

УДК 004.942

**Н.А. Ченцов /д.т.н./, С.Л. Сулейманов**

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## РЕСУРСНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЕТАЛИ ОБОРУДОВАНИЯ

*Предложена имитационная модель, генерирующая данные изменения текущего технического состояния детали по ее нескольким реализациям. Использование модели обеспечивает формирование исходных данных для исследования статистических моделей в задачах ремонтной службы предприятия. В основе математической модели лежит функция интенсивности изменения текущего технического состояния, построенная из типовой кривой износа. Параметры функции представлены законами распределения. Генерирование значений параметров очередной реализации детали выполняется с использованием случайных чисел. Определение значений технического состояния реализации в заданный момент времени определяется с использованием интенсивности изменения технического состояния методом последовательного приближения.*

**Ключевые слова:** деталь оборудования, техническое состояние, типовая кривая износа, имитационная модель.

### Постановка проблемы

Среди задач ремонтной службы металлургического предприятия можно выделить группу предполагающих использование статистики, отражающей изменение технического состояния (ТС)  $У$  и отказов деталей оборудования. Такие задачи направлены на: прогнозирование сроков отказа; планирование потребности в запасных частях; формирование плана ремонта и др. Известны различные подходы к формированию статистики, среди которых следует выбрать и разработать наиболее эффективные пути реализации.

### Анализ последних исследований и публикаций.

Значительное количество задач ремонтной службы предполагает использование значительных объемов статистики при их исследовании и верификации [3,5]. Применяемые решения по формированию статистики изменения ТС деталей подходы можно объединить в три группы:

1) Из результатов эксплуатации реального оборудования [6], который обладает недостатками:

- длительный период накопления статистики (годы и десятки лет);
- сложность сохранения status quo условий эксплуатации в процессе накопления статистики;
- невозможность изменения условий эксплуатации оборудования по требованию исследователя.

2) Из использования специально изготовленной физической модели детали и стенда для ис-

пытаний [1,2]. К недостаткам такого подхода можно отнести:

- затраты на изготовление модели;
- длительность эксперимента – десятки суток и более;
- сложность и даже невозможность управления существенными факторами, влияющими на изменение ТС детали без изготовления нового стенда.

3) Из использования математической имитационной модели, реализованной в виде компьютерной программы [4]. При построении адекватной имитационной модели требуют учета следующие проблемы:

- сложность математического аппарата;
- отсутствие типового подхода к ее построению для случая изменения ТС детали;
- отсутствие эффективных моделей с физическими характеристиками параметров процесса износа.

Учитывая все более широкое использование имитационных моделей в исследовании различных объектов и процессов можно считать обоснованной разработку ее версии для случая изменения ТС детали.

Теоретические основы к построению общего случая имитационной модели приведены в публикации [7]. В работе рассмотрены вопросы математического моделирования и построения информационных систем моделирования. Подходы к построению имитационной модели, учитывающие стохастический характер параметров модели, приведены в работе [8]. Вопросы построения имитационных моделей комплексных объек-

тов, отражающих изменения диагностических параметров рассмотрены в статьях [9,10]. Рассмотренные модели разработаны с использованием дерева событий и других подходов, не учитывающих физику изменения технического состояния детали оборудования в соответствии с типовой кривой износа. Место имитационной модели детали, использующей линейную функцию изменения ТС, показано в работе [11]. Модель роста, параметры которой обеспечивают управление функцией изменения отклика, приведена в работе [12].

**Цель (задачи) исследования**

Целью данной работы является разработка математической модели, обеспечивающей имитацию изменения ТС детали, в виде типовой кривой износа. На результат работы модели накладывает ограничения:

- ТС детали во времени может только ухудшаться;
- для управления моделью ее параметры должны отражать физические характеристики процесса износа (начальное и предельное ТС, минимальную и максимальную интенсивность износа и т.д.);
- учитывая стохастический характер изменения ТС реальной детали, разработанная математическая модель должна быть стохастической.

**Основной материал исследования**

Результатом работы имитационной модели являются сгенерированные точки кривой изменения ТС детали  $y=f(t)$ , рис. 1а. В процессе генерации точек используется зависимость интенсивности  $I$  от ТС,  $I=(y)$  рис. 1б.

Построение функции  $I=(y)$  выполнено на основе модели роста [12]. Ее отличительной особенностью являются физические характеристики параметров. Использование модели роста обеспечивает учет ограничений, накладываемых физикой процесса изменения  $Y=f(t)$  соответствующего типичной кривой износа:

• первая производная функции  $y=f(t)$  (интенсивность) на всем интервале изменения  $Y$  не должна менять знак (в рамках одной реализации состояние может только ухудшаться);

• начало функции (новая деталь) должно соответствовать заданным значениям  $ТС_{y_0}$  и времени  $T_0$ ;

• окончание функции (предельное состояние детали) должно соответствовать заданному значению  $ТС_{y_{np}}$  и сгенерированному значению  $T_{отк}$ .

Для использования модели роста при построении функции интенсивности  $I=(y)$  в точке  $E$  экстремума она разделена на два участка, соответствующих: новой детали; изношенной детали.

Каждый участок описывается собственной моделью роста:

$$I = \begin{cases} I_E - (Y_E - Y_i) \frac{I_0 - I_E}{Y_0 - Y_E} K_0^{\frac{Y_i - Y_0}{Y_E - Y_0}}, & \text{при } Y_0 < Y_i < Y_E \\ \text{участок} \\ \text{новой детали} \\ \text{ОП} \\ I_E - (Y_E - Y_i) \frac{I_E - I_{np}}{Y_E - Y_{np}} K_{np}^{\frac{Y_i - Y_{np}}{Y_{np} - Y_E}}, & \text{при } Y_E < Y_i < Y_{np} \\ \text{участок} \\ \text{изношенной детали} \\ \text{ПР} \end{cases}$$

Предлагаемая функция интенсивности ТС  $I=(y)$  содержит параметры, имеющие физический смысл:  $Y_0, I_0$  – ТС и интенсивность его изменения в случае новой детали;  $Y_{np}, I_{np}$  – ТС и интенсивность его изменения достигшей предельного состояния и требующей замены;  $Y_E, I_E$  – ТС и минимальная интенсивность его изменения (экстремум);  $K_0$  – коэффициент кривизны функции при ТС на участке новой детали;  $K_{np}$  – коэффициент кривизны функции при ТС детали на участке изношенной детали.

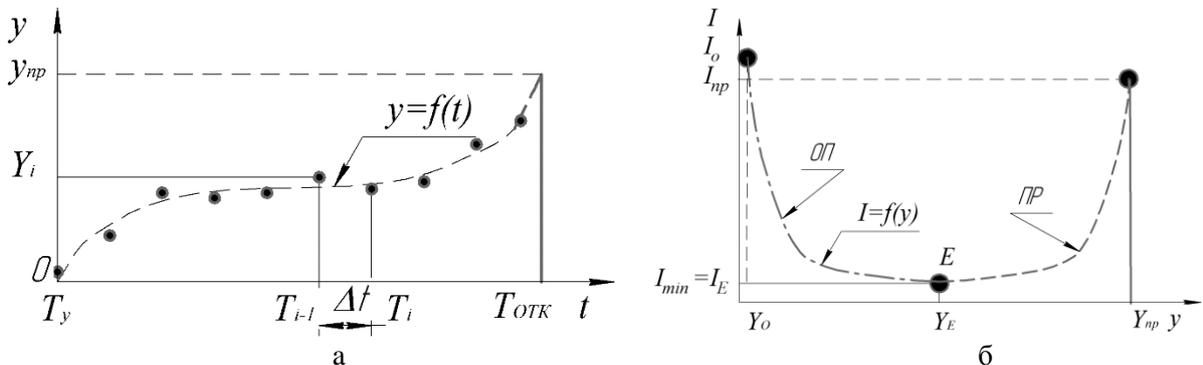


Рис. 1. Кривая изменения технического состояния:  
а – типичная кривая ТС; б – кривая интенсивности изменения ТС

Как известно, свойства детали и условия ее эксплуатации носят стохастический характер. Это приводит к различию значений параметров функции для каждой реализации детали. Однако, рассматривая случай использования текущей реализации детали при производстве одного сортамента продукции можно считать значения параметров функции детерминированными.

Учет стохастического характера параметров потребовал их представления с использованием законов распределения. Принимая нормальный закон распределения значений параметров, каждый из них представлен парой показателей с индексами:  $M$  – математического ожидания;  $V$  – коэффициента вариации. Например, в случае ТС в точке экстремума имеем показатели:  $M_{YE}$  – математическое ожидание;  $V_{YE}$  – коэффициент вариации.

Определение детерминированных значений параметров текущей реализации детали выполняется с использованием собственного генератора RANDOM случайных чисел (0..1) для каждого параметра функции интенсивности. Например, для ТС в точке экстремума случайное число  $R_{YE}=(RANDOM_{YE})$ . В результате имеем случайное значение ТС в точке экстремума интенсивности как функцию от трех переменных  $Y_E=f(M_{YE}, V_{YE} *R_{YE})$ , определяемое по правилам нормального закона распределения.

Аналогичным образом определяются значения всех прочих параметров функции интенсивности за исключением  $Y_{ПР}$ , который является детерминированным и неизменным для любой реализации детали. Таким образом, использование генератора RANDOM обеспечивает получение уникальных параметров сгенерированной функции интенсивности для каждой реализации детали.

На рассматриваемой реализации детали  $y=f(t)$  для определения значения  $Y_j$  в очередной  $j$ -й точке от заданного значения  $T_j$  используется сгенерированная функция интенсивности  $I=f(y)$  и координаты известной (начальной) точки  $(Y_{j-1}, T_{j-1})$ . Поставленная задача решается методом последовательного приближения к моменту времени  $T_j$  с шагом  $\Delta Y$  по функции интенсивности  $I=(y)$ .

Начальные значения на первом шаге  $k=1$  приближения принимаются равными  $Y_{k-1}=Y_{j-1}$ ,  $T_{k-1}=T_{j-1}$ . Расчетное значение интенсивности в середине  $k$ -го шага приближения составит

$$I_k=f(Y_{k-1} +\Delta Y/2),$$

а ТС в конце  $k$ -го шага составит

$$Y_k=Y_{k-1}+\Delta Y.$$

Ему соответствует продолжительность  $k$ -го шага приближения:

$$\Delta t_k = \frac{\Delta Y}{k}.$$

и срок окончания шага

$$T_k = T_{k-1} + \Delta t_k.$$

При выполнении условия  $T_k < T_j$  реализуется очередной  $k=k+1$ -й шаг итерации.

При выполнении условия  $T_k \geq T_j$ , используя линейную модель между последними точками, определяется ТС  $Y_j$ , соответствующее заданному моменту времени  $T_j$

$$Y_j = Y_k - \frac{\Delta Y(T_k - T_j)}{T_k - T_{k-1}}.$$

В случае, если на очередном  $k$ -м шаге приближения будет превышено предельное ТС  $Y_k \geq Y_{ПР}$  считается, что текущая реализация достигла предельного состояния (деталь отказала). Момент времени отказа детали при достижении предельного состояния определяется из выражения

$$T_{ПР} = T_k - \frac{\Delta t_k(Y_k - Y_{ПР})}{\Delta Y}.$$

Таким образом определяется момент времени  $T_{ПР}$  окончания эксплуатации текущей детали.

Первый вариант верификации разработанной имитационной модели выполнен для параметров, описанных нормальным законом распределения. Рассмотрены три случая кривой изменения ТС  $y=f(t)$  для нулевого и предельных значений коэффициента вариации  $V$  параметров функции  $I=f(y)$  (табл. 1).

Используя параметры имитационной модели для различных  $V$  сгенерированы функции  $I=f(y)$  и на ее основе  $y=f(t)$  (рис. 2).

Табл. 1. Параметры имитационной модели для различных  $V$

Коэффициент вариации (условия эксплуатации)	Параметры имитационной модели							
	$Y_0$	$I_0$	$Y_{ПР}$	$I_{ПР}$	$Y_E$	$I_E$	$K_0$	$K_{ПР}$
-1/3 (легкие)	0,33	0,27	20	0,50	6,67	0,041	0,27	2,00
0 (средние)	0,50	0,41	20	0,75	10,00	0,061	0,40	3,00
1/3 (тяжелые)	0,66	0,56	20	1,00	13,30	0,081	0,53	4,00

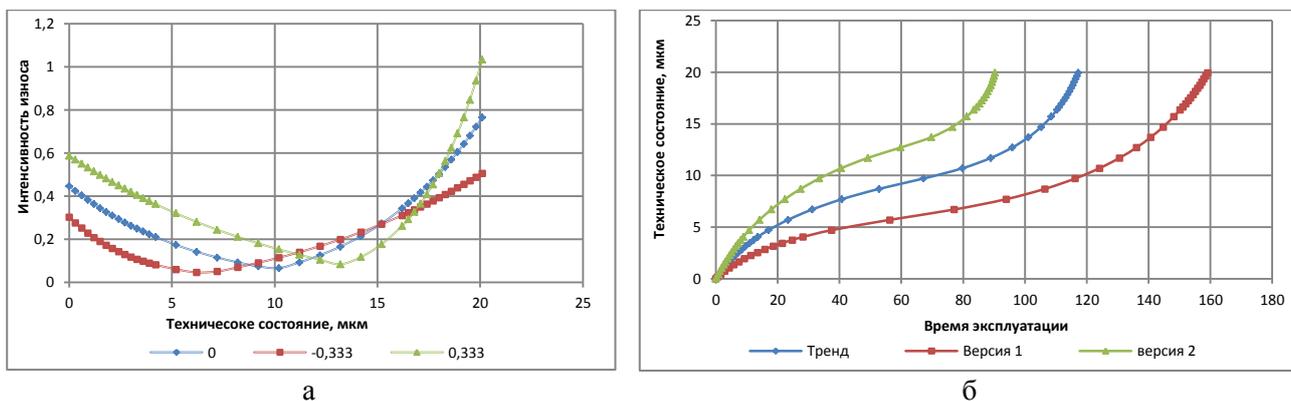


Рис. 2. Сгенерированные функции  $y=f(t)$  для различных условий эксплуатации  
 а – функция -  $I=f(y)$ ; б – функция -  $y=f(t)$

Табл. 2. Параметры имитационной модели для различного характера изменения интенсивности

Вид интенсивности	Параметры имитационной модели							
	$Y_0$	$I_0$	$Y_{PP}$	$I_{PP}$	$Y_E$	$I_E$	$K_0$	$K_{PP}$
Constant	0,3000	0,4100	0,4100	20	10	0,4100	1,00000	1
Линейная	0,5000	0,4100	0,7500	20	10	0,0610	1,00000	1
Средняя нелинейность	0,2329	0,1801	0,6167	20	10	0,0569	0,50000	5
Высокая нелинейность	0,1697	0,3955	0,3216	20	10	0,0650	0,00001	100000

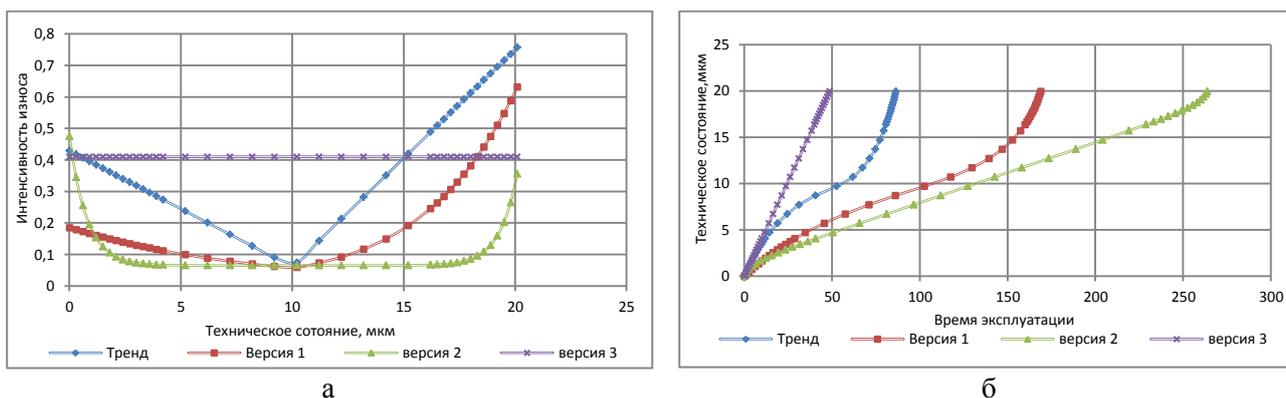


Рис. 3. Сгенерированные функции  $y=f(t)$  для различного характера изменения интенсивности  
 а – функция -  $I=f(y)$ , б – функция -  $y=f(t)$

Анализ сгенерированных функций  $y=f(t)$  показывает их подобие типовым кривым износа. При этом можно видеть увеличение срока службы детали при переходе от тяжелых условий эксплуатации к легким при прочих неизменных факторах.

Во втором варианте верификации рассматривалась чувствительность имитационной модели к характеру изменения интенсивности  $I=f(y)$ . Рассмотрены четыре случая, параметры моделей для которых приведены в табл. 2.

Используя значения параметров имитационной модели для различного характера изменения интенсивности, сгенерированы функции  $I=f(y)$  и на их основе  $y=f(t)$  (рис. 3).

Анализ сгенерированных функций  $y=f(t)$  показывает их подобие типовым кривым износа. При этом можно видеть возможность, управляя параметрами функции  $I=f(y)$  получать различные

соотношения размеров участков типовой кривой износа: приработка; нормальная работа; ускоренный износ.

**Выводы**

- 1) Предложенная имитационная модель, обеспечивает генерацию точек, соответствующих типовой кривой износа.
- 2) Параметры модели отражают физические условия эксплуатации детали и ее свойств через интенсивность изменения технического состояния.
- 3) Изменение значений параметров модели обеспечивает управление функцией изменения технического состояния детали.
- 4) Параметры имитационной модели детали описываются законами распределения, что соответствует стохастическим условиям ее эксплуатации.

**Список литературы**

1. Патент РФ №G01M13/04, 10.09.2009. Испытание подшипников // Патент России №2366917. / Станчев Д.И., Шабанов В.В.
2. Серебрянский А. И., Абрамов В. В., Картамышев К. С. Стенд для исследования на трение и износ подшипников скольжения// Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – №4-3(9-3). Т.2 – С.252–257.
3. ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016 Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство
4. Ковтун Л. И., Крюков О. В., Саушев А. В., Антоненко С. И. Аналитико-статистический метод оценки состояния и прогнозирования рисков сложных технических систем// Труды международного симпозиума «надежность и качество». – 2020. – Т.1 – С.264-269.
5. Кулешов С. С., Косарев В. П., Меренков О. А. Оценка технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса грузоподъемных машин// Издательство «Научная артель». – 2016. – №1-2 – С.91–93.
6. Сидоров В. А. Донецкий национальный технический университет Журнал Prostoev.NET №1(10) 2017.
7. Эльберг М. С. Э530 Имитационное моделирование : учеб. пособие / М.С. Эльберг, Н.С. Цыганков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 128 с.
8. Власов М. В. В 58 Имитационное моделирование: учебно-методическое пособие для подготовки к лекционным и практическим занятиям / М.В. Власов; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ). – 2016. – 60 с.
9. Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л. Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования // Информационно-управляющие системы. – 2016. – №4(93). – С. 34-43.
10. Николайчук О. А., Берман А. Ф., Павлов А. И. Прогнозирование технического состояния опасных объектов методом имитационного моделирования// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – №2. – С. 134-142.
11. Ченцов Н. А. Программная реализация генератора изменения технического состояния детали оборудования / Н.А. Ченцов, С.Л. Сулейманов // Инновационные перспективы Донбасса : материалы междунар. научн.-практ. конф., 20-22 мая 2015 г. Т.3 : Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов - Донецк , 2015. – С. 60-63.
12. Использование модели роста для аппроксимации функций, определяемых износом детали Ченцов Н.А., Сулейманов С.Л. - С. 53-56.
13. Материалы международной научно-технической конференции: в 2-х частях Ответственный за выпуск О.А. Белов. – Том. Часть 2 сборник трудов конференции Камчатский государственный технический университет (Петропавловск-Камчатский).

**N.A. Chentsov /Dr. Sci. (Eng.), S.L. Suleimanov**  
 Donetsk National Technical University (Donetsk)

**RESOURCE SIMULATION MODEL OF EQUIPMENT PART**

**Background.** Among the tasks of the repair service of a metallurgical enterprise, one can single out a group that involves the use of statistics reflecting the change in the technical condition (TS)  $Y$  and failures of equipment parts. Such tasks are aimed at: predicting the timing of failure; planning the need for spare parts; formation of a repair plan, etc. Various approaches to the formation of statistics are known, among which one should choose and develop ways of implementing the most effective one. Simulation mathematical models of parts are widely used.

**Materials and/or methods.** The basic materials for the study are the principles of constructing a mathematical simulation model of the object and a typical curve of the wear of a part. The center of the model is the function of the wear rate of the part, depending on its technical condition. The function is described using a growth model, the parameters of which are of a physical nature. Generation of the period for reaching a given technical state is performed by the method of successive approximation. Using the model, you can get several sequentially located points of the technical condition for one implementation of the part.

**Results.** The mathematical apparatus of the resource simulation model of the part has been developed, which makes it possible to generate a change in its technical state. The use of the model pro-

vides the formation of statistics, diagnostics and failures for a given number of realizations of the part.

**Conclusion.** The proposed simulation model provides the generation of points of change in the technical state of the part corresponding to the typical wear curve. The parameters of the model reflect the physical operating conditions of the part and its properties through the intensity of changes in the technical state. Changing the values of the model parameters provides control over the function of changing the technical state of the part.

**Keywords:** equipment part, technical condition, typical wear curve, simulation model.

**Сведения об авторах**

**Н.А. Ченцов**

SPIN-код: 1855-3909  
 Телефон: +380 (71) 317-20-97  
 Эл. почта: cheneam7@gmail.com

**С.Л. Сулейманов**

Телефон: +380 (71) 368-98-57  
 Эл. почта: nugnas@gmail.com

