

II. ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

УДК 621.775

DOI: 10.37128/2520-6168-2019-3-5

АНАЛІЗ І ВИБІР МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ

Анісімов Віктор Федорович, д.т.н., професор
Музичук Василь Іванович, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет

V. Anisimov, Doktor of Technical Sciences, Full Professor
V. Muzychuk, PhD, Associate Professor
Vinnitsia National Agrarian University

Дослідження надійності двигуна в цілому можна представити як дослідження імовірнісних характеристик його надійності за заданими імовірнісними характеристиками надійності окремих елементів двигуна, тобто систем і механізмів.

В статті обґрунтовано, що метод подібності і теорії розмірності дозволяє встановлювати закономірності зміни швидкості зношування t_{ga} залежно від регулювання параметрів двигуна, при цьому вимагається проведення чисельних дослідів, що робить його мало практичним у визначенні ресурсу і прогнозування роботи автотракторних двигунів.

Найбільше практично-прийнятним методом для визначення залишкового ресурсу автотракторних двигунів є метод математичної статистики і теорії вірогідності, і, в особливості, закон нормального розподілу. Проте, для визначення ресурсу двигунів, при використанні цього закону, необхідно також проведення великого обсягу випробувань.

Таким чином, на сучасному етапі науково-технічного прогресу в автотракторобудуванні необхідно знаходити інші методи, найбільш практично прийнятні і сприяючі в коротший час, без великого обсягу випробувань визначати ресурс машин з максимальною довговічністю, які будуть розроблено в подальших роботах авторів статті.

Ключові слова: двигун, механізми, системи, відмова, методи.

Табл. 1. Рис. 9. Літ. 12.

1. Постановка проблеми

Відомо, що безвідмовність двигунів є функцією безвідмовності його механізмів і систем. Тому згідно теорії надійності двигун можна розглядати як систему, що полягає з послідовно сполучених елементів, резервування, тобто відмова будь-якого з елементів призводить до відмови усієї системи.

Нині в автомобільній промисловості досягнуті досить високі ресурси механізмів і систем двигунів.

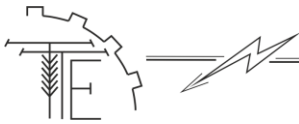
У зв'язку з цим черговим завданням слід вважати зниження розкидів ресурсів механізмів і систем двигуна, а також двигуна в цілому.

Дослідження надійності двигуна в цілому можна представити як дослідження імовірнісних характеристик надійності двигуна за заданими імовірнісними характеристиками надійності окремих його елементів, тобто систем і механізмів.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз матеріалів випробувань [1, 2, 3, 4, 5 та ін.] показує, що в основному відмови деталей, систем і механізмів, лімітуючі надійність двигуна, можуть бути розподілені за нормальним законом, законом Вейбулла (понад 60%) і експоненціальному закону. Використання вказаних законів розподілу при випробуваннях на надійність, цілком правомірно, оскільки вони охоплюють усі характерні види руйнувань.

Відмови, що з'являються в результаті процесу зносу (поступові), розподіляються за нормальним законом, коефіцієнт варіації якого лежить в межах $0 < v \leq 0,33$.



Відмови, що з'являються в результаті дії на конструкцію граничних значень різних навантажень (як правило, є полонками і носять раптовий характер), розподіляються за експоненціальним законом, коефіцієнт якого лежить в межах $0,80 \leq v \leq 1,0$.

Між двома крайніми розподілами вірогідності знаходиться проміжний розподіл – згідно із законом Вейбулла. Тут правомірна поява як поступових, такі раптових відмов. Тому коефіцієнт варіації в цьому випадку може знаходитися в межах $0,28 \leq v \leq 1,0$.

Перехід від нормального закону розподілу до експоненціального відбувається через розподіл згідно із законом Вейбулла. При цьому коефіцієнт варіації проходить усі значення.

Технічне діагностування, або комплекс заходів з оцінки стану машин без їх розбирання відповідно до ДСТУ 22631-77 є складовою частиною технічного обслуговування і ремонту машин та повинно забезпечувати їх проведення по фактичному технічному стану.

Визначення стану конкретної машини і прогноз подальших змін її параметрів складає задачу діагностування.

У тракторах, автомобілях, комбайнах та інших мобільних машинах сільськогосподарського призначення найбільш складним є діагностування енергетичної установки-двигуна. Близько половини всіх відмов мобільних машин припадає на двигун.

Прогнозування залишкового ресурсу роботи дизелів можна проводити на основі застосування методу подібності та теорії розмірностей або методів математичної статистики і теорії ймовірностей. Однак, досвід показав, що для визначення залишкового ресурсу автотракторних дизелів, при використанні зазначених методів, необхідно проведення великого обсягу випробувань. У той же час, прискорення науково-технічного прогресу ставить перед дослідниками завдання більш жорсткі - за короткий термін отримати доствірні та надійні результати оцінки параметрів технічного стану дизелів і прогнозуванню залишкового ресурсу.

Вирішення цієї проблеми можна досягти за рахунок об'єднання двох теорій: теорії малих відхилень і теорії розпізнавання образів, тобто розпізнавання технічного стану машини по малих відхилень параметрів.

В цілому проблема носить комплексний характер і включає визначення оптимальних структурних і діагностичних параметрів систем та механізм дизеля, багатofакторність зв'язків параметрів з урахуванням різноманіття конструктивних та експлуатаційних факторів.

3. Мета дослідження

Дослідити методи і закони, які використовуються при визначенні ресурсу і прогнозування роботи автотракторних двигунів внутрішнього згорання.

4. Основні результати дослідження

Застосування основних положень подібності та теорії розмірностей для обробки і аналізу дослідних даних по зносу автотракторних двигунів дозволяє встановлювати закономірності виміру швидкості зношування tga залежно від регульованих параметрів двигуна.

Між швидкістю зношування і регульовальними параметрами двигуна існує функціональна залежність [1],

$$\frac{tga}{tga_H} = f(N_e, \varphi_{\Pi}, P_{впр}, \varphi_{\Pi H}, P_{впр.н}), \quad (1)$$

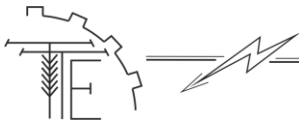
яка згідно 2-теоремі [1] може бути представлена як залежність між безрозмірними комплексами.

Застосовуючи метод нульових розмірностей [1], знайдемо, що безрозмірна швидкість зношування $2 = tga/tga_H$ розглянутому випадку є функцією наступних критеріїв:

$$\frac{tga}{tga_H} = f\left[\frac{N_e}{N_{eH}}, \frac{\varphi_{\Pi}}{\varphi_{\Pi H}}, \frac{P_{впр}}{P_{впр.н}}\right]. \quad (2)$$

Вводять позначення критерію $\Pi_1 = N_e/N_{eH}$, $\Pi_2 = \varphi_{\Pi}/\varphi_{\Pi H}$, $\Pi_3 = P_{впр}/P_{впр.н}$, Π

$= \frac{tga}{tga_H}$, отримуємо:



$$\Pi = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3). \quad (3)$$

Спочатку визначається вплив критеріїв Π_1 і Π_2 на безрозмірну швидкість зношування Π при $\Pi_3 = 1$. Для цього безрозмірні залежності $\Pi = f(\Pi_1)$ при різних значеннях симплекса Π_2 будуються в логарифмічних координатах ($\lg \Pi_1, 0, \lg \Pi_2$).

Обробка ведеться за способом найменших квадратів.

Аналіз показує, що вплив критеріїв Π_1 і Π_2 на відносну швидкість зношування Π вельми складний і, що для визначення даних критеріїв вимагається проведення численних дослідів. У зв'язку з чим, даний метод в практиці, для визначення ресурсу і прогнозування довговічності та надійності роботи автотракторних двигунів, широкого застосування не отримав.

Дослідження зносу і довговічності деталей сполучень автотракторних двигунів можна проводити на основі застосування методів математичної статистики і теорії ймовірностей з використанням теорії кореляції [1].

Теорія кореляції дає можливість встановити закономірність зв'язку між зносом і напрацюванням, незважаючи на те, що цей зв'язок ми досліджуємо на такому експериментальному матеріалі, де інші фактори своєї мінливістю спотворюють досліджувану залежність. При цьому вирішуємо дві основні задачі.

1. Визначаємо тісноту зв'язків між досліджуваними величинами (кореляційний аналіз), яка характеризує ступінь впливу напрацювання на знос в даних умовах експлуатації.

2. Встановлюємо форму зв'язків між досліджуваними величинами (регресійний аналіз), тобто визначаємо вид функції $\bar{Y}_x = f(x)$ або $\bar{X}_y = \varphi(y)$, де \bar{Y}_x – середнє значення зносу при даному напрацюванню і \bar{X}_y – середнє значення напрацювання при даному зносу.

Вирішення цих двох завдань дає можливість встановити динаміку процесу зношування і статистичні параметри довговічності.

Основним завданням теорії надійності є прогнозування (передбачення з тією чи іншою ймовірністю) різних показників безвідмовної роботи, довговічності, терміну служби і т.д. Вона пов'язана із знаходженням ймовірностей.

Для дослідження складних процесів ймовірного характеру останнім часом стали застосовувати метод Монте-Карло. Метод Монте-Карло, так званий методом статистичного моделювання або статистично випробувань, являє собою чисельний метод рішення складних завдань. Він заснований на використанні випадкових чисел, моделюючих ймовірнісні процеси. Результати рішення методу дозволяють встановити емпіричні залежності досліджуваних процесів. Математичною основою методу є закон великих чисел, розроблений П.Л. Чебишевим, який формулюється так: при великому числі статистичних випробувань ймовірність того, що середнє арифметичне значення випадкової величини наближається до математичного сподівання, дорівнює

$$\lim P \left\{ \left| \frac{\sum x_i}{n} - m(x) \right| < \varepsilon \right\} \rightarrow 1, \quad (4)$$

де ε - будь-яке мале позитивне число.

При нормальному законі розподілу оцінити точність результатів, отриманих методом Монте-Карло, можна за формулою

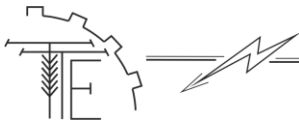
$$P |\bar{x} - m(x)| < \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Рішення задач методом Монте-Карло ефективно лише із використанням швидкодіючих ЕОМ.

У теорії ймовірностей зустрічаються наступні закони розподілу випадкових величин: закон нормального розподілу, експонентний, Релея, Вейбулла, Гамма-розподілу, Пуассона, біноміальні та ін.

Закон нормального розподілу має виключно важливе значення і займає серед інших законів особливе положення, як найбільш часто зустрічається на практиці (особливо в техніці). Головна особливість, що виділяє закон нормального розподілу серед інших законів, полягає в тому, що він являється граничним законом, до якого наближаються інші закони розподілу що часто зустрічаються в типових умовах.

Нормальний закон застосуємо до елементів і агрегатів, підлягаючих випробуванню на зношування до повної відмови всіх елементів або більшості з них. Основними характеристиками



данного закону є безвідмовність, ймовірність відмов, плітність ймовірності часу відмови елемента або агрегату.

Функція нормального закону розподілу наробітку до відмови записується як

$$F(t) = P[T \leq t] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t_i - \bar{T})^2}{2\sigma^2}} \cdot dt, \quad (6)$$

де T - випадкова величина (ресурс), година;

t_i - деяке її значення (час відмови елемента), година;

\bar{T} - середнє арифметичне значення випадкової величини (середній ресурс), година;

σ - середнє квадратичне відхилення випадкової величини.

На рис. 1. зображений графік інтегральної функції розподілу безперервної випадкової величини.

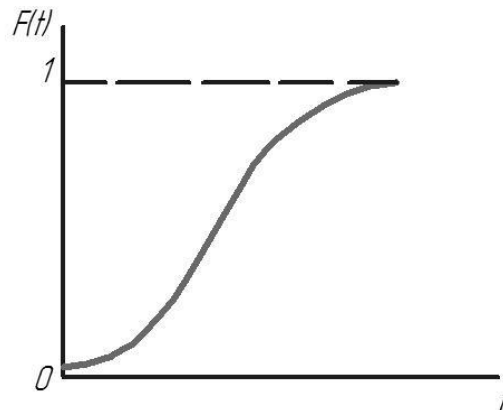


Рис. 1. Графік інтегральної функції розподілу неперервної випадкової величини

Для випадкової величини T , розподіленому по нормальному закону з математичним очікуванням \bar{T} і середнім квадратичним відхиленням σ , маємо

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t_i - \bar{T}}{\sigma}\right). \quad (7)$$

Щільність ймовірності закону нормального розподілу має колообразивну форму, симетричну відносно середнього значення і визначається за формулою:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_i - \bar{T})^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma} \varphi\left(\frac{t_i - \bar{T}}{\sigma}\right). \quad (8)$$

Ймовірність безвідмовної роботи або ймовірність того, що невідновлювальна система буде виконувати необхідну функцію в заданий момент часу t , можна записати у вигляді

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_i - \bar{T})^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t_i - \bar{T})^2}{2\sigma^2}} \cdot dt, \quad (9)$$

який графічно показаний на рис. 2.

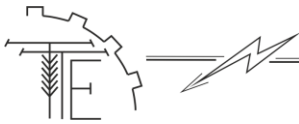
Якщо випадкова величина T (напрацювання до відмови) має щільність розподілу $f(t)$, то

$$1 - F(t) = P(t). \quad (10)$$

У разі нормального розподілу інтенсивність відмов є монотонно зростаючою функцією часу (рис. 3) і визначається за формулою:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\varphi\left(\frac{t_i - \bar{T}}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{\bar{T} - t_i}{\sigma}\right)}. \quad (11)$$

На довговічність елементів і двигуна в цілому впливає тривалість їх експлуатації. При виборі параметрів ступінь впливу тривалості експлуатації враховується законом безвідмовності, заснованим



на розподілі Вейбулла. Розподіл Вейбулла застосовується для вивчення довговічності механічних пристроїв, що пропрацювали певний період часу. Цей закон розподілу дозволяє шляхом підбору параметрів β (параметр форми) і ν (параметр масштабу) апроксимувати статистичні дані про відмови з урахуванням ступеня впливу часу експлуатації елемента або агрегату.

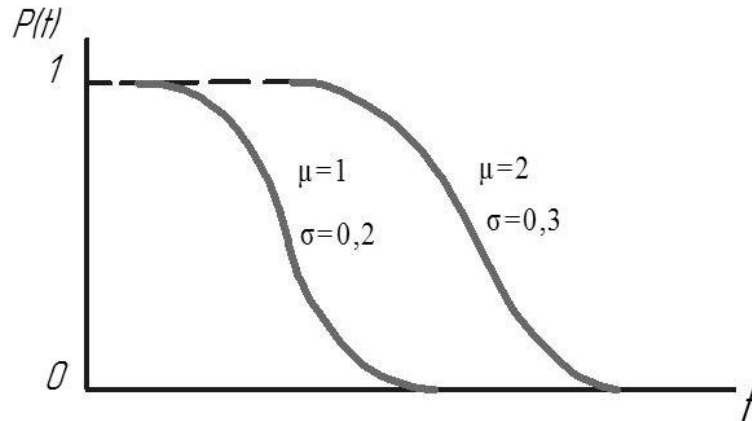


Рис. 2. Ймовірність безвідмовної роботи при нормальному розподілі напрацювання до відмови

При параметрі $\beta = 1$ цей закон переходить в експоненціальний закон розподілу, а при $\beta > 1$ він наближається до закону нормального розподілу. Основні характеристики закону розподілу Вейбулла знесені в табл. 1. і показані на рисунках 3, 4, 5, 6.

Таблиця 1

Основні характеристики закону розподілу Вейбулла

Розподіл	Функція розподілу $F(t)$	Щільність розподілу $f(t)$	Вірогідність безвідмовної роботи $P(t)$	Інтенсивність відмов $\lambda(t)$
Нормальний	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t_i-\bar{T})^2}{2\sigma^2}} \cdot dt = \Phi\left(\frac{t_i-\bar{T}}{\sigma}\right)$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_i-\bar{T})^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma} \varphi\left(\frac{t_i-\bar{T}}{\sigma}\right)$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t_i-\bar{T})^2}{2\sigma^2}} \cdot dt = \Phi\left(\frac{\bar{T}-t_i}{\sigma}\right)$	$\frac{f(t)}{P(t)} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\varphi\left(\frac{t_i-\bar{T}}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{\bar{T}-t_i}{\sigma}\right)}$
Вейбулла	$1 - e^{-\left(\frac{t_i}{\nu}\right)^\beta}$	$\frac{\beta}{\nu} \left(\frac{t_i}{\nu}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\nu}\right)^\beta}$	$e^{-\left(\frac{t_i}{\nu}\right)^\beta}$	$\frac{\beta}{\nu} \left(\frac{t_i}{\nu}\right)^{\beta-1}$
Експоненціальний	$1 - e^{-\psi t}$	$\psi e^{-\psi t}$	$e^{-\psi t}$	$\frac{1}{T} = \psi$

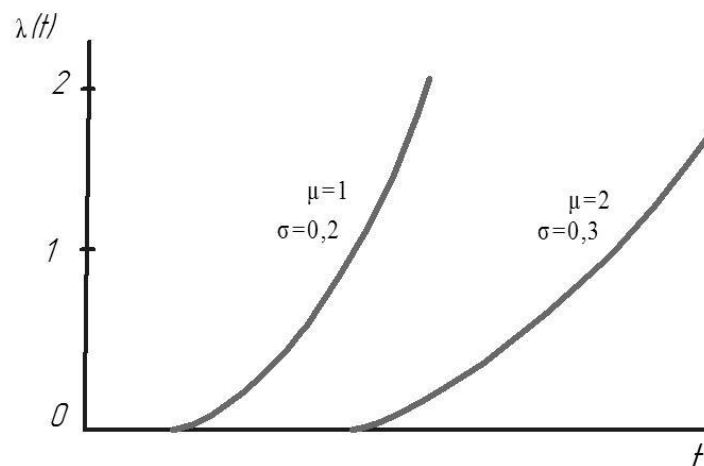


Рис. 3. Інтенсивність відмов при нормальному розподіленні напрацювання до відмови

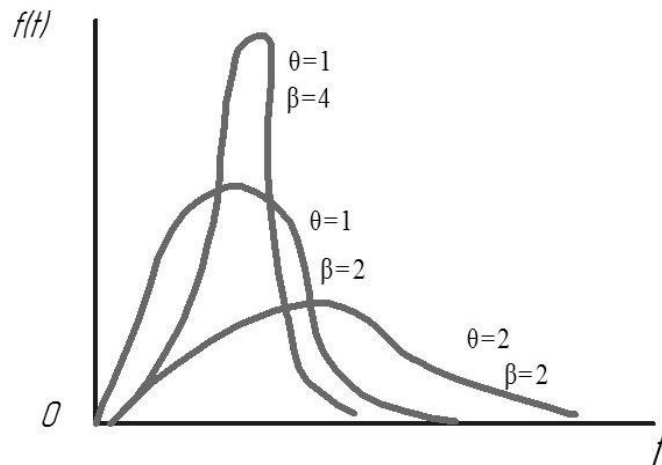
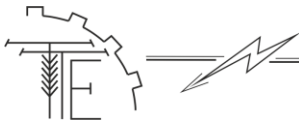


Рис. 4. Щільність розподілу наробітку до відмови за законом Вейбулла

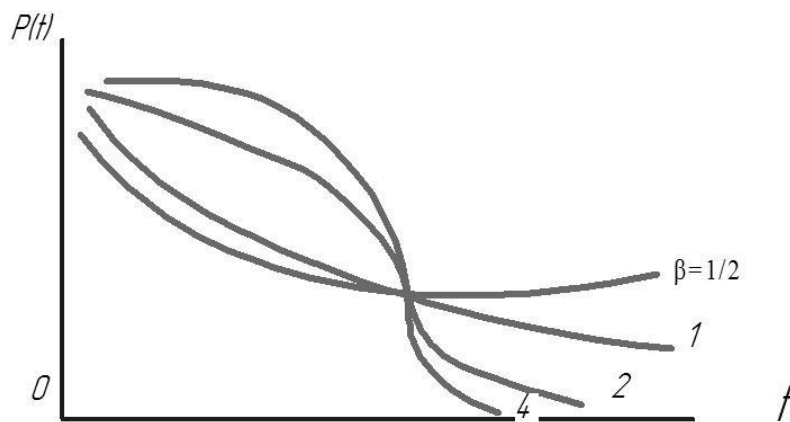


Рис. 5. Ймовірність безвідмовної роботи при розподілі напрацювання на відмову за законом Вейбулла

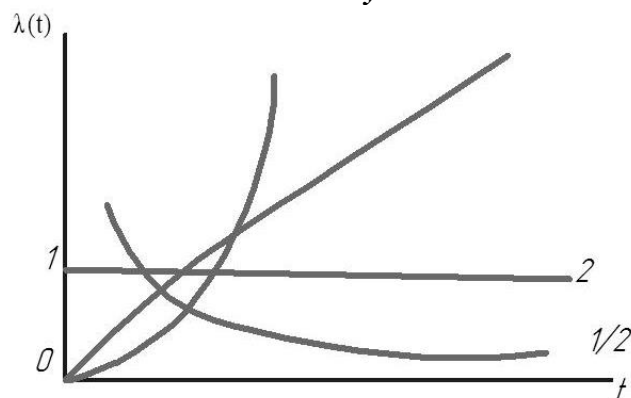
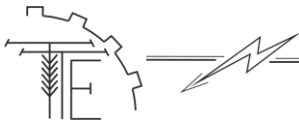


Рис. 6. Інтенсивність відмов при розподілі напрацювання до відмови за законом Вейбулла

Експоненціальний закон розподілу часу безвідмовної роботи застосуємо до механізмів, які пройшли попереднє припрацювання. Цей вид розподілу використовується також при аналізі раптових відмов.

Для експоненціального закону відношення середнього значення часу безвідмовної роботи математичного очікування до середнього квадратичного відхилення буде $\frac{\bar{T}}{\sigma} = 1$.

Якщо інтенсивність відмов являє собою лінійну функцію часу, що проходить через початок координат (рис. 6) крива 2, то розподіл ймовірності надійної роботи безвідмовності можна виразити за законом Релея у вигляді:



$$P(t) = e^{-\varphi(t)t} = e^{-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (12)$$

де $\varphi(t) = \frac{t^2}{2\sigma_0^2}$ - параметр закону.

Щільність ймовірності часу відмови елемента визначається по рівнянню

$$f(t) = \frac{t}{\sigma_0^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}}. \quad (13)$$

При аналізі багатьох випадкових дискретних процесів користуються розподілом Пуассона. Ймовірність появи числа подій $X=1,2,3 \dots$, в одиницю часу виражається законом Пуассона (рис. 7.) і виражається

$$P(x) = \frac{m^x}{x!} e^{-m} = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t}, \quad (14)$$

де x - число подій за даний відрізок часу; λ - щільність, тобто середнє число подій за одиницю часу; λt - Середнє число подій за час t , $\lambda t = m$.

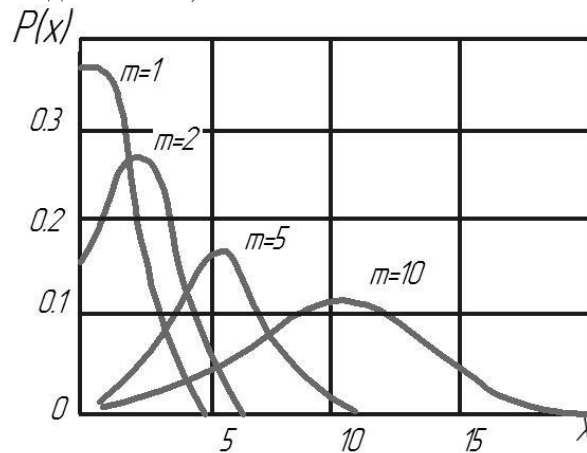


Рис. 7. Загальний вигляд кривої розподілу Пуассона

Розподіл Пуассона відносять до рідкісних подій, тобто $P(x)$ - ймовірність того, що подія в період якогось випробування станеться x разів при дуже великому числі вимірів m . Для закону Пуассона дисперсія дорівнює математичному очікуванню числа настання події за час t , тобто $\sigma^2 = m$.

Досліджуючи процеси, пов'язані з поступовим зниженням параметрів (погіршення властивостей матеріалів у часі, деградація конструкцій, процеси старіння, зносів відмови в машинах та ін), застосовують закон гамма-розподілу (рис., 8, 9, 10.). Для цього закону розподілу маємо

$$F(t) = \int_0^t \frac{\lambda \eta}{\Gamma(\eta)} \tau^{\eta-1} e^{-\lambda \tau} d\tau, \quad (15)$$

де η - параметр форми; λ - параметр масштабу.

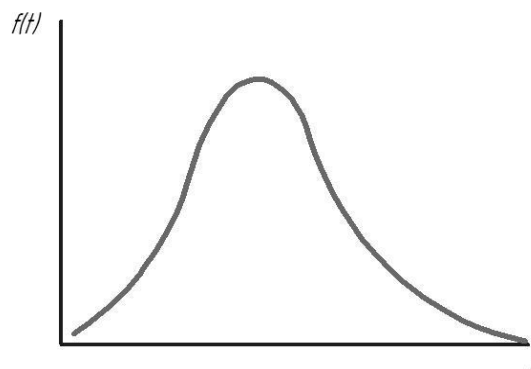


Рис. 8. Загальний вид кривої розподілення

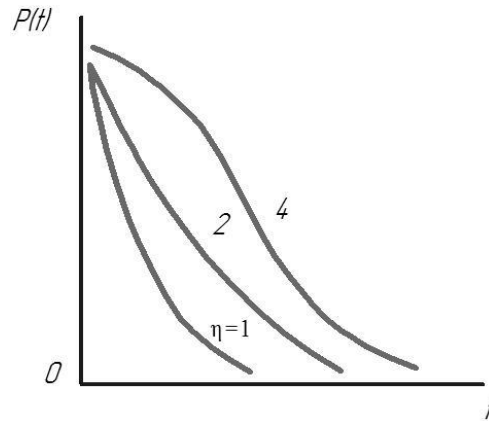
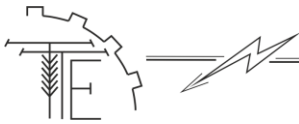


Рис. 9. Ймовірність безвідмовної роботи при гамма-розподіленні напрацювання до відмови, ($\lambda=1$).

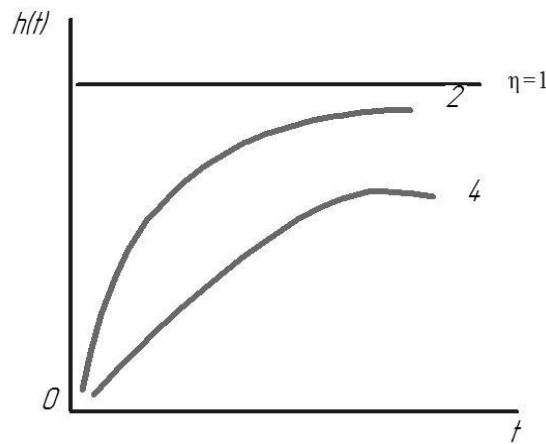


Рис. 10. Інтенсивність відмов при гамма-розподіленні напрацювання до відмови, ($\lambda=1$).

Якщо η ціле число, то шляхом послідовного інтегрування по частинах можна показати, що

$$F(t) = \sum_{k=\eta}^{\infty} \frac{(\lambda t)^k \exp(-\lambda t)}{k!}; \quad (16)$$

$$P(t) = 1 - F(t) = \sum_{K=0}^{\eta-1} \frac{(\lambda t)^K \exp(-\lambda t)}{K!}; \quad (17)$$

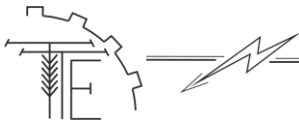
$$h(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} t^{\eta-1} e^{-\lambda t}}{\sum_{K=0}^{\eta-1} \frac{(\lambda t)^K \exp(-\lambda t)}{K!}}; \quad (18)$$

$$f(t) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} t^{\eta-1} e^{-\lambda t} \quad (19)$$

Гамма-розподіл може також використовуватися для описання часу до n -го відмови системи, якщо вихідне розподілу напрацювання до відмови є експоненціальним. Це означає, що якщо випадкова величина X_i має експоненційний розподілення з параметром $\theta = 1/\lambda$, то випадкова величина $t=x_1 + x_2 + \dots + x_n$ має гамма-розподіл з параметрами λ і η .

Складною з практичної точки зору проблемою є вибір закону розподілу наробітку до відмови. Без великого обсягу результатів випробувань важко визначити, яке саме розподілення підійде найкраще для даного конкретного випадку. Проаналізовані закони розподілу зазвичай забезпечують хорошу відповідність експериментальним даним в середній частині області випадкових величин, однак вони відрізняються один від одного в області великих відхилень. Метод розпізнавання образів - якісно новий спосіб діагностування дизелів [11].

Аналіз законів розподілу показав, що для діагностування і прогнозування залишкового ресурсу автотракторних дизелів, при використанні будь-якого з них, необхідно проведення великого обсягу випробувань. В той же час метод малих відхилень дозволяє, при визначенні багатofакторності



зв'язків параметрів, помітно скоротити обсяг обчислювальної роботи, забезпечуючи достатньо високу точність результатів [12].

Реальною можливістю оптимізувати рішення завдання діагностування технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу дизеля є використання спільно теорії розпізнавання образів і теорії малих відхилень. Теорія розпізнавання образів являє собою спробу систематичного вивчення однієї з класичних проблем прикладної математики: як можна, опираючись на деяку обмежену, неповну, імовірнісну інформацію про об'єкт, систему або процес, сформувати уявлення про їх внутрішню структуру, встановити, чи мають вони певним набором властивостей, отримати прогнозування їх поведінки і т.д.

5. Висновки

1. Метод подібності і теорії розмірності дозволяє встановлювати закономірності зміни швидкості зношування τ_{α} залежно від регулювання параметрів двигуна, при цьому вимагається проведення чисельних дослідів, що робить його мало практичним у визначенні ресурсу і прогнозування роботи автотракторних двигунів.

2. Найбільше практично-прийнятним методом для визначення залишкового ресурсу автотракторних двигунів є метод математичної статистики і теорії вірогідності, і, в особливості, закон нормального розподілу. Проте, для визначення ресурсу двигунів, при використанні цього закону, необхідно також проведення великого об'єму випробувань.

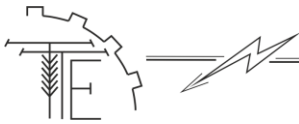
3. Таким чином, на сучасному етапі науково-технічного прогресу в автотракторобудуванні необхідно знаходити інші методи, найбільш практично прийнятні і сприяючі в коротший час, без великого об'єму випробувань визначати ресурс машин з максимальною довговічністю, які будуть опубліковано в наступному номері журналу.

Список використаних джерел

1. Дановський Н. С., Миколаєнко А. В. Надійність і довговічність автотракторних двигунів. Л.: Колос, 1994. 223 с.
2. Алабухов П. М., Героніmus В. Б., Минкевич Л. М., Шеховцев Б. А. Теорія подібності і розмірностей. М.: Вища школа, 1998. 206 с.
3. Брлоу Р., Прошан Ф. Математична теорія надійності. М.: Радянське радіо, 1995. 488 с.
4. Гнеденко Б. В., Беляєв Ю. К., Соловйов А. Д. Математичні методи в теорії надійності. М.: Наука, 1985. 452 с.
5. Лукомський Я. І. Теорія кореляції і її застосування до аналізу виготовлення. М.: Госстиздат, 1991. 120 с.
6. Капур Д., Ламберсон Л. Надійність і проектування систем. М.: Світ, 1980. 604 с.
7. Григор'єв М. А., Пономарев Н. Н., Карпенко В. В. Методика оцінки ресурсу двигуна залежно від ресурсів його деталей. М.: Автомобільна промисловість, №10, 1979. С.4–6.
8. Мишин І. А. Довговічність двигунів. Л.: Машинобудування, 1986. 288 с.
9. Музичук В. І., Анісімов В. Ф. Організація робіт підприємств технічного обслуговування: навчальний посібник. Вінниця: ФОП Рогальська І.О., 2012. 240 с.
10. Музичук В. І., Нахайчук О. В., Комаха В. П. Визначення змісту і об'єму робіт при технічному сервісі. *Зб. наук. пр. ВНАУ. Серія: Технічні науки*. Вінниця: ВНАУ, 2012. Вип. 11(65). С. 242–247.
11. Галушак О. О., Рябошапка В. Б., Комаха В. П. Рекомендації щодо використання суміші дизельного та біодизельного палив з динамічним регулюванням її відсоткового складу в якості палива для дизеля. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2018. № 2(101). С. 67–72.
12. Комаха В. П., Рябошапка В. Б. Дослідження взаємозв'язку ефективних показників двигуна та тягових характеристик трактора з використанням біодизельного палива на основі тягово-потужнісного балансу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2016. № 3(95). С. 193–198.

References

- [1] Danovskyj, N. (1994). *Nadijnist i dovgovichnist avtotraktornyx dvyguniv [Reliability and durability of power motor engines]*. L.: Kolos [in Ukrainian].
- [2] Alabuxov, P., Geronimus, V., Mynkevych, L., Shexovcev, B. (1998). *Teoriya podibnosti i rozmirnostej [Theory of similarities and dimensions]*. M.: Vyshha shkola. [in Russian].



- [3] Brlou, R. (1995). *Matematychna teoriya nadijnosti [Mathematical theory of reliability]*. M.: Radyanske radio. [in Russian].
- [4] Gnedenko, B., Belyayev, Y., Solovjov, A. (1985). *Matematychni metodyv teorii nadijnosti [Mathematical methods in the theory of reliability]*. M.: Nauka. [in Russian].
- [5] Lukomskij, Y. (1991). *Teoriya korelyaciyi i yiyi zastosuvannya do analizu analysis*. M.: Gossty`zdat [in Russian].
- [6] Kapur, D., Lamberson L. (1980). *Nadijnist i proektuvannya system [Reliability and system design]*. M.: Svit [in Russian].
- [7] Grygoryev, M., Ponomarev, N., Karpenko, V. (1979). *Metodyka ocinky resursu dvyguna zalezno vid resursiv jogo detalej [Method of estimation of engine resource depending on the resources of its parts]*. M.: *Avtomobilna promyslovist*, 10, 4–6 [in Russian].
- [8] Myshyn, I. (1986). *Dovgovichnist dvyguniv [Durability of engines]*. L.: Mashynobuduvannya [in Ukrainian].
- [9] Muzychuk, V., Anisimov, V. (2012). *Orhanizatsiya robit pidpryemstv tekhnichnoho obsluhovuvannya [Organization of works for maintenance companies]*. Vinnytsia: FOP Rokhalska I. [in Ukrainian].
- [10] Muzychuk, V., Nakhaychuk, O., Komakha, V. (2012) *Vyznachennya zmistu i obyemu robit pry tekhnichnomu servisi [Determination of the content and volume of work in the technical service]*. *Zb. nauk. pr. VNAU. Seriya: Tekhnichni nauky - Sb. sciences VNU pr. Series: Engineering*, 11(65), 242–247. [in Ukrainian].
- [11] Galushchak, O. O., Ryaboshapka, V. B., Komakha, V. P. (2018). *Rekomendatsiyi shchodo vykorystannya sumishi dyzel'noho ta biodyzel'noho palyv z dynamichnym rehulyuvannyam yiyi vidsotkovoho skladu v yakosti palyva dlya dyzelya [Recommendations on the use of a mixture of diesel and biodiesel fuels with the dynamic regulation of its percentage composition as a fuel for diesel]*. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 2(101), 67–72. [in Ukrainian].
- [12] Komakha, V. P., Ryaboshapka, V. B. (2016). *Doslidzhennya vzayemozv'yazku efektyvnykh pokaznykiv dvyhuna ta tyahovykh kharakterystyk traktora z vykorystannyam biodyzel'noho palyva na osnovi tyahovo-potuzhnisnoho balansu [Researches of the relationship between effective engine performance and tractor traction using biodiesel based on traction-power balance]*. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 3(95), 193–198. [in Ukrainian].

АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Исследование надежности двигателя в целом можно представить как исследования вероятностных характеристик его надежности по заданным вероятностным характеристикам надежности отдельных элементов двигателя, то есть систем и механизмов.

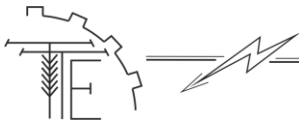
В статье обосновано, что метод сходства и теории размерности позволяет устанавливать закономерности изменения скорости износа t_{ga} в зависимости от регулировки параметров двигателя, при этом требуется проведение многочисленных опытов, что делает его мало практичным в определении ресурса и прогнозирования работы автотракторных двигателей.

Более практически приемлемым методом для определения остаточного ресурса автотракторных двигателей является метод математической статистики и теории вероятностей, и, в особенности, закон нормального распределения. Однако, для определения ресурса двигателей, при использовании этого закона, необходимо также проведение большого объема испытаний.

Таким образом, на современном этапе научно-технического прогресса в автотракторостроении необходимо находить другие методы, наиболее практически приемлемые и способствующие в короткое время, без большого объема испытаний определять ресурс машин с максимальной долговечностью, которые будут разработаны в последующих работах авторов статьи.

Ключевые слова: двигатель, механизмы, системы, отказ, методы.

Табл. 1. Рис. 9. Лит. 12.

**ANALYSIS AND CHOICE OF RESEARCH METHODS
RELIABILITY OF AUTOTRACTOR ENGINES**

The study of the reliability of the engine as a whole can be represented as a study of the probabilistic characteristics of its reliability according to the given probabilistic characteristics of the reliability of individual engine elements, that is, systems and mechanisms.

The article substantiates that the method of similarity and dimensional theory allows us to establish patterns of change in the wear rate t_{ga} depending on the adjustment of the engine parameters, and numerous experiments are required, which makes it little practical in determining the resource and predicting the operation of tractor engines.

A more practically acceptable method for determining the residual life of automotive engines is the method of mathematical statistics and probability theory, and, in particular, the law of normal distribution. However, to determine the resource of engines, using this law, it is also necessary to conduct a large amount of testing.

Thus, at the current stage of scientific and technological progress in automotive engineering, it is necessary to find other methods that are most practically acceptable and contribute in a short time, without a large amount of testing, to determine the resource of machines with maximum durability, which will be developed in subsequent works of the authors of the article.

Keywords: engine, mechanisms, systems, failure, methods.

Tabl. 1. Fig. 9. Lit. 12.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Анісімов Віктор Федорович – доктор технічних наук, професор кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: anisimov@vsau.vin.ua).

Музичук Василь Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: wasil@vsau.vin.ua).

Анисимов Виктор Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Агроинженерии и технического сервиса» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: anisimov@vsau.vin.ua).

Музычук Василий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологических процессов та оборудования перерабатывающих та пищевых производств» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: wasil@vsau.vin.ua).

Anisimov Victor – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of “Agroengineering and technical service” of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnechnaya St, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: anisimov@vsau.vin.ua).

Muzychuk Vasyl – PhD, Associate Professor of the Department of “Technological Processes and Equipment of Processing and Food Productions” of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnechnaya St, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: wasil@vsau.vin.ua).