами (2):

$$\bar{t}_1 = 0,158 \cdot 154 + 0,210 \cdot 153 + 0,316 \cdot 141 + 0,316 \cdot 147 = 147 \text{ год.},$$

$$\bar{t}_2 = 0,210 \cdot 173 + 0,316 \cdot 419 + 0,316 \cdot 520 = 333 \text{ год.}$$

Таблиця 2.

Кількість лопаток n_i	Вагові коефіцієнти ω_i	Частка роботи в прискорюючому режимі α_i	Наробіток до граничного стану, год.	
			Прискорюючий режим \bar{t}_1	Доповнюючий режим \bar{t}_2
3	0,158	1	154	0
4	0,210	0,47	153	173
6	0,316	0,25	141	419
6	0,316	0,22	147	520

Далі обчислюються сума $S = 48382$ і добуток $\bar{t}_1 \cdot \bar{t}_2 = 48951$. Виконується

умова $\bar{t}_1 \cdot \bar{t}_2 > S$, яка означає, що доповнюючий режим випробувань був пошкоджуючим для крильчатки. Тому, після розрахунку сум квадратів $\sum_{i=1}^4 \omega_i (\bar{t}_{1i})^2 = 21773$ і $\sum_{i=1}^4 \omega_i (\bar{t}_{2i})^2 = 147208$, за формулами (3) і (4) визначаються допоміжні коефіцієнти

$$\chi = \frac{147208 - 21773 + 147^2 - 333^2}{2(48951 - 48382)} = 31,77;$$

$$\beta = \sqrt{1 + 31,77^2} - 31,77 = 0,015734.$$

Враховуючи, що частка роботи насосу в прискорюючому режимі в реальних умовах використання складає близько 2% (тобто $\alpha^* = 0,02$), за допомогою (5) обчислюється прогнозоване значення середнього ресурсу крильчатки

$$T = \frac{147 + 0,015734 \cdot 333}{0,015734 + 0,02(1 - 0,015734)} = 4298 \text{ год.}$$

За відомостями про процес пошкодження можливо прийняти коефіцієнт варіації $V_t = 0,2$. Тоді, згідно з даними таблиці 1, розраховуються прогнозовані величини гамма-відсоткового ресурсу крильчатки для $\gamma = 80$ і 99%, відповідно:

$$T_{80} = 4298 \cdot 0,83 = 3567 \text{ год.}; T_{99} = 4298 \cdot 0,489 = 2102 \text{ год.}$$

Таким чином, з результатів проведених випробувань виходить, що гарантований з великою імовірністю (99%) ресурс крильчатки повинен перевищувати 2 тис. годин роботи доїльного агрегату. При цьому середня тривалість випробувань складала 480 годин.

Висновки. Метод проведення прискорених визначальних випробувань елементів машин на надійність в граничних комбінованих режимах має універсальний характер. Він дозволяє при прогнозуванні показників довговічності за результатами випробувань застосовувати чіткий статистичний алгоритм, який на відміну від стандарту [8], не передбачає використання заздалегідь відомих коефіцієнтів прискорення випробувань. Це робить його перспективним з точки зору доповнення і удосконалення системи галузевих стандартів з надійності сільськогосподарської техніки, яку необхідно мати при проведенні сертифікаційних випробувань.

Список літератури:

1. Гринченко А.С. Механическая надежность мобильных машин: Оценка, моделирование, контроль - Х.: Віровець А.П. "Апостроф", 2012. - 259 с.
2. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. - 88 с.
3. Надежность машин/ Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев - М.: Высш. шк., 1988. - 238 с.
4. Кугель Р.В. Надежность машин массового производства. - М.: Машиностроение, 1981. - 244 с.
5. Кугель Р.В. Испытания на надежность машин и их элементов. - М.: Машиностроение, 1982. - 181 с.
6. Сковородин В.Я., Тишкин Л.В. Справочная книга по надежности сельскохозяйственной техники. - Л.: Лениздат, 1985. - 204 с.
7. Канарчук В.Є., Полянський С.К., Дмирієв М.М. Надійність машин. - К.: Либідь, 2003. - 424 с.
8. СОУ 74.3-37-135:2004. Випробування сільськогосподарської техніки. Машини сільськогосподарські. Прискорені випробування на надійність. - Київ.: Мінагрополітики України, 2004. - 47 с.

Аннотация

Прогнозирование показателей механической надежности по результатам ускоренных испытаний

Гринченко А.С., Алферов А.И.

Изложено содержание и рассмотрены особенности метода ускоренных определительных испытаний на надежность элементов машин в граничных комбинированных режимах. Указано на возможности стандартизации метода в отрасли сельскохозяйственного машиностроения.

Abstract

Prognostication of indexes mechanical to reliability on results speed-up tests

Grinchenko A.S., Alferov A.I.

Maintenance is expounded and the features of method of speed-up on-determinative reliability tests are considered elements of machines in the border combined modes. Standardizations of method are indicated on possibilities in industry of agricultural engineer.