УДК 630.36

ОБОСНОВАНИЕ ВИДА ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Войтюк В.Д., д.т.н., проф. *
Дидур В.В., к.т.н.
Невзоров А.В., к.т.н., доц.
Уманский национальный университет садоводства
Тел/факс (04744)-3-98-37
e-mail: 2andrey2@ua.fm

Аннотация. Анализируются статистические модели для оценки надежности механических систем на основе результатов испытаний и наблюдений во время эксплуатации. Предлагается однопараметрическая функция распределения для оценки показателей надежности и формулы для определения этих параметров.

Ключевые слова: безотказность, вероятность, закон распределения, наработка, интенсивность.

Постановка проблемы. Оценка надежности современных, наиболее сложных технических систем методами прогнозирования на основе прочностных и трибологических расчетов отдельных ее элементов на стадии проектирования, не всегда отражают реальные значения параметров надежности системы в целом. На основе этого предположения, можно заключить, что оценка надежности современных технических объектов на основе статистической обработки результатов испытаний (стендовых, полигонных) и данных эксплуатации может давать более достоверные результаты, несмотря на возрастающий объем, длительную продолжительность и высокую стоимость выполненных работ.

Анализ последних исследований и публикаций. Для описания надежности по результатам испытаний и наблюдений методами математической статистики применяется статистическая мо-

---

* Публикуется по рекомендации: акад. МААО, д.т.н., проф. Пастухова В.И.

дель – закон распределения наработки до отказа. С этой целью на практике часто используют различные математические законы распределения случайных величин, как нормальное, экспоненциальное, Вейбулла и т.д. [1]. Но практика показывает, что, несмотря на широкий выбор существующих теоретических законов распределения, не всегда удается описать реальную картину распределения фактических отказов механической системы во время эксплуатации. Выбор теоретического закона распределения наработки до отказа является весьма ответственной задачей, ибо от этого зависит достоверность результатов выполненных расчетов. Для оценки надежности механической системы методами математической статистики необходимо иметь закон распределения одной из основных показателей надежности. В [2] представлен ряд некоторых практических случаев распределения интенсивности отказов $\lambda(t)$ для различного рода машин и оборудований (рис. 1). Случай распределения интенсивности отказов по виду *г)* может встречаться в основном при эксплуатации машин старого парка, состоящих главным образом из механических узлов. Для математического описания этого случая, срок службы машины делят обычно на три характерных периода – приработка, нормальная эксплуатация и старение, а потом для каждого периода отдельно определяют значения параметров распределения Вейбулла [2]. В [3] для описания данного случая была предложена трехпараметрическая функция распределения отказов, что еще более усложняет аналитические расчеты. При оценке показателей надежности машин часто применяют экспоненциальный закон распределения, который соответствует случаю распределения отказов по виду *б* на рис. 1. Но такой случай с постоянной интенсивностью отказов для всего жизненного цикла встречается крайне редко. Поэтому экспоненциальный закон распределения может быть применена только для приближенной оценки показателей надежности или только для отдельных периодов эксплуатации, где интенсивность отказов изменяется несущественно (рис. 1, *а, б, в, д*). Для описания случая *е* можно используется линейная зависимость вида

$$\lambda(t) = \lambda_0 + m \cdot (t - t_0)\,, \tag{1}$$

где t_0 – время начала наблюдений (испытаний);
λ_0 – значение интенсивности отказов при $t=t_0$;
m – коэффициент пропорциональности.

При t_0=0 и λ_0=0 получим распределение Релея с коэффициентом пропорциональности $m=1/\sigma^2$, где σ – параметр распределения Релея.

В [4] для математического описания случаев *б, в, д*, которые часто встречаются, предложена следующая модель:

$$\lambda(t)=\lambda\cdot[1+(\alpha-1)\cdot e^{-\beta\cdot(t-t_0)}], \qquad (2)$$

где λ – значение интенсивности отказов в период нормальной эксплуатации;

β – параметр, характеризующий длительность периода приработки;

$\alpha=\lambda_0/\lambda$– параметр формы.

При α=1 получим экспоненциальный закон (рисунке 1, *б*), при значениях α<1 получим распределение вида рис. 1, *в*, а при α >1 – вида рис. 1, *д*.

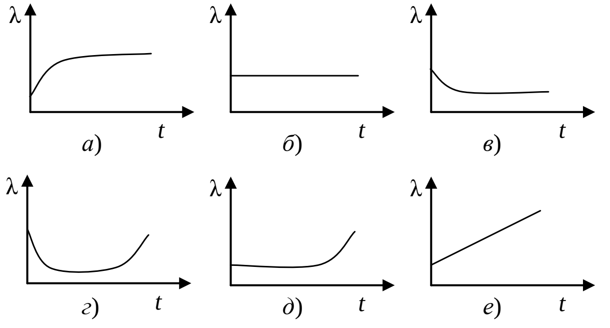
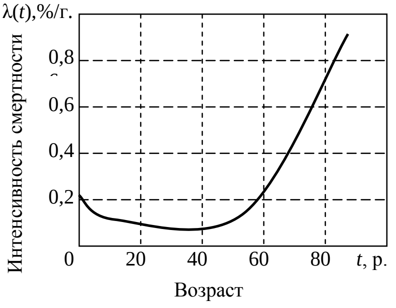


Рисунок 1 -Внешний вид графиков функций интенсивности отказов λ(*t*)



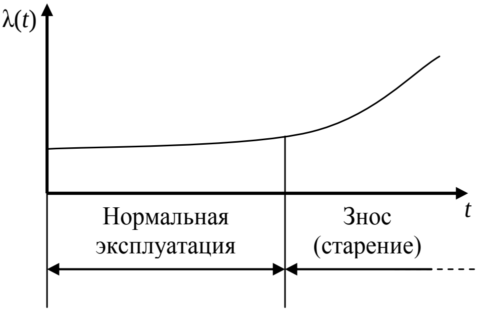


Рисунок 2 - Интенсивность смертности живых организмов

Рисунок 3 – Интенсивность отказов с/х техники

Для аналогии на рис 2 представлена зависимость интенсивности смерти живых организмов от времени. Практика показывает, что изменение интенсивности отказов технических систем во времени имеет примерно такой же вид [2]. Доказано, что после определенной наработки вследствие усиления влияния на интенсивность отказов $\lambda(t)$ элементов и узлов процессов износа и старения деталей она нелинейно возрастает [5]. На основе этого приходим к выводу, что λ-характеристика технических систем будет иметь вид, представленный на рис.3.

Цель исследований. Целью исследования, результаты которого положены в основу данной статьи, есть обоснование целесообразности использования при анализе и прогнозировании показателей безотказности образцов сельскохозяйственной техники предлагаемых математических моделей. Кроме того, предлагается методика для калибрования предложенной модели с учетом анализа статистических данных об эксплуатационных и испытательных отказах техники.

Основная часть. В настоящей работе предлагается следующая однопараметрическая функция для описания λ-характеристики (интенсивности отказов) объектов сельхозтехники, соответствующей кривой на рис. 2, 3:

$$\lambda(t) = \frac{1}{T} \cdot \left(1 + e^{\frac{t}{T}}\right), \tag{3}$$

где T – параметр масштаба.

С учетом основной теоремы надежности, выражение для вероятности безотказной работы $P(t)$ будет иметь вид [1]:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} = e^{1-\frac{1}{T}-e^{\frac{t}{T}}}. \tag{4}$$

С учетом (4) вероятность отказов $F(t)$ будет иметь вид

$$F(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{1-\frac{1}{T}-e^{\frac{t}{T}}}, \tag{5}$$

а плотность времени наработки до отказа $f(t)$ – вид

$$f(t) = P(t) \cdot \lambda(t) = \frac{1}{T} \cdot e^{1-\frac{1}{T}-e^{\frac{t}{T}}} \cdot \left(1 + e^{\frac{t}{T}}\right). \qquad (6)$$

На рис. 3 представлены графики зависимости от времени представленных показателей надежности для различных значений параметра формы *Т*.

Как видно из рисунка, график интенсивности отказов совпадает с кривой на рис. 4. Это говорит об адекватности сделанного предположения об аналитическом виде функции интенсивности отказов (3).

Одним из основных достоинств предложенного распределения является то, что оно определяется только одним параметром *Т*. Этот параметр характеризует значение наработки, при которой вероятность безотказной работы будет равна $P(T)$=0,066. Для определения параметра *Т* достаточно иметь статистические данные об отказах в какой-нибудь период эксплуатации. Допустим, что известны сведения об отказах в интервале Δt_i , после времени эксплуатации t_i . Тогда интенсивность отказов в этот момент времени будет равно приближенно

$$\lambda(t_i) = \frac{\Delta n(t_i)}{N_i \cdot \Delta t_i}, \qquad (7)$$

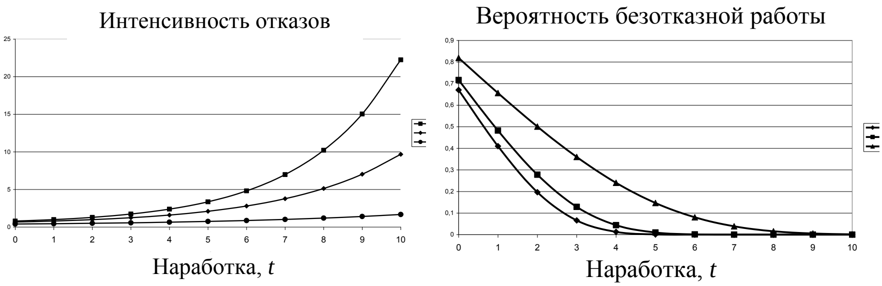
где N_i – количество работоспособных объектов на момент времени t_i;

$\Delta n(t_i)$ – количество отказавших объектов в интервале Δt_i.

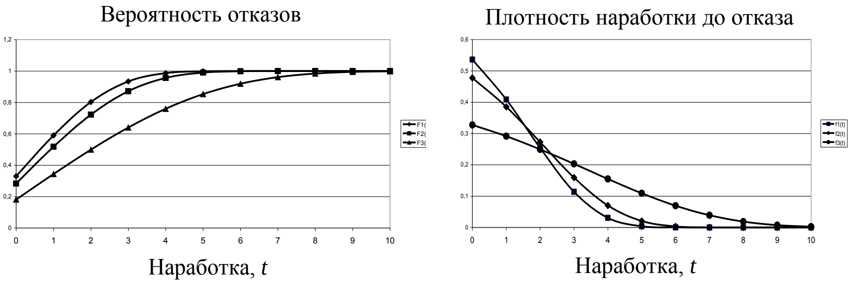
Используя выражение (3), получим

$$\lambda(t_i) \cdot T = 1 + e^{\frac{t_i}{T}}. \qquad (8)$$

Уравнение (8) не имеет аналитического решения относительно *Т*. Поэтому для нахождения статистического значения параметра формы нужно использовать численные методы (например, метод итераций).

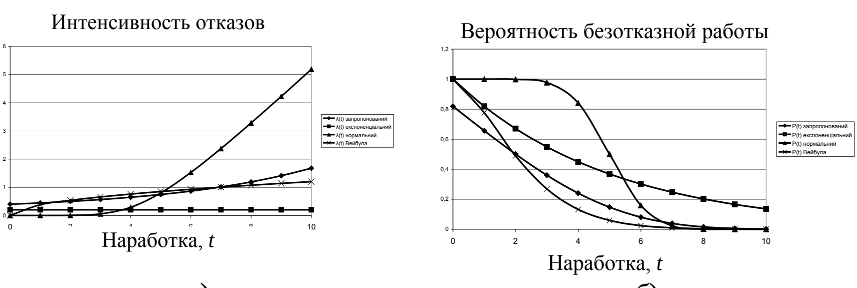


а) *б*)



в) *г*)

Рисунок 4 - Графики основных показателей безотказности в соответствии с выражениями (3 – 6) при различных параметрах масштаба



а) *б*)

Рисунок 5 - Графики показателей безотказности для различных законов распределения времени наработки до отказа

При известном T, используя (3) – (6), рассчитываются показатели надежности для произвольного момента эксплуатации. Для сравнительного анализа предложенного распределения (с параметром T=5) с другими известными распределениями – экспоненциального (при λ=0,4), нормального (при T_0=5 и σ=1) и

Вейбулла (при b=1,5 и T=2,5) построим графики зависимостей интенсивности отказов λ(t) и вероятности безотказной работы P(t) (рис. 5). Введя в (3) дополнительный параметр a, запишем выражение для интенсивности отказов в более общем виде:

$$\lambda(t) = \frac{1}{T} \cdot \left(1 + a \cdot e\frac{t}{T}\right) \cdot \qquad (9)$$

Остальные показатели безотказности с учетом распределения (9) рассчитываются согласно (4) – (6).

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = \exp\left[a \cdot \left(1 - e^{\frac{t}{T}}\right) - \frac{t}{T}\right]; \qquad (10)$$

вероятность отказов:

$$F(t) = 1 - \exp\left[a \cdot \left(1 - e^{\frac{t}{T}}\right) - \frac{t}{T}\right]; \qquad (11)$$

плотность распределения наработки до отказа:

$$f(t) = \frac{1}{T} \cdot \left(1 + a \cdot e\frac{t}{T}\right) \cdot \exp\left[a \cdot \left(1 - e^{\frac{t}{T}}\right) - \frac{t}{T}\right]. \qquad (12)$$

На рис. 6 показаны графики зависимости λ(t) для двухпараметрического распределения (9) при различных значениях параметра a.

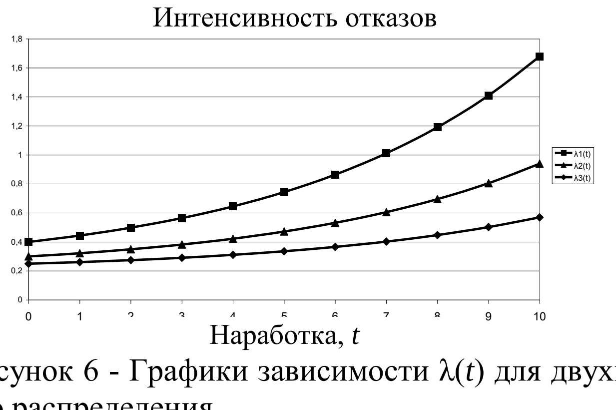


Рисунок 6 - Графики зависимости λ(t) для двухпараметрического распределения

Как видно из рисунка, значение параметра *a* не меняет форму кривой, а лишь только ее кривизну.

Выводы. Как видно из вышеуказанных формул и графиков, предложенная функция распределения отказов может быть успешно использована для оценки различных механических систем, включая образцы сельскохозяйственной техники. Одним из основных ее преимуществ является достаточная простота ее калибрования (т.е. расчет параметров на основании анализа статистических данных об испытаниях или эксплуатационной надежности).

ЛІТЕРАТУРА

1. Решетов Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М.: Высшая школа, 1988. – 237 с.

2. Bertsche B. Zuverlдssigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau / B. Bertsche, G. Lechner. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. – 495 s.

3. Абдуллаев А.И. Оценка показателей надежности машин и конструкций на основе закона распределения отказов / А.И. Абдуллаев, И.Г. Чалаби // Ученые Записки АзТУ. – Баку, 2006. – № 2. – С. 5–8.

4. Tschalabi I.G. Lebensdauerverteilung zur Beschreibung des Ausfallverhaltens von elektronischen Gerдten und komplexen Bauteilen / I.G. Tschalabi // 22 Konferenze Technische Zuverlдssigkeit, VDI Verlag GmbH, 7-8 April 2005, Stuttgart. – S. 259–270.

5. Проников А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.

BIBLIOGRAPHY

1. Reshetov D.N. Reliability of machines / D.N. Reshetov, A.S. Ivanov, V.Z. Fadeev. – M.: Vysshaya shkola, 1988. – 237 s.

2. Bertsche B. Zuverlдssigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau / B. Bertsche, G. Lechner. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. – 495 s.

3. Abdullaev A.I. Performance evaluation of reliability machines and constructions on the basis of distribution law of reluctance / A.I. Abdullaev, I.G. Chalabi // Uchyonye Zapiski AzTU. – Baku, 2006. – № 2. – S. 5–8.

4. Tschalabi I.G. Lebensdauerverteilung zur Beschreibung des

Ausfallverhaltens von elektronischen Gerдten und komplexen Bauteilen / I.G. Tschalabi // 22 Konferenze Technische Zuverlдssigkeit, VDI Verlag GmbH, 7-8 April 2005, Stuttgart. – S. 259–270.

5. Pronikov A.S. Parametric reliability of machines / A.S. Pronikov. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2002. – 560 s.

SUBSTANTIATION OF DISTRIBUTION LAW TYPE OF FARM MACHINERY RELIABILITY FACTORS

V.D. Voitiuk, V.V. Didur, A.V. Nevzorov

Summary

Statistical models for reliability evaluation of mechanical systems on basis of test and observation results during maintenance were analysed. One-parameter distribution function for evaluation of reliability parameters and parameters defining formula was suggested.

Key words: failure-free, probability, distribution law, result, intensity.