№ 3 (92)
2015
Техніка, енергетика, транспорт АПК
УДК 631.3.004.5(075)

МЕТОДИ БЕЗРОЗБІРНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ДВИГУНІВ

Анісімов Віктор Федорович *д.т.н., професор*
Гунько Ірина Василівна *к.т.н., доцент*
Борисюк Дмитро Вікторович *асистент*
Зіменко Дмитро Вікторович *студент*
Вінницький національний аграрний університет
Anisimov V.
Gun'ko I.
Borysyuk D.
Zimenko D.
Vinnitsa National Agrarian University

Анотація: *технічне діагностування, або комплекс заходів з оцінки стану машин без їх розбирання є складовою частиною технічного обслуговування і ремонту машин та повинно забезпечувати їх проведення по фактичному технічному стану.*

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.

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

Ключові слова: *технічне діагностування, технічне обслуговування, технічний стан, машина, надійність, довговічність, ресурс машини.*

Вступ

Діагностування і прогнозування ресурсу машин являється одним з найважливіших факторів управління ефективністю, експлуатаційною надійністю і довговічністю тракторів, автомобілів, комбайнів та інших сільськогосподарських машин.

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 достовірні та надійні результати по оцінці параметрів технічного стану дизелів і прогнозуванню залишкового ресурсу.

Закони розподілу відмов систем і механізмів автотракторних дизелів

Дослідження надійності двигуна в цілому можна представити як дослідження ймовірнісних характеристик надійності двигуна за даними ймовірнісним характеристикам надійності окремих його елементів, тобто систем і механізмів.

Аналіз матеріалів випробувань [1, 2] показує, що в основному відмови деталей, систем і механізмів, що обмежують надійність двигуна, можуть бути розподілені за нормальним законом, законом Вейбулла (понад 60%) і експоненціальним законом. Використання зазначених законів розподілу при випробуваннях на надійність цілком правомірно, так як вони охоплюють всі характерні види руйнувань.

Відмови, з'являються в результаті процесу зносу (поступові), розподіляються по нормальному закону, 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 поломками і носять раптовий характер), розподіляються по експоненціальному закону, коефіцієнт варіації якого лежить в межах $0{,}80 \leq v \leq 1{,}0$.

Між двома крайніми розподілами ймовірностей знаходиться проміжне розподілення - за законом Вейбулла. Тут закономірна поява як поступових, так і 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 за законом Вейбулла. При цьому коефіцієнт варіації проходить всі значення.

При вирішенні завдань діагностування все більш широке застосування знаходять математичні моделі процесів, розроблені на основі закономірностей механічних, фізичних, газодинамічних і хімічних процесів, що протікають в дизелі.

Зазвичай при розробці математичної моделі процесів враховують наступні параметри:

$x_i, x_i^0, i = 1, \dots, n$ — відповідно структурні параметри і номінальні значення цих параметрів;

$y_i, y_i^0, i = 1, \dots, h$ — відповідно параметри, що характеризують стан навколишнього середовища;

$z_i, i = 1, \dots, s$ — відповідно параметри, що характеризують режим роботи дизеля;

y_i, y_i^0 і $\Delta Y_i^0, i = 1$ — відповідно діагностичні параметри дизеля, середні значення цих параметрів і допустимі їх відхилення;

n, m, h, s — число відповідних параметрів.

Між названими вище параметрами встановлена функціональна залежність, яка в загальному випадку має вигляд [3]:

$$F_K(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}, \vec{Y}.) = 0, K = 1, \dots m, \tag{1}$$

де $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ – відповідно вектори,

$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n).$

$\vec{y} = (y_1, y_2, \dots, y_h).$

$\vec{z} = (z_1, z_2, \dots, z_s).$

У теорії ймовірностей зустрічаються наступні закони розподілу випадкових величин: закон нормального розподілу, експоненціальний, Релея, Вейбулла, гамма-розподілу, Пуассона, біномінальний та ін.

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

Нормальний закон застосовується до елементів і агрегатів, що підлягають випробуванню на зношування до повної відмови всіх елементів або більшості з них. Основними характеристиками данного закону є безвідмовність, ймовірність відмов, щільність ймовірності часу відмови елемента або агрегату.

Функція нормального закону розподілу наробітку до відмови записується як [7]:

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

де T - випадкова величина (ресурс), год.;

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

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

σ - середнє квадратичне відхилення випадкової величини.

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

$$F(t) = \phi\left(\frac{t_i - \bar{T}}{\sigma}\right). \tag{3}$$

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

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

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_i - \bar{T})}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma}\varphi\left(\frac{t_i - \bar{T}}{\sigma}\right), \tag{4}$$

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

$$F(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_i - \bar{T})}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t}^{\infty} e^{-\frac{(t_i - \bar{T})}{2\sigma^2}} \cdot dt, \tag{5}$$

яка графічно показується наступним чином (рис. 2)[7]. Якщо випадкова величина *T* (напрацювання до відмови) має щільність розподілу *f(t)*, то

$$1 - f(t) = P(t). \tag{6}$$

У разі нормального розподілу інтенсивність відмов є монотонно зростаючою функцією часу (рис. 3) [7] і визначається за формулою:

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{1-F(t)}=\frac{1}{\sigma}\cdot\frac{\varphi\left(\frac{t_i-\overline{T}}{\sigma}\right)}{\phi\left(\frac{\overline{T}-t_i}{\sigma}\right)}, \tag{7}$$

де $\phi(z)$ – функція нормального розподілу випадкової величини.

На довговічність елементів двигуна в цілому впливає час експлуатації. При виборі параметрів ступінь впливу тривалості експлуатації враховується законом безвідмови, що заснований на розподілі Вейбулла. Розподіл Вейбулла застосовується для вивчення довговічності механічних приладів, що пропрацювали певний період часу.

Цей закон розподілу дозволяє шляхом підбору параметрів β (параметр форми) і Y (параметр масштабу), апроксимувати статистичні дані про відмови з урахуванням ступеня впливу навантаження експлуатації елемента або агрегату.

При параметрі β = 1 цей закон переходить в експонентний закон розподілу, а при β > 1 він наближається до закону нормального розподілу.

Для експоненціального закону відношення середнього значення часу безвідмовної роботи математичного очікування до середнього квадратичного відхилення дорівнює $\frac{\overline{T}}{\sigma}=1$, 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 [8]:

$$P(t)=e^{-\varphi(t)t}=e^{-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}}, \tag{8}$$

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

Щільність ймовірності часу відмови елемента визначається за рівнянням:

$$f(t)=\frac{t^2}{2\sigma_0^2}e^{-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}}, \tag{9}$$

При аналізі багатьох випадкових дискретних процесів користуються розподілом Пуассона. Імовірність появи числа подій X = 1, 2, 3 в одиницю часу виражається законом Пуассона (рис. 7) [6]:

$$P(x)=\frac{m^x}{x!}e^{-m}=\frac{\lambda t}{x!}e^{-\lambda t}, \tag{10}$$

де x - число подій за даний відрізок часу;

λ - середнє число подій за одиницю часу;

λt - середнє число подій за час t, $\lambda t = m$.

Розподіл Пуассона відносять до рідкісних подій, тобто $P(x)$ - ймовірність того, що подія в період якогось випробування станеться x разів при дуже великому числі вимірювань 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, відмови в машинах в наслідок зносу та ін.), застосовують закон гамма-розподілу (рис. 8)[6] і (рис. 9, 10) [7]. Для цього закону розподілу маємо:

$$F(t)=\int_0^t\frac{\lambda\eta}{\Gamma(\eta)}\tau^{\eta-1}\cdot e^{-\lambda\tau}\cdot dt, \tag{11}$$

де $\Gamma(\eta)$ - гамма-функція з аргументом η;

η - параметр форми;

λ - параметр масштабу.

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

$$F(t)=\sum_{k=\eta}^{\infty}\frac{(\lambda t)^k\exp(-\lambda t)}{K!}; \tag{12}$$

$$P(t)=1-F(t)=\sum_{K=0}^{\eta-1}\frac{(\lambda t)^k\exp(-\lambda t)}{K!}; \tag{13}$$

$$h(t)=\frac{f(t)}{P(t)}=\frac{\dfrac{\lambda\eta}{\Gamma(\eta)}\tau^{\eta-1}\cdot e^{-\lambda\tau}}{\sum\limits_{K=0}^{\eta-1}\dfrac{(\lambda t)^{k}\exp(-\lambda t)}{K!}}; \quad (14)$$

$$f(t)=\frac{\lambda\eta}{\Gamma(\eta)}\tau^{\eta-1}\cdot e^{-\lambda\tau}. \quad (15)$$

Гамма-розподіл може також використовуватися для опису часу до *n*-ої відмови системи, якщо вихідний розподіл напрацювання до відмови є експоненціальним. Це означає, що коли випадкова величина X_i має експоненціальний розподіл з параметром $\theta=1/\lambda$, то випадкова величина t = $x_1+x_2+\ldots+x_n$ має гамма-розподіл з параметрами λ і η.

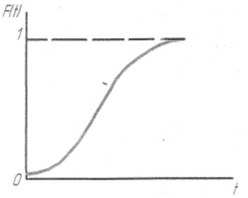

Рис. 1. Графік інтегральної функції розподілу неперервної випадкової величини

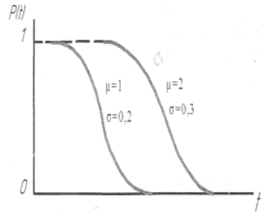

Рис. 2. Ймовірність безвідмовної роботи при нормальному розподілі напрацювання до відмови

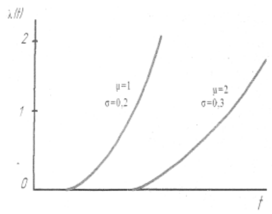

Рис. 3. Інтенсивність відмов при нормальному розподілі напрацювання до відмови

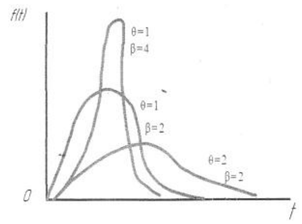

Рис. 4. Щільність розподілу наробітку до відмови за законом Вейбулла

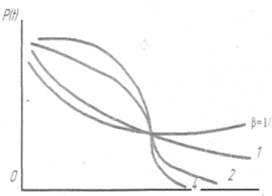

Рис. 5. Ймовірність безвідмовної роботи при розподілі напрацювання на відмову за законом Вейбулла

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

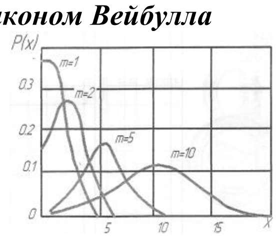

Рис. 7. Загальний вигляд кривої розподілу Пуассона

Рис. 8 Загальний вид кривої розподілу

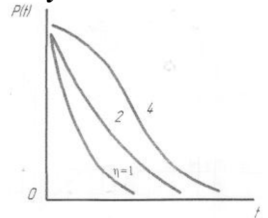

Рис. 9. Ймовірність безвідмовної роботи при гамма-розподілі напрацювання до відмови (λ =1)

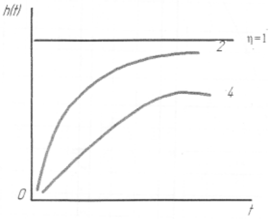

Рис. 10. Інтенсивність відмов при гамма-розподілії напрацювання до відмови (λ = 1)

Висновки

Складною з практичної точки зору проблемою є вибір закону розподілу наробітку до відмови.

Без великого обсягу результатів випробувань важко визначити, який саме розподіл 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.

Список літератури

1. Григорьев М.А. Долговечность и износ деталей автомобильных двигателей / М.А. Григорьев, Н.Н. Пономарёв. – М: Машиностроение, 1976. – 280 с.

2. Ждановський Н.С. Надёжность и долговечность автотракторных двигателей / Н.С. Ждановський, А.В. Николаенко. – Л: Колос, 1974. – 223 с.

3. Станиславский Л.В. Техническое диагностирование дизелей / Л.В. Станиславский. – К.: Вища школа, 1983. – 136 с.

4. Кирпичев М.В. Теория подобия / М.В. Кирпичев. – М: АН СССР, 1953. – 400 с.

5. Алабухов П.М. Долговечность и износ деталей автомобильных двигателей / М.А. Григорьев, Н.Н. Пономарёв. – М: Машиностроение, 1976. – 280 с.

6. Барлоу Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М: Советское радио, 1969. – 488 с.

7. Капур К. Надёжность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. – М: Мир, 1980. – 604 с.

8. Мишин И.А. Долговечность двигателей / И.А. Мишин. – Л: Машиностроение, 1976. – 288 с.

References

1. Grigor'yev M.A. Dolgovechnost' i iznos detaley avtomobil'nykh dvigateley / M.A. Grigor'yev, N.N. Ponomarov. – M: Mashinostroyeniye, 1976. – 280 s.

2. Zhdanovs'kiy N.S. Nadozhnost' i dolgovechnost' avtotraktornykh dvigateley / N.S. Zhdanovs'kiy, A.V. Nikolayenko. – L: Kolos, 1974. – 223 s.

3. Stanislavskiy L.V. Tekhnicheskoye diagnostirovaniye dizeley / L.V. Stanislavskiy. – K.: Vishcha shkola, 1983. – 136 s.

4. Kirpichev M.V. Teoriya podobiya / M.V. Kirpichev. – M: AN SSSR, 1953. – 400 s.

5. Alabukhov P.M. Dolgovechnost' i iznos detaley avtomobil'nykh dvigateley / M.A. Grigor'yev, N.N. Ponomarov. – M: Mashinostroyeniye, 1976. – 280 s.

6. Barlou R. Matematicheskaya teoriya nadezhnosti / R. Barlou, F. Proshan. – M: Sovetskoye radio, 1969. – 488 s.

7. Kapur K. Nadozhnost' i proyektirovaniye sistem / K. Kapur, L. Lamberson. – M: Mir, 1980. – 604 s.

8. Mishin I.A. Dolgovechnost' dvigateley / I.A. Mishin. – L: Mashinostroyeniye, 1976. – 288 s.

МЕТОДЫ БЕЗРАЗБОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ МАШИН

Аннотация: *техническое диагностирование, или комплекс мероприятий по оценке состояния машин без их разборки является составной частью технического обслуживания и ремонта машин и должно обеспечивать их проведение по фактическому техническому состоянию.*

В тракторах, автомобилях, комбайнах и других мобильных машинах сельскохозяйственного назначения наиболее сложным является диагностирование энергетической установки - двигателя. Около половины всех отказов мобильных машин приходится на двигатель.

В целом проблема носит комплексный характер и включает определение оптимальных структурных и диагностических параметров систем и механизм дизеля, многофакторность связей параметров с учетом многообразия конструктивных и эксплуатационных факторов.

Ключевые слова: *техническое диагностирование, техническое обслуживание, техническое состояние, машина, надежность, долговечность, ресурс машины.*

METHODS OF INDISCRIMINATE DIAGNOSTICS OF MACHINES

Summary: *technical diagnosis, or a set of measures to assess the state of their machines without disassembly is part of the maintenance and repair of machines and must ensure their conduct on the actual technical state.*

In tractors, trucks, combines and other mobile machines for agricultural purposes is the most difficult diagnosis of the power plant - engine. About half of all mobile machine failures falls on the engine.

In general, the problem is complex and involves determining the optimal structural parameters and diagnostic systems and diesel engine options multifactor relations with the diversity of design and operational factors.

Keywords: *technical diagnostics, technical maintenance, technical condition, machine, reliability, durability, life of the machine.*