

**Н.Ю.ЛАМНАУЭР**, канд. техн. наук, **О.Д. ПТАШНЫЙ**, канд. пед. наук,  
**Ю.И. СОЗОНОВ**, канд. техн. наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ИЗДЕЛИЙ

Запропонована модель надійності виробів, що обертаються, яка враховує внутрішні та зовнішні впливи. Знайдені оцінки параметрів цієї моделі, які дозволяють розв'язувати ряд практичних задач, пов'язаних з питаннями надійності виробів.

The model of reliability of wares which are revolved is offered which takes into account the internal and external influencing. Estimations of parameters of this model are found which allow to settle the row of the practical tasks related to the questions of reliability of wares.

**Введение.** Неуклонное повышение качества продукции является одной из составляющих успешного выхода Украины на мировой рынок. Качественной должна быть продукция во всех областях народного хозяйства, а в машиностроении особенно, так как именно машиностроение является его основой. Поэтому основной задачей современного машиностроения является получение продукции заданного качества с минимальными затратами. Качество изготовления продукции определяется совокупностью свойств, процессом ее изготовления, соответствием этого процесса и его результатов установленным требованиям.

Показатели качества машин имеют изменчивый характер, что является следствием погрешностей изготовления деталей и дополнительных изменений показателей их качества за счет технологии изготовления. Так, для вращающихся изделий погрешности приводят к изменению динамического качества машин, появлению вибраций, шума, искажению поверхностей контакта и других нежелательных явлений. Все это усиливается за время работы машины и, как следствие, приводит к потере надежности и долговечности, а при достижении ими предельных значений приводит к аварии.

Так как 80% изделий машиностроения имеют узлы, которые вращаются [1], то актуальной является задача обеспечения качества вращающихся соединений. Одна из основных задач машиностроения – создание изделий с высокими качественными показателями – не может быть решена без развития науки о надежности и долговечности машин. Поэтому основной задачей, стоящей перед производителями в области повышения качества изделий машиностроения, стала необходимость создания стройной математико-статистической теории надежности вращающихся изделий. Данная теория должна связывать в единое целое теоретические и прикладные задачи обеспечения надежности.

Поскольку надежность и долговечность машины – это ее «динамика качества», так как рассматривается изменение качества машины во времени, то вредные процессы, приводящие к отказам, классифицируют по скорости их протекания и рассматривают картину взаимодействия машины с этими процессами [2].

Вредные процессы могут возникать как в самом изделии, так и быть результатом внешних воздействий на это изделие. Если уровень внешних или внутренних воздействий превзойдет некоторое критическое значение, то изделие может перестать функционировать, т. е. произойдет нарушение его работоспособности.

Известно также, что при возникновении колебаний в изделии имеется обратная связь между его упругой системой и данным рабочим процессом или трением, которые являются источником колебаний, т. е. возникают автоколебательные процессы.

Статистические данные о потере работоспособности изделия при правильной методике сбора и обработки информации дают достоверные сведения о надежности и долговечности изделия данного типа с учетом реальных условий эксплуатации.

Аналитические расчеты являются тем источником информации о будущем поведении изделия. Только расчетным путем можно судить о надежности будущего изделия на стадии его проектирования, до минимума свести время, необходимое для определения показателей надежности и долговечности изделий, выявить основные взаимосвязи между показателями надежности и параметрами, характеризующими конструкцию, технологию и методы эксплуатации изделия.

Однако в настоящее время нет методики и даже общей схемы исследования вращающихся изделий на надежность и долговечность. Такое положение объясняется чрезвычайной сложностью проблемы расчета изделия на надежность и долговечность. Эта сложность связана с разработкой самих методов расчета и с построением принципиальной схемы расчета на надежность и долговечность.

В основе инженерной задачи по определению параметров изделия с учетом износа, коррозии, усталости и др. лежат физические процессы, приводящие к потере работоспособности машины с течением времени. Но без знания законов протекания процессов нельзя вести расчеты по оценке скорости потери данным узлом работоспособности, нельзя решить задачу прогноза поведения данной системы.

Расчет должен оценить вероятность возникновения отказов в результате двух различных причин – от действия вредных процессов, возникающих в изделии (постепенные отказы) и от случайных внешних или внутренних воздействий, связанных с колебательным процессом вращающегося изделия. Соответственно имеется два потока информации, которую надо получить для расчета показателей надежности. При расчете постепенных отказов должен быть положен физический закон потери материалом начальных свойств.

Например, зависимость интенсивности износа от физико-механических и геометрических характеристик материала и режимов работы пары. Так, для простейшего, однако широко распространенного случая износа деталей машин М.М. Хрущевым и Е.С. Берковичем установлен закон о пропорциональности износа удельным нагрузкам и пути трения и его зависимость от микротвердости материала [3].

Кроме постепенных отказов, для вращающихся изделий имеются пиковые нагрузки со случайной амплитудой и частотой, вызванные биением. Примером таких изделий могут служить подшипники качения, зубчатые колеса и ряд других изделий, имеющих биение в процессе вращения.

**1. Модель надежности вращающихся изделий.** Проведенный анализ [4] показал, что имеющиеся процессы, связанные с износом и другими внутренними процессами, позволяют приближенно описать прочность изделия за время  $t$  в виде

$$R(t) = r \exp(-bt), \quad (1)$$

где  $r$  – начальная прочность изделия,  $b$  – параметр, характеризующий величину внутреннего отрицательного процесса.

Примем, что последовательность импульсов нагрузки, связанная с биением есть случайная величина, имеющая равномерный закон распределения

$$F(t) = \frac{b-t}{b-a}, \quad (a \leq t \leq b) \quad (2)$$

где  $a$  – нижний порог нагрузки, а  $b$  – верхний порог нагрузки, вызванной биением вращающегося изделия. Отсюда из [5] получаем, что интенсивность отказов  $I(t)$ , происходящих от превышения нагрузки импульсов над прочностью, имеет вид:

$$I(t) = h(t) \int_{R(t)}^{\infty} F(x) dx, \quad (3)$$

где  $h(t)$  – частота появления импульсов нагрузки.

Распределение (2) имеет верхний порог  $b$ , поэтому функция надежности  $I(t)$  вращающегося изделия имеет нижний порог ресурса

$$t_0 = \frac{1}{b} \ln \frac{r}{b}. \quad (4)$$

Отметим, что определение нижнего порога ресурса изделия и сравнение полученных показателей с заданными техническими условиями позволяет оценить уровень надежности данного изделия и при необходимости указать пути улучшения этих показателей.

Отсюда принимая, что частота  $h(t)$  постоянная и равна  $h$ , получаем функцию надежности из (4), (3), (2) и (1)

$$I(t) = \exp\left(-\int_{t_0}^{\infty} I(t)\right) = \exp\left[-\frac{h \left( bt - \frac{b \ln\left(\frac{r}{b}\right) - \frac{b}{b} + \frac{re^{-bt}}{b} \right)}{b-a}\right]. \quad (5)$$

Функция плотности распределения наработки изделия до отказа имеет вид (рис. 1)

$$f(t) = -I'(t) = \frac{h(b - re^{-bt})}{b-a} \cdot I(t). \quad (6)$$

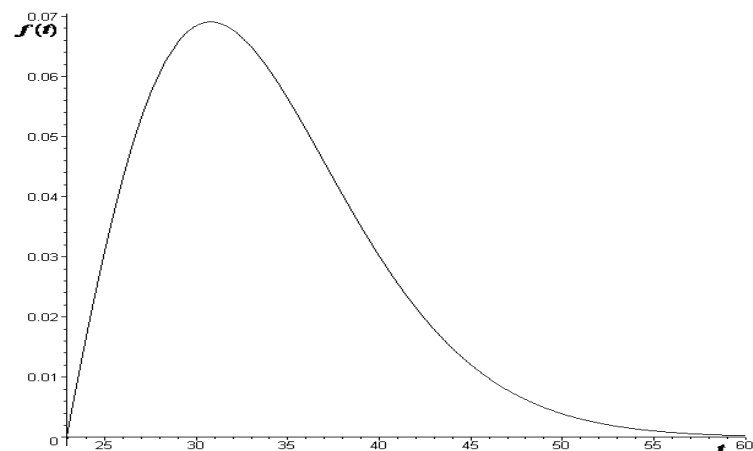


Рис. 1. Плотность распределения наработки до отказа вращающегося изделия при  $a=0$ ,  $b=2$ ,  $h=0,4$ ,  $r=5$ .

**2. Оценка параметров модели надежности вращающихся изделий.** Любая модель, какая бы адекватная она ни была, не является рабочей до тех пор, пока не будут найдены оценки ее параметров. Поэтому найдем ненаблюдаемые параметры  $r$  и  $b$  модели (6). Параметры  $a$ ,  $b$  и  $h$  могут быть найдены экспериментально, где оптимальные оценки с минимальной дисперсией параметров  $a$  и  $b$  определяются по формулам [6]:

$$a^* = \frac{nx_{(1)} - x_{(n)}}{n-1}, \quad b^* = \frac{nx_{(n)} - x_{(1)}}{n-1}, \quad (7)$$

где  $n$  – число экспериментов, определяющих величины пиковых нагрузок;  $x_{(n)}$  – наибольшая величина нагрузки,  $x_{(1)}$  – наименьшая величина нагрузки.

Частота  $h$  обычно задается или легко считывается как среднее ее значение.

Итак будем считать, что имеется двухпараметрическое распределение (6) с параметрами  $r$  и  $b$ . Математическое ожидание этого распределения имеет вид

$$M(T) = \frac{e^{\frac{hb}{2(b-a)b}}}{b(bb-ab+hb)} \cdot \left( \frac{hb}{(b-a)b} \right)^{-\frac{hb}{2(b-a)b}-2} \left\{ hbW_{\frac{hb}{2(b-a)b}, \frac{hb}{2(b-a)b} + \frac{1}{2}} \left( \frac{hb}{(b-a)b} \right) + \right. \\ \left. (b(b-a)+hb)W_{\frac{hb}{2(b-a)b}+1, \frac{hb}{2(b-a)b} + \frac{1}{2}} \left( \frac{hb}{(b-a)b} \right) \right\} + \frac{1}{b} \ln \frac{r}{b}, \quad (8)$$

где  $W_{x,y}(z)$  – функция Уиттекера [7].

Функция распределения наименьшего члена выборки объема  $m$  имеет вид [8]  $F_1(t) = 1 - (\mathbf{1}(t))^m$ , а плотность распределения наименьшего члена выборки  $f_1(t) = -m(\mathbf{1}(t))^{m-1} \mathbf{1}'(t)$ . Тогда модальное значение наименьшего члена выборки определяется из уравнения

$$(m-1)(\mathbf{1}'(t))^2 + \mathbf{1}(t)\mathbf{1}''(t) = 0. \quad (9)$$

Для модели (5) уравнение (9) имеет решения

$$t_{\text{mod}(1),1} = \frac{-1}{b} \ln \frac{2bhm + b(b-a) + \sqrt{4bbhm(b-a) + b^2(b-a)^2}}{2hmr}, \\ t_{\text{mod}(1),2} = \frac{-1}{b} \ln \frac{2bhm + b(b-a) - \sqrt{4bbhm(b-a) + b^2(b-a)^2}}{2hmr}.$$

Модальное значение наименьшего значения выборки должно быть больше нижнего порога ресурса (4). Поэтому выбираем значение  $t_{\text{mod}(1),2}$ . Принимая модальное значение  $t_{\text{mod}(1),2}$  за наименьшее значение выборки  $t_{(1)}$ , находим оценку начальной прочности  $r$

$$r = \frac{e^{bt_{(1)}} [2bhm + b(b-a) - \sqrt{4bbhm(b-a) + b^2(b-a)^2}]}{2hm}. \quad (10)$$

Оценку параметра  $b$  находим из формулы математического ожидания  $M(T)$  (8), принимая его за средний ресурс  $\bar{t}$ .

$$\bar{t} - t_{(1)} = \frac{e^{\frac{hb}{2(b-a)b}}}{b(bb-ab+hb)} \cdot \left( \frac{hb}{(b-a)b} \right)^{-\frac{hb}{2(b-a)b}-2} \left\{ hbW_{\frac{hb}{2(b-a)b}, \frac{hb}{2(b-a)b} + \frac{1}{2}} \left( \frac{hb}{(b-a)b} \right) + \right. \\ \left. (b(b-a)+hb)W_{\frac{hb}{2(b-a)b}+1, \frac{hb}{2(b-a)b} + \frac{1}{2}} \left( \frac{hb}{(b-a)b} \right) \right\} + \\ \frac{1}{b} \ln \frac{2bhm + b(b-a) - \sqrt{4bbhm(b-a) + b^2(b-a)^2}}{2bhm}. \quad (11)$$

Трансцендентное уравнение (11) имеет однозначное решение и достаточно легко решается. Так, например, в системе Maple при  $m=30$ ,  $a=2$ ,  $b=2,5$ ;  $t_{(1)}=100$ ,  $\bar{t}=150$  и  $h=0,36$  имеем  $b=0,0002566791704$  и  $r=2,559414288$ . Откуда оценка нижнего порога ресурса  $t_0=91,50608697$ .

#### Выводы

1. Предложена физико-статистическая модель надежности вращающихся изделий, учитывающая процесс биения.
2. Найденные некоторые числовые характеристики данной модели, и на их базе предложены оценки параметров данной модели.
3. Поскольку данная модель использует результаты наблюдений, то она может быть применима при различных скоростях процесса вращения и внутренних отрицательных процессах.

**Список литературы:** 1. Дальский А.М., Кулешова З.Г. Сборка высокоточных соединений в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1988. – 304 с. 2. Дальский А.М., Котова Г.А., Никитский В.С. Комплексный метод оценки надежности шпиндельных узлов прецизионных станков. // Станки и инструмент. – 1969. – № 6. – С.5-7. 3. Хрущев М. М., Беркович Е. С. Точное определение износа деталей машин // АН СССР. Ин-т машиноведения – М.: АН СССР, 1953. – 116 с. 4. Мур Д. Ф. Основы и применения трибоники. – М.: Мир, 1978. – 487 с. 5. Резниченко Н.К., Созонов Ю. И. Надежность многовитковых индукторов // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2005. – Вып. 39. – С.22-28. 6. Ламнауэр Н.Ю. Экономический вопрос выбора технологии финишной обработки изделий в машиностроении // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2008. – Вып. 1. – С.113-120. 7. Уиттекер Э. Т., Ватсон Д. Н. Курс современного анализа. Часть вторая: Пер. с англ. / Под ред. Ф.В. Широкова – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1963. – 516 с. 8. Дейвид Г. Порядковые статистики: Пер. с англ. / Под ред. В.В.Петрова – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 336с.

Поступила в редколлегию 09.10.08