

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ
НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ**

**Гринченко А.С. к.т.н. доц.¹, Алферов А.И. к.т.н. доц.¹,
Бойко А.И. д.т.н. проф.²**

¹*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко*

²*Национальный университет биоресурсов и природоиспользования Украины*

В статье изложен метод стохастического моделирования процессов накопления механических повреждений в изнашивающихся элементах сельскохозяйственных агрегатов и прогнозирования на этой основе показателей механической надежности.

Постановка проблемы. Сельскохозяйственная и транспортная техника отечественного производства по основным показателям безотказности и долговечности существенно уступает уровню, достигнутому мировыми производителями. Исправить ситуацию можно, используя комплексный подход и акцентируя внимание на повышении качества проектирования. Обеспечение надежно-ориентированного проектирования требует широкого использования методов моделирования и прогнозирования надежности. На этапе проектирования в первую очередь необходимо оценить риски и предотвратить возникновение отказов, обусловленных различными видами механического повреждения и разрушения элементов машин. Эффективным способом решения многих проблем механической надежности и перехода к ресурсному проектированию является использование стохастического моделирования деградационных процессов.

Целью статьи является изложение метода стохастического моделирования процессов накопления механических повреждений в элементах машин и прогнозирования на этой основе показателей механической надежности.

Основное содержание. Под стохастическим моделированием процессов механического повреждения понимается построение таких аналитических вероятностных моделей, которые адекватны физике процесса и пригодны для статистической оценки параметров. Доступные для анализа статистические данные о реальных деградационных процессах в технике, которые связаны с изнашиванием, как правило, имеют дискретный ха-

ракти. Методы моделирования должны учитывать эту особенность.

Во многих случаях при кумулятивных процессах механического повреждения можно использовать модель нестационарного случайного процесса с непрерывными монотонными реализациями [1]. Упрощенный способ описания такого процесса заключается в том, что используется только условное распределение параметра технического состояния $x_n(t)$ при любой фиксированной наработке t . Динамика процесса задается в виде детерминированных функциональных зависимостей от наработки для тех параметров распределения x_n , которые определяют изменение среднего значения процесса и характеристик его рассеивания. Тогда в случае монотонно возрастающих реализаций процесса $x_n(t)$, как показано в [1], выполняется интегральная зависимость:

$$\int_0^t \bar{f}\left(\frac{t}{x_n}\right) dt = \frac{1 - \int_0^{x_n} f\left(\frac{x_n}{t}\right) dx_n}{\int_0^{x_n} f\left(\frac{x_n}{0}\right) dx_n}, \quad (1)$$

где $f\left(\frac{x_n}{t}\right)$ - плотность условного распределения параметра состояния при фиксированной наработке;

$\bar{f}\left(\frac{t}{x_n}\right)$ - плотность распределения наработки до выхода параметра состояния на любой фиксированный уровень x_n ;

$\int_0^{x_n} f\left(\frac{x_n}{0}\right) dx_n$ - вероятность достижения параметром состояния уровня x_n при наработке $t = 0$.

Если величина параметра x_n , соответствующая предельному состоянию объекта, задана и составляет $x_{np} = const$, то из (1) после дифференцирования по наработке следует выражение, которое можно использовать при прогнозировании плотности распределения ресурса

$$\bar{f}\left(\frac{t}{x_{np}}\right) = \frac{-\frac{d}{dt} \left\{ \int_0^{x_{np}} f\left(\frac{x_n}{t}\right) dx_n \right\}}{\int_0^{x_{np}} f\left(\frac{x_n}{t}\right) dx_n}. \quad (2)$$

Выражение (2) устанавливает однозначную стохастическую зависи-

мость между плотностями распределений ресурса и параметра технического состояния объекта. Выбирая вид и параметрические функции условного распределения параметра состояния $f\left(\frac{x_n}{t}\right)$, с помощью (2) всегда можно определить соответствующую плотность распределения ресурса. При этом не накладывается никаких ограничений на характер предполагаемого поведения отдельных реализаций процесса $x_n(t)$, кроме необходимости их монотонного возрастания. Если в качестве условного распределения параметра технического состояния использовать закон Вейбулла с плотностью вида

$$f\left(\frac{x_n}{t}\right) = \frac{b}{a(t)} \left(\frac{x_n}{a(t)}\right)^{b-1} \exp\left\{-\left(\frac{x_n}{a(t)}\right)^b\right\}, \quad (3)$$

где параметр масштаба $a(t)$ определяется степенной функцией наработки $a(t) = t^v / \mu$, а параметр формы $b = const$, то с помощью (2) получаем [1], что ресурс имеет распределение Фреше, у которого плотность определяется выражением:

$$\bar{f}\left(\frac{t}{x_{np}}\right) = \frac{bv}{t} \left(\frac{\mu x_{np}}{t^v}\right)^b \exp\left\{-\left(\frac{\mu x_{np}}{t^v}\right)^b\right\}. \quad (4)$$

В соответствии с (4) основные прогнозируемые показатели надежности могут быть определены аналитически по формулам:

- вероятность безотказной работы

$$R(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\mu x_{np}}{t^v}\right)^b\right\}; \quad (5)$$

- средний ресурс

$$T = (\mu x_{np})^{1/v} \Gamma\left(1 - \frac{1}{bv}\right); \quad (6)$$

- гамма-процентный ресурс

$$t_\gamma = (\mu x_{np})^{1/v} \left[\ln \frac{1}{1-\gamma}\right]^{-1/bv}. \quad (7)$$

Практическая реализация прогноза надежности с помощью выражений (5), (6) и (7) требует наличия данных о величине входящих в них параметров: μ , v и b . Статистическая оценка этих параметров может быть

выполнена на основе использования дискретных данных о непрерывном монотонном случайном процессе $x_n(t)$. Пусть на основе контроля технического состояния у n однотипных объектов получена случайная выборка попарно соответствующих друг другу значений параметра состояния и наработки: $\{x_{ni}, t_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$. В системе координат x_n и t такая выборка является совокупности точек, которые находились на реализациях случайного деградиационного процесса $x_n(t)$ в моменты дискретного контроля.

Наличие аналитических выражений для соответствующих друг другу плотностей распределений $f\left(\frac{x_n}{t}\right)$ и $\tilde{f}\left(\frac{t}{x_n}\right)$ позволяет использовать при оценке их параметров универсальный и эффективный метод максимального правдоподобия [2]. В рассматриваемом случае совместная функция правдоподобия может быть задана в виде

$$L(\mu, \nu, b) = \sum_{i=1}^n \ln f\left(\frac{x_{ni}}{t_i}\right) + \sum_{i=1}^n \ln \tilde{f}\left(\frac{t_i}{x_{ni}}\right). \quad (8)$$

Особенностью задания функции правдоподобия в форме (8) является то, что учитывается принадлежность каждой из точек $\{x_{ni}, t_i\}$ двум распределениям $f\left(\frac{x_n}{t}\right)$ и $\tilde{f}\left(\frac{t}{x_n}\right)$ с одними и теми же параметрами: μ , ν и b . В рассматриваемом варианте совместная функция правдоподобия, как функция общих параметров, определяется с помощью выражения:

$$L(\mu, \nu, b) = n \ln \nu + 2n(\ln b + b \ln \mu) - (2b\nu + 1) \sum_{i=1}^n \ln t_i + \\ + (2b - 1) \sum_{i=1}^n \ln x_{ni} - 2\mu^b \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{ni}}{t_i}\right)^b. \quad (9)$$

Параметры μ , ν и b определяются из условия максимума функции правдоподобия (9).

Реализуя изложенную выше теорию стохастического моделирования и прогнозирования механической надежности проведем расчеты, используя в качестве исходных данных результаты измерений суммарного углового зазора на входном валу главной передачи ведущих мостов при заторможенных колесных редукторах. Этот параметр комплексно характеризует уровень изношенности всех трущихся сопряжений в мосте и по его величине может быть установлено предельное состояние моста в сбо-

ре. Для получения соответствующей статистической информации в условиях эксплуатации при различных наработках были обследованы ведущие мосты 9 сельскохозяйственных агрегатов ($n = 18$ мостов) и значения углового зазора в градусах сведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения суммарного углового зазора и наработки мостов

№ п/п	Наработка мото-ч.	Суммарный угловой зазор, град.	№ п/п	Наработка мото-ч.	Суммарный угловой зазор, град.
1	4649	14	10	4649	17
2	5422	48	11	5422	20
3	1177	5	12	1177	2
4	1817	13	13	1817	12
5	1512	6	14	1512	13
6	2156	27	15	2156	4
7	1901	30	16	1901	36
8	7680	35	17	7680	40
9	2105	17	18	2105	13

Максимизируя функцию правдоподобия (9) по трем параметрам с помощью математического пакета «Mathcad», были определены числовые значения, которые при приведенных статистических данных о деградиационном процессе составили: $\mu = 971$; $b = 1,524$ и $\nu = 1,26$. Значение параметра формы b соответствует коэффициенту вариации деградиационного процесса $V_x = 0,67$. Используя найденные параметры и учитывая нормативное значение суммарного углового зазора ведущих мостов, соответствующее их предельному состоянию, которое составляет $x_{пр} = 36$ град., был построен график прогнозируемой плотности распределения ресурса мостов, представлены на рис. 1. Здесь приведена также зависимость среднего значения углового зазора $\bar{x}_n(t)$ от наработки в эксплуатации.

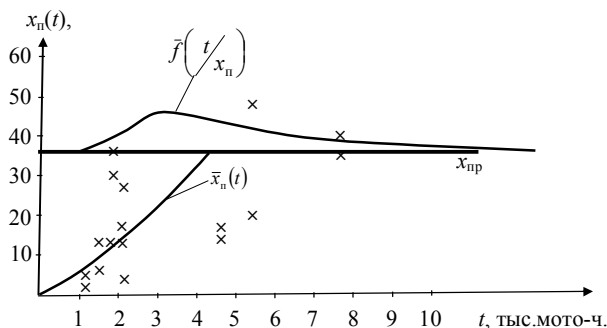


Рис. 1 Плотность распределения ресурса мостов

В соответствии с выражением (5) построен график вероятности безотказной работы ведущих мостов, приведенный на рис.2.

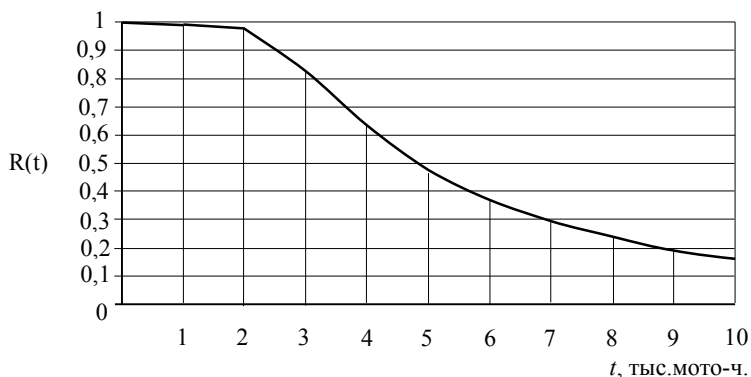


Рис.2. График вероятности безотказной работы ведущих мостов

Согласно зависимостям (6) и (7) средний ресурс ведущих мостов составляет $T = 7460$ мото-ч., а 80%-ый гамма-ресурс $t_{0,8} = 3150$ мото-ч. соответственно.

Выводы. Практическое значение рассмотренного метода моделирования и прогнозирования механической надежности для этапа проектирования и испытаний опытных образцов заключается в том, что построенная на основе реальных статистических данных модель надежности объекта будет отражать весь спектр эксплуатационных воздействий и факторов, влияющих на деградационный процесс и распределение ресурса. Модернизируя или проектируя новый объект, аналогичный по конструкции и условиям эксплуатации, а также подобный по виду деградационного процесса, следует использовать полученную по данным о предшественнике модель, как базовую и, проводя сравнительные расчеты или ускоренные сравнительные испытания, по их результатам, после корректировки некоторых параметров модели осуществлять прогноз ресурсных показателей надежности в реальной эксплуатации.

Список использованной литературы

1. Гринченко А.С. Механическая надежность мобильных машин: Оценка, моделирование, контроль - Х.: Віровець А.П. "Апостроф", 2012. -259с.
2. Soong T.T., 2004, Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers, State University of New York at Buffalo, Buffalo, New York, USA.

Анотація

ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ НА ПІДСТАВІ СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЕГРАДОВАНИХ ПРОЦЕСІВ

О.С. Гринченко, О.І. Алфьоров, А.І. Бойко

У статті викладено метод стохастичного моделювання процесів накопичення механічних пошкоджень у елементів сільськогосподарських агрегатів, які зношуються, та прогнозування на цій підставі показників механічної надійності.

Abstract

PROGNOSTICATION OF MECHANICAL RELIABILITY IS ON THE BASIS OF STOCHASTIC DESIGN OF THE DEGRADED PROCESSES

O.S. Grynchenko, O.I. Alferov, A.I. Boyko

In the article the method of stochastic design of processes of accumulation of mechanical damages is expounded in the wearing out elements of agricultural aggregates and prognostication on this basis of mechanical reliability indexes.