

3. Войтюк В. Вплив строків експлуатації на модель зміни працездатності зерно-збиральних комбайнів / В. Войтюк, А. Демко, С. Демко // Техніка АПК. – 2005. – № 8. – С. 14–18.
4. Князьев Л.Д. К расчету на усталостную прочность втулочно-роликовых цепей. Проектирование и производство механических передач. Ижевск, «Удмуртия», – 1965. – 252 с.
5. Некипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надежность) / В.И. Некипоренко. – М. : Советское радио, 1977. – 214 с.
6. Погорілий Л.В. Зернозбиральна техніка: проблеми, альтернативи, прогноз / Л.В. Погорілий, С.М. Коваль // Техніка АПК. – 2003. – № 7. – С.4 – 7.
7. Тихоненко О.В. Забезпеченість сільського господарства зернозбиральною технікою як запорука ефективності зернового господарства / О. В. Тихоненко // Економіка АПК. – 2008. – № 7. – С. 36 – 41.
8. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем / И.А. Ушаков. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.
9. Gerla M.K. Improving fatigue life. – «Machine design», – 1953, – Janv.

Anatoly Boiko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Aleksandr Bondarenko

Mykolayiv national agrarian university

Justification of transporting organs is at the loaded reservation

The aim of work are realizations of theoretical researches, that is devoted complex to the estimation and tendencies of the changes sent to providing of reliable work of corn-harvesting technical.

The article contains results studies of changes in reliable operation of the corn-harvesting machines. Considered loaded redundant system. The technique is based on chain wear. The regularities of changes in the basic reliability indices continued working bodies and determined average uptime.

Comparatively with a serial chain, an experimental tworow has anymore what in two times mean time between failures, and also materials, that will allow to bring down the expense of time on technical service.

chain working organ, corn-harvesting technical, technical system, reliability, longevity, loaded reservation

Одержано 24.10.14

УДК 629.114.2-192

Л.И. Бойко, д-р техн.наук, А.М. Гоман, доц., канд. техн. наук, О.А. Баран, научн.сотр

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»,
Республика Беларусь*

Методология определения фактических показателей надежности тракторов по данным эксплуатации в гарантийный период

Предлагается методология прогнозирования надежности сельскохозяйственных тракторов по данным эксплуатационных отказов в гарантийный период. Классические методы статистической обработки информации об отказах тракторов в этом случае не применимы. Статистические данные обрабатываются специальными методами цензурированных выборок. Рекомендуются непараметрический и параметрический методы обработки эксплуатационных данных. Приводится пример практического использования разработанной методологии.

первичные отказы, цензурированная выборка, однородность отказов, параметрический и непараметрический методы, функция правдоподобия, критерий Пирсона, метод Каплана-Мейера, распределение Вейбулла

Л.Й. Бойко, д-р техн.наук, А.М. Гоман, доц., канд. техн. наук, О.А. Баран, наук.співроб.

ДНУ «Об'єднаний інститут машинобудування НАН Білорусі», Республіка Білорусь

Методологія визначення фактичних показників надійності тракторів за даними експлуатації в гарантійний період

Пропонується методологія прогнозування надійності сільськогосподарських тракторів за даними експлуатаційних відмов у гарантійний період. Класичні методи статистичної обробки інформації про відмови тракторів в цьому випадку не застосовні. Статистичні дані обробляються спеціальними методами цензурованих вибірок. Рекомендуються непараметричний і параметричний методи обробки експлуатаційних даних. Наводиться приклад практичного використання розробленої методології.

первинні відмови, цензурована вибірка, однорідність відмов, параметричний і непараметричний методи, функція правдоподібності, критерій Пірсона, метод Каплана-Мейера, розподіл Вейбулла

Введение. В условиях жёсткой конкуренции производителей тракторов необходимо в кратчайшие сроки получать прогнозные значения показателей надёжности выпускаемой техники. Для этого требуется производить квалифицированный качественный и количественный анализ отказов тракторов в эксплуатации и оперативно устранять причины их возникновения. Полученная информация об отказах тракторов в гарантийный период характеризуется тем, что производителей и пользователей, прежде всего, интересуют данные по первичным отказам. Поэтому в этот период эксплуатации тракторов к основным показателям надёжности относятся: вероятность безотказной работы $R(t)$, средняя наработка до первого отказа T_1 , интенсивность отказов тракторов и их элементов $\lambda(t)$ [1]. В гарантийный период не все трактора выходят из строя. В этой связи данные эксплуатационных первичных отказов наблюдаемых тракторов ограниченной выборки N можно рассматривать как результаты незавершённых испытаний.

Классические методы статистической обработки информации об отказах тракторов в данном случае не применимы, поэтому результаты таких испытаний обрабатываются специальными методами цензурированных выборок. Цензурированием называется событие, приводящее к прекращению наблюдений за изделием до наступления первого отказа. Цензурированной называется выборка, элементами которой являются полные наработки (от начала некоторого этапа его эксплуатации до наработки до первого отказа) и наработки до цензурирования (от начала эксплуатации до фиксированного момента времени, но до наступления первого отказа).

Метод цензурированных выборок позволяет рассчитывать показатели надёжности не только по зарегистрированным первичным отказам, но ещё дополнительно учитывать трактора, не отказавшие за рассматриваемый промежуток времени.

В данной работе рассматривается методологія оценки надёжности тракторов с учетом цензурированных данных, позволяющая получить расчетные величины показателей надёжности, более соответствующие практическим результатам.

Альтернативные методы расчета надёжности машины, представляемой как система с зависимыми компонентами и сложной логикой предельных состояний, представлены в монографии [5].

1. Статистическая обработка цензурированной информации о надёжности по признаку однородности данных выборки отказов.

Исходной информацией для оценки надёжности по данным эксплуатационных отказов тракторов является таблица отказов по результатам гарантийной эксплуатации тракторов.

Предварительная статистическая обработка данных отказов проводится в следующей последовательности:

- значения наработок до отказа или до цензурирования выстраивают в неубывающий вариационный ряд;
- производится проверка однородности данных отказов;

- время наработок до отказа разбивается на интервалы;
- определяется количество отказов в каждом интервале;
- в границах каждого интервала определяется вероятность отказа.

Проверка однородности данных отказов на совместимость (на уровне значимости p) с гипотезой о том, что они извлечены из одной и той же генеральной совокупности, представляет собой исключение из выборочного вариационного ряда наработки до отказа аномальных (минимальных и максимальных) значений, существенно отличающихся от основного массива данных.

Отсев явных исключений для больших выборок, к которым можно отнести распределение отказов тракторов за гарантийный период, рекомендуется осуществлять с использованием распределения Стьюдента в порядке, изложенном в [6, 7].

2. Методы оценки фактических показателей надежности тракторов для цензурированной выборки их отказов

Оценка показателей надежности может производиться двумя методами: непараметрическим и параметрическим.

Непараметрический метод оценки надежности. *Непараметрический метод* оценки показателей надежности применяют в случаях, когда законы распределения наработки тракторов априори не известны.

Оценка надежности непараметрическим методом может производиться с использованием метода Каплана-Мейера, получившего наибольшее распространение [8-9]. В основе этого метода лежит независимое определение точечной оценки вероятности безотказной работы для каждого интервала эмпирического ряда неубывающих данных наработки до отказа и получение точечной непараметрической оценки вероятности безотказной работы в виде произведения принимаемых независимыми точечных оценок этой функции:

$$\hat{R}(t_i) = \prod_{j=1}^i \frac{n_j - r_j}{n_j}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где n_j – число изделий, сохранивших работоспособность после $i - 1$ интервала;
 r_j – число отказов на j -ом интервале;

$$n_j = N - \sum_{k=1}^l s_k - \sum_{j=0}^{i-1} r_j, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

m – общее число временных интервалов наработки до отказа;

N – общее количество подотчетных тракторов;

s_k – число цензурированных данных о сохранивших работоспособность изделиях, исключенных из рассмотрения в k -ом интервале;

l – число цензурирований.

Дисперсия, нижний и верхний доверительные интервалы точечной оценки вероятности безотказной работы находятся по [10].

Точечная оценка функции распределения отказов

$$\hat{F}(t_i) = 1 - \hat{R}(t_i); \quad i = 1, m. \quad (3)$$

Приращение функции распределения отказов на i -ом интервале

$$\Delta F(t_i) = \hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1}). \quad (4)$$

Для многократного цензурирования время наблюдения ограничено ($T < \infty$), поэтому в этом случае можно определять нижнюю границу средней наработки до отказа [11]

$$T_{нсп} \approx \int_0^T R(t) dt. \quad (5)$$

Так как $R(t) = 1 - F(t)$, то из (5) следует

$$T_{нсп} \approx \int_0^T t dF(t) + [1 - F(T)]T . \quad (6)$$

Заменяя интеграл в выражении (6) суммой, а величину $F(T)$ ее оценкой, находится выражение для оценки средней наработки тракторов до отказа

$$\hat{T}_{нсп} \approx \sum_{i=1}^m t_i \Delta F_i + (1 - \hat{F}(T))T . \quad (7)$$

Нижняя ($LCB_{\hat{T}}$) и верхняя ($UCB_{\hat{T}}$) границы доверительного интервала точечной оценки средней наработки до отказа определяются в [8].

Параметрический метод оценки надежности. При применении *параметрического метода* оценки показателей надежности необходимо по экспериментальным данным определить закон распределения и его параметры.

Проверка соответствия теоретического закона распределения экспериментальным данным осуществляется при помощи критерия согласия.

Построение интервального ряда и гистограммы распределения. Строится упорядоченный неубывающий ряд значений наработки до отказа, такой, что

$$t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n .$$

На основании выборки построим интервальный ряд (Δ_i, n_i) , $i=1, m$, где n_i – число элементов выборки, попадающих в интервал $\Delta_i = (t_i, t_{i+1})$, m – число интервалов вариационного ряда.

В случае применения логарифмически нормального, распределения Вейбулла или экспоненциального распределения необходимо построить упорядоченный ряд натуральных логарифмов значений наработки до отказа, такой, что

$$y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_n ,$$

где $y_i = \ln t_i$, $i = 1 \dots n$.

По полученным данным строится гистограмма распределения.

По виду гистограммы распределения выбирается закон изменения наработки до отказа (экспоненциальный, нормальный, Вейбулла и др.). Функции, используемые для аппроксимации случайной величины, являются унимодальными, т.е. имеют один максимум. Поэтому, если гистограмма распределения имеет явные минимумы, между участками возрастания, то целесообразность применения указанных законов распределения представляется весьма проблематичной. В этом случае для решения вопроса выбора аппроксимирующего закона распределения следует уменьшить число интервалов m .

Правильность выбранного теоретического закона распределения устанавливается с помощью критерия согласия Пирсона [12].

3. Оценка надежности распределением Вейбулла

Определение параметров распределения Вейбулла наработки до отказа и статистическая оценка результатов испытаний производится в соответствии с процедурой, рекомендованной стандартом ИЕС- 61649 [13].

Двухпараметрическое распределение Вейбулла отказов объектов имеет вид:

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda t^\beta) , \quad (6)$$

где λ и β – параметры масштаба и формы распределения.

Для определения параметров распределения λ и β используется принцип максимума функции правдоподобия [10], из которого следует, что эти параметры должны быть выбраны таким образом, чтобы, например для случая однократного цензурирования, достигала максимума функция

$$L_1(\lambda, \beta) = \ln L(\lambda, \beta) = r \ln(\lambda \beta) + (\beta - 1) \ln(t_1 \dots t_i) - \lambda (t_1^\beta + \dots + t_i^\beta + (N - r)T^\beta) .$$

Далее приближенные значения искомых параметров $\hat{\lambda}, \hat{\beta}$ определяются методом последовательных приближений [8]. Точечная оценка вероятности безотказной работы за время t :

$$\hat{R}(t) = \exp(-\hat{\lambda} t^{\hat{\beta}}). \quad (7)$$

Средняя наработка до отказа определяется выражением:

$$\hat{T}_{cp} = \hat{\lambda}^{-1/\hat{\beta}_k} \Gamma(1 + 1/\hat{\beta}_k), \quad (8)$$

где $\Gamma(z)$ – гамма-функция.

Точечная оценка ожидаемого времени наработки до отказа 50% изделий:

$$\hat{T}_{50} = \hat{\lambda}^{-1/\hat{\beta}_k} \left[\ln\left(\frac{1}{0,5}\right) \right]^{1/\hat{\beta}_k}. \quad (9)$$

4. Оценка надежности экспоненциальным распределением

Вероятность наступления отказов объектов при экспоненциальном распределении имеет вид:

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (10)$$

где λ – интенсивность отказов.

Оценка надежности при аппроксимации экспериментальных данных экспоненциальным распределением осуществляется следующим образом [14].

Определяется точечная оценка интенсивности отказов (при $r \geq 10$):

$$\bar{\lambda} = \frac{r-1}{\left(\sum_{i=1}^m r_i t_i + \sum_{k=1}^l s_k T_k \right)}. \quad (11)$$

Вычисляется точечная оценка средней наработки до отказа (при $r \geq 10$)

$$\bar{T}_m = 1/\bar{\lambda}. \quad (12)$$

При отсутствии отказов испытываемых изделий можно определить только нижний предел доверительной вероятности наработки до отказа.

Так как закон распределения наработки до отказа имеет теоретический характер, то полученные данные могут иметь расхождение с фактическими значениями. Поэтому при анализе цензурированных экспериментальных данных с неизвестным законом распределения наработки до отказа рекомендуется первоначально воспользоваться непараметрическим методом, а затем переходить к параметрическому методу.

Пример расчёта показателей надёжности трактора

Исходной информацией о надёжности трактора являются данные об их эксплуатационных отказах в течение гарантийного периода.

Согласно рассматриваемым данным количество тракторов на гарантийном обслуживании составляло 3530. Общее количество первичных отказов тракторов, подлежащее статистическому анализу, после проверки на однородность составило 1571. Время первого и второго цензурирований $T_1 = 1000$ ч и $T_2 = 2000$ ч, числа цензурированных данных $s_1 = 171$ и $s_2 = 1820$, количество временных интервалов вариационного ряда времени наработки $m = 12$ интервалов. Нарботка тракторов составила $T = 2400$ часов.

Результаты статистической обработки данных отказов тракторов приведены в таблице 1. В столбце 1 указан i -ый номер временного интервала, на которые разбита наработка тракторов T . В столбце 2 показана наработка тракторов на конец i -го интервала. Столбец 3 представляет середину каждого временного интервала t_i . Столбец 4 – число отказов в каждом интервале r_i . В столбце 5 указаны числа s_i тракторов (цензурированные данные), исключенных из рассмотрения. Столбец 6 – число тракторов n_j , сохранивших работоспособность в начале каждого интервала.

1. Расчет показателей надежности тракторов непараметрическим методом.

Вероятность безотказной работы $\hat{R}_n(t_i)$ в функции наработки до отказа, вычисленная по формуле (1), приведена в столбце 7 таблицы 1. Точечные оценки функции распределения отказов, вычисленные по формуле (3), даны в столбце 8. Приращения функции распределения отказов на каждом интервале показаны в столбце 9. Средняя наработка до отказа \hat{T}_{ncp} , вычисленная по формуле (7), приведена в столбце 10.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки данных эксплуатационных отказов тракторов непараметрическим методом

i	T_i	t_i	r_i	s_i	n_j	$\hat{R}_n(t_i)$	$\hat{F}(t_i)$	$\Delta\hat{F}(t_i)$	\hat{T}_{ncp}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	200	100	467		3530	0,868	0,132	0,132	1494
2	400	300	257		3063	0,795	0,205	0,073	
3	600	500	188		2806	0,742	0,258	0,053	
4	800	700	142		2618	0,701	0,299	0,041	
5	1000	900	112	171	2476	0,670	0,330	0,031	
6	1200	1100	117		2193	0,634	0,366	0,036	
7	1400	1300	73		2076	0,612	0,388	0,022	
8	1600	1500	72		2003	0,590	0,410	0,022	
9	1800	1700	42		1931	0,577	0,423	0,013	
10	2000	1900	35	1820	1889	0,566	0,434	0,011	
11	2200	2100	21		34	0,216	0,784	0,350	
12	2400	2300	13		13	0	1,0	0,216	

2. Расчет показателей надежности параметрическим методом. Распределение Вейбулла

Приближенные значения параметров распределения Вейбулла, определяемые методом последовательных приближений [8], равны: $\hat{\lambda} = 0,000623$, $\hat{\beta} = 0,908$. Расчетное значение средней наработки до отказа, вычисленное по формуле (8), равно: $\hat{T}_{cp} = 3216$ часов.

Результаты оценки надежности тракторов распределением Вейбулла представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные оценки надежности тракторов распределением Вейбулла

Наработка до отказа T_i , ч	Вероятность безотказной работы $R(t_i)$	Вероятность отказа $\hat{F}(t_i)$	T_{cp}
200	0,926	0,074	3544,3
400	0,866	0,134	
600	0,812	0,188	
800	0,764	0,236	
1000	0,719	0,281	
1200	0,677	0,323	
1400	0,639	0,361	
1600	0,603	0,397	
1800	0,569	0,431	
2000	0,538	0,462	
2200	0,509	0,491	
2400	0,481	0,519	

3. Расчет показателей надежности параметрическим методом. Экспоненциальное распределение

Определение параметров экспоненциального распределения, аппроксимирующего эмпирическое распределение наработки до отказа тракторов в гарантийный период, осуществляется по формулам (11), (12). Результаты расчета параметров экспоненциального распределения показаны в таблице 3.

В таблице 3 приведены значения точечной оценки параметра интенсивности отказа $\hat{\lambda}$

Таблица 3 – Результаты обработки данных экспоненциальным распределением

Наработка до отказа t_i , ч	Вероятность безотказной работы $R(t_i)$	$\hat{\lambda}$	\hat{T}_{cp} , ч
200	0,939	0,000312	3203
400	0,883		
600	0,829		
800	0,779		
1000	0,732		
1200	0,688		
1400	0,646		
1600	0,607		
1800	0,570		
2000	0,536		
2200	0,503		
2400	0,473		

Вывод. Практика расчетов показывает, что наиболее эффективным являются экспоненциальный (однопараметрический) и Вейбулла (двухпараметрический) методы. Выбор параметрического метода следует осуществлять по виду гистограммы распределения отказов. В случае близкого совпадения результатов по экспоненциальному и Вейбулла методам рекомендуется использовать экспоненциальный, как наиболее простой метод. При выборе метода оценки надежности между параметрическим и непараметрическим методами при отсутствии необходимости экстраполяции предпочтение следует отдавать непараметрическому методу, гарантирующему определение нижней границы показателей надежности.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник в десяти томах. Т.6. Экспериментальная отработка и испытания. – М.: Машиностроение, 1989.
3. Северцев Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и обработке / Н.А. Северцев. – М.: Высшая школа, 1989.
4. Скрипник В.М. Оценка надежности технических систем по цензурированным выборкам / В.М. Скрипник, А.Е. Назин. – Минск: Наука и техника, 1981.
5. Альгин, В.Б. Расчет мобильной машины: кинематика, динамика, ресурс / В.Б. Альгин. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 271 с.
6. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 239с.
7. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник. – М.: Наука: Из-во физ. мат. лит., 1968. – 288 с.
8. Методические указания Надежность в технике: Методы оценки надежности по экспериментальным данным: РД 50-690-89. – Госкомитет СССР по управлению качеством продукции. М.: Госстандарт, 1990. – 132 с.
9. Надежность в технике: Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность: ГОСТ 27.410-87. М.: Госстандарт, 1988. – 109 с.

10. Надежность в технике: Система сбора и обработки информации: Методы оценки показателей надежности: ГОСТ 27.503-81. М.: Госстандарт, 1982. – 55 с.
11. Скрипник, В.М. Оценка надежности технических систем по цензурированным выборкам / В.М. Скрипник, А.Е. Назин. – Минск: Наука и техника, 1981. – 144 с.
12. Савич, Л.К. Теория вероятностей и математическая статистика / Л. К. Савич, Н. А. Смольская; науч. ред. О. И. Лаврова. – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2006. – 208 с.
13. ГОСТ Р 50779.27-2007, МЭК 61649–1997 Статистические методы. Критерий согласия и доверительные интервалы для распределения Вейбулла.
14. Equipment reliability testing – Part 4: Statistical procedures for exponential distribution – Point estimates, confidence intervals, prediction intervals and tolerance intervals: International Standard IEC 60605-4. International Electrotechnical Commission.2001. – 65 p.

Leonid Boyko, Arcady Goman, Volha Baran

The State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, Belarus

Methodology for determining the practical reliability indexes of tractors as per operating data within the warranty period

You may wish to consider a methodology for predicting the reliability of agricultural tractors according to operational failures during the warranty period. In this case, so far known in the art methods of statistical information processing of tractors' failures are not applicable. Statistical data are processed by special methods of censored samples. Parametric and nonparametric methods of operational data processing are recommended. An example of practical use of the methodology is presented hereinafter.

The method allows the calculation of censored samples parameters of reliability not only for the registered primary failure, but additionally take into account the tractor, which is not denied in the reporting period of time.

Practice calculations shows that the most effective are exponential (one-parameter) and Weibull distribution (two-parameter) methods. Selecting a parametric method should be carried out by the form of the histogram distribution of failures. In the case of a close coincidence results in an exponential and Weibull distribution exponential method is recommended as the most simple method. When choosing a method for assessing the reliability between parametric and nonparametric methods without the need for extrapolation of the preference should be given to non-parametric methods, guarantees a certain lower limit of reliability indices.

single points of failure, censored sample, failure homogeneity, parametric and nonparametric methods, likelihood function, Pearson correlation criterion, Kaplan-Meier method, Weibull distribution

Одержано 03.09.14

УДК 667.64:678.026

А.В. Букетов, проф., д-р техн. наук, В.О. Скирденко, асист., О.О.Сапронов, асист.
Херсонська державна морська академія

Застосування методу математичного планування експерименту для встановлення оптимального вмісту двокомпонентного наповнювача у епоксикомпозитах

Досліджено залежність вмісту дисперсних наповнювачів на фізико-механічних і теплофізичних властивостей епоксидних композитів для формування захисних покриттів. Методом математичного планування експерименту визначено оптимальний вміст дисперсного вугільного шлаку (63...65 мкм) і дрібнодисперсного залізного сурику (10...20 мкм), який складає: (ВШ) – 30 мас.ч; (ЗС) – 20 мас.ч., ЕД-20 – 100 мас.ч., твердник ПЕПА – 10 мас.ч. для формування матеріалу з поліпшеними фізико-механічними властивостями. Визначено оптимальний вміст дисперсного вугільного шлаку – 10 мас.ч і дрібнодисперсного залізного сурику – 40 мас.ч. для формування матеріалу з поліпшеними теплофізичними властивостями. від

епоксикомпозит, фізико-механічні і теплофізичні властивості, математичне планування