

УТОЧНЕНИЕ ВИДА МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Деркач А.В

(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Описание проблемы и ее актуальность

Одним из основных показателей надежности, определяющим эффективность эксплуатации оборудования, может служить вероятность безотказной работы по критерию прочности. Для ее оценки необходимо знать законы распределения предельной величины X_{lim} и расчетного напряжения или нагрузки X_{tec} .

В качестве предельной величины могут быть приняты напряжения: предел прочности, предел пропорциональности, предел текучести или нагрузка - несущая способность детали, узла. Значение X_{lim} определяется свойствами используемого конструкционного материала, конфигурацией детали и является достаточно стабильной величиной с относительно небольшим рассеиванием. Расчетное напряжение или нагрузка изменяются в довольно широком диапазоне, поскольку определяются меняющимися требованиями технологии производства и номенклатурой продукции. Особенно это характерно для механического оборудования прокатных станов, марочный и геометрический сортамент которых меняется в широких пределах. Очевидно, что вероятность неразрушения так же будет меняться в зависимости от изменений реального эксплуатационного режима нагружения, описываемого $p_2(X_{tec})$. Эта особенность должна найти отражение в модели отказов.

Исследования [1] показали, что для механического оборудования металлургического производства ошибка при определении показателей надежности в 26% обусловлена 10% погрешностью определения максимальной нагрузки Q_{max} . Последняя величина непосредственно зависит от адекватности модели нагружения реальному эксплуатационному режиму нагружения. Вынужденное завышение запасов прочности может приводить к увеличению массы проектируемого оборудования на 10–20%. Данные [1] подтверждают существенность влияния распределения технологических нагрузок Q_{tec} на показатели надежности оборудования.

Состояние вопроса и постановка задачи исследования

В известных методиках оценки параметров надежности [2, 3] принимается допущение о нормальном распределении $p_1(X_{lim})$, $p_2(X_{tec})$ (индекс 1 относится к несущей способности, а 2 – к реализациям технологической нагрузки) и о возможности описания закона распределения отказов так же нормальным распределением. Оговаривается возможность использования распределения Вейбулла, однако утверждения о виде модели имеют характер эмпирического обобщения. Для этих случаев решение задач надежности носит тривиальный характер и обладает достаточной для практического использования точностью.

Для случаев, когда распределение нагрузок не подчиняется нормальному закону, решение задачи в общем виде неизвестно. Необходимо учесть, что выводы о виде модели основаны, как правило, на проверке по критериям согласия и вопрос о качестве моделей, удовлетворительно прошедших тест, остается открытым, что так же является недостатком используемого метода идентификации. Случаи, когда распределение нагрузок не подчиняется нормальному закону, достаточно часты [4].

Целью настоящего исследования является обоснование вида модели отказов по критерию прочности механического оборудования прокатных станов на ранних этапах

проектирования при распределении несущей способности, не подчиняющихся нормальному закону.

Модели отказов для условий нагружения механического оборудования прокатного стана

В соответствии с поставленной в работе целью представляется оправданным использовать при исследованиях в качестве предельной величины несущую способность, а не напряжения, поскольку в техническом задании на проектирование заданы технологические режимы и соответствующие им нагрузки. Этим выбором обеспечивается возможность оценки влияния требований технологии на надежность использования оборудования.

Разрушение детали происходит при выполнении условия

$$\hat{Q}_{tec} > \hat{Q}_{lim}$$

где $\hat{Q}_{tec}, \hat{Q}_{lim}$ - реализованные значения технологической нагрузки и несущей способности детали.

Ввиду наличия случайной компоненты в указанных величинах их распределения описывается различными функциями ($p_1(Q_{tec}), p_2(Q_{lim})$) со своими средними $\bar{Q}_{tec}, \bar{Q}_{lim}$ ко-

эффициентами вариации и другими параметрами.

В [5] на основании анализа экспериментальных данных о нагруженности доказано, что распределение сил и моментов прокатки в пропусках и схемах описывается двусторонним экспоненциальным распределением (1), обладающим свойствами, отличными от свойств нормального распределения: эксцесс E , а, следовательно, квантильный коэффициент t (2), от него зависящий, существенно отличается от используемого в случае принятия гипотезы о нормальном распределении случайной величины (рис. 1):

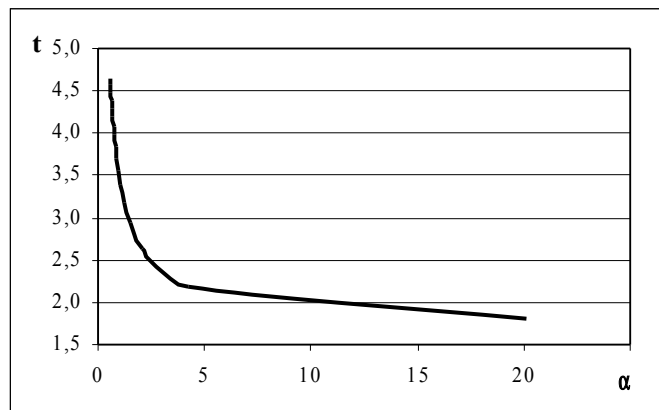


Рис. 1. Квантильный коэффициент для распределения (1) при $P_d = 3$

$$p_2(Q_{tec}) = \frac{\alpha_2}{2\lambda_2\sigma_{tec}\Gamma(1/\alpha_2)} e^{-\left|\frac{Q - \bar{Q}_{tec}}{\sigma_2\lambda_2}\right|^{\alpha_2}}, \quad (1)$$

где $\lambda_2 = \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha_2)}{\Gamma(3/\alpha_2)}}$;

α_2 – параметр формы распределения;

$\sigma_{tec} = v_{tec}\bar{Q}_{tec}$ – среднее квадратичное отклонение технологической нагрузки;

v_{tec} – коэффициент вариации технологической нагрузки

$$t = 1,62 \left[3,8(E - 1,6)^{2/3} \right] \lg \lg |1/(1 - P_d)|, \quad (2)$$

где P_d – доверительная вероятность (при $P_d = 0,9973$ эксцесс $E = 3$ для нормального распределения).

В работе исследован случай, характеризуемый условиями, соответствующими условиям нагруженности прокатного оборудования листовых станов (табл. 1).

Таблица 1. Параметры вероятностной модели технологической нагрузки

Значения параметра формы α_2 , возможная реализация (по условиям ТЛС 3000).			
1	2	5	20
Распределение Лапласа, при постоянной загрузке главных приводов рабочей клетки	Распределение Гаусса, контролируемая прокатка, чистовая клетка	Распределение плосковершинное, высокотемпературная прокатка, черновая клетка	Распределение, близкое к равновероятному, высокотемпературная прокатка, черновая клетка
Коэффициенты вариации v_{tec} технологической нагрузки, возможная реализация			
0,05...0,10		0,15...0,25	
контролируемая прокатка; прокатка в чистовой клетке		высокотемпературная прокатка; прокатка в черновой клетке	

Распределение несущей способности описано нормальным законом в соответствии с рекомендациями [3]: $\alpha_1 = 2$ (для (1)), коэффициент вариации несущей способности $v_{lim} = 0,08$ в соответствии с данными [2].

В расчетах технологическая нагрузка представлена в долях от номинальной (средней), а отнесенная к ней средняя предельная нагрузка определяет коэффициент запаса прочности по средним:

$$n_Q = \frac{Q_{lim}}{Q_{tec}}$$

Распределение вероятности отказа по критерию статической прочности при реализации спектра технологических нагрузок в виде (1) описывается выражением (3):

$$p_3(n_Q) = \int_0^{+\infty} p_1(n_Q) \left[\int_{n_Q}^{+\infty} p_2(n_Q) \right] dn_Q. \quad (3)$$

Поскольку при рассматриваемых условиях получить искомую модель отказов в компактном аналитическом виде не представляется возможным, целесообразно провести моделирование с последующей идентификацией полученного распределения. Последняя задача решается с использованием методики идентификации [6] с дополнениями [7].

В ходе моделирования исследуется влияние параметра островершинности α_2 распределения (1) и коэффициента вариации σ_{tec} на вид вероятностной модели отказов по критерию прочности. Поскольку существует большое количество вариантов комбинаций

факторов, целесообразно установить закономерности влияния приведенных параметров на закон распределения отказов на уровне тенденций.

Методика проведения численного эксперимента и обработки полученных данных

В соответствии с (3) для уровней факторов из табл.1 определены параметры, характеризующие форму закона распределения отказов: коэффициент асимметрии As (4), коэффициент контрэксцесса Ke (5), коэффициент энтропии Kh (6):

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma_{tec}^3}; \quad (4)$$

$$Ke = \sqrt{\frac{\sigma_{tec}^4}{\mu_4}}; \quad (5)$$

$$Kh = \frac{\Delta Q}{2\sigma_Q} 10^{-\sum_i n_i \lg(n_i)}. \quad (6)$$

Мерой соответствия расчетного распределения вероятности отказа по (3) и его описания вероятностной моделью в виде известного закона распределения являются абсолютные значения разности расчетных значений параметров и значений, соответствующих модели, как предложено в [7]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta As &= As - As_{model} \\ \Delta Ke &= Ke - Ke_{model} \\ \Delta Kh &= Kh - Kh_{model} \end{aligned} \right\}.$$

Для моделей в виде (1) теоретические значения топографических параметров [6]:

$$\left\{ \begin{aligned} Kh_{model} &= \sqrt{\frac{\pi e}{2}} - 5.2(1/\sqrt{3} - Ke)^2 \text{ при } Ke < 0.577 \\ Kh_{model} &= \sqrt{\frac{\pi e}{2}} - 69.4(Ke - 1/\sqrt{3})^3 \text{ при } Ke \geq 0.577 \end{aligned} \right. .$$

Для моделей, описываемых бета-распределением, теоретические значения топографических параметров [7]:

$$Kh_{model} = \frac{2.096 - 0.563|As| - 0.019As^2 - 2.655Ke}{1 - 0.266|As| - 1.26Ke}. \quad (7)$$

Численный эксперимент заключался в варьировании α_2 и σ_{tec} в соответствии с уровнями, приведенными в табл. 1. Результат моделирования – закон распределения отказов $p_3(n_Q)$. Пример варианта реализации численного моделирования приведен на рис. 2.

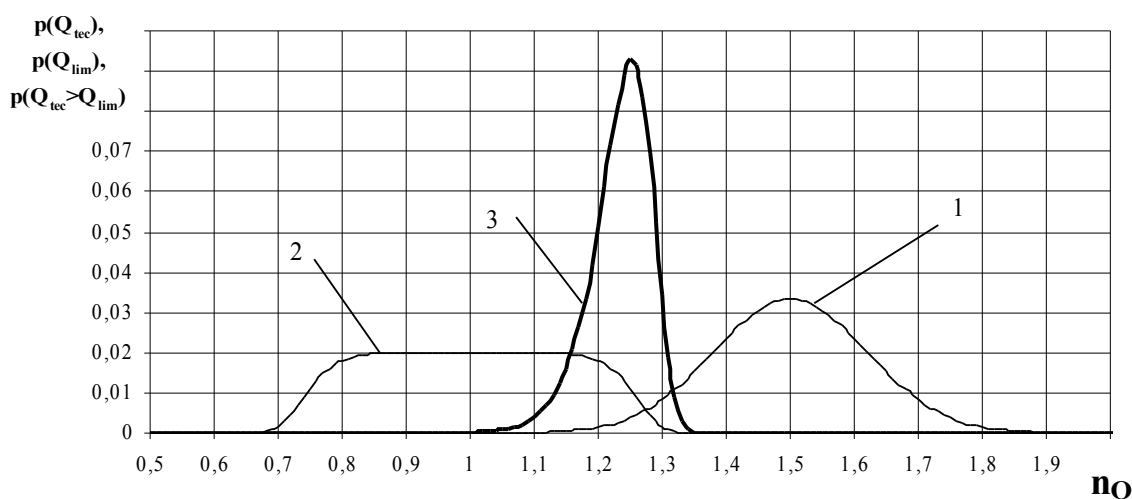


Рис. 2. Закон распределения вероятности отказов при плосковершинном законе распределения технологической нагрузки

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты моделирования закона распределения отказов представлены в табл. 2.

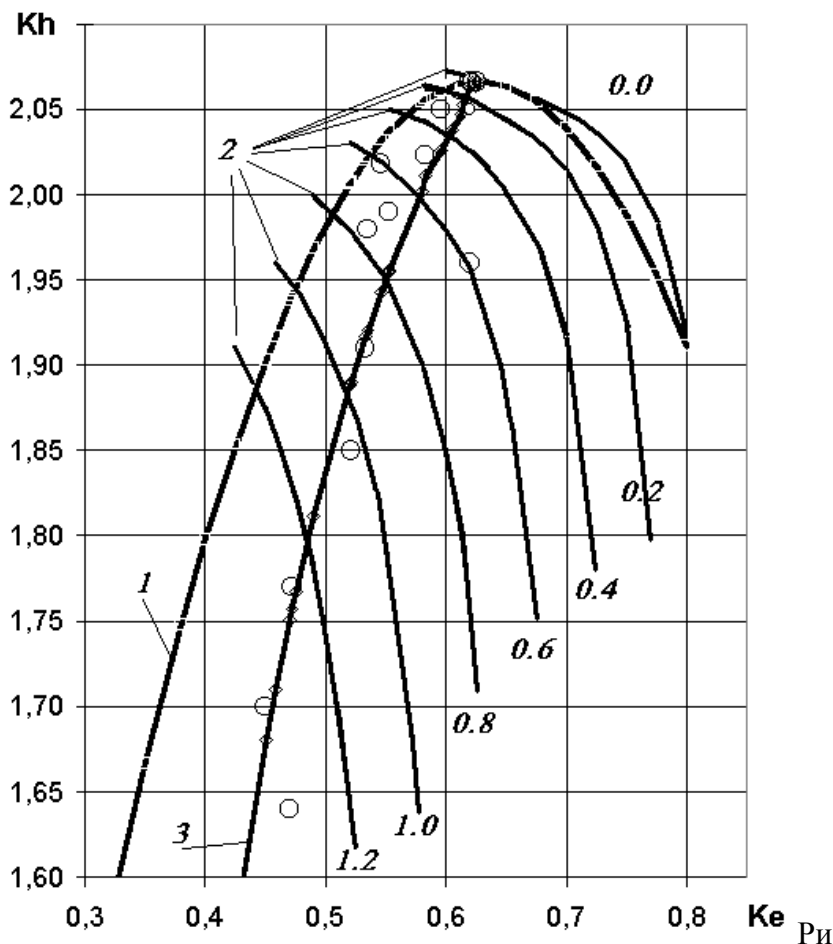
На рис. 3 представлены результаты топографической идентификации распределений отказов. Числа у кривых 2 – значения асимметрии

Таблица 2. Результаты определения топографических характеристик закона распределения отказов

α_2	v_{tec}	\bar{n}_Q	As	Ke	Kh	$\frac{\Delta Kh}{Kh}$	$\int_0^{+\infty} p_3(n_Q) dn_Q$	Возможность описания нормальным распределением
1	0,05	1,5	0,56	0,57	1,96	-0,004	0,00011	-
2	0,05	1,5	0,00	0,577	2,066	0,000	0,00012	+
5	0,05	1,5	-0,96	0,484	1,915	0,019	6,11E-05	-
20	0,05	1,5	-1,49	0,421	1,639	0,191	5,92E-05	-
1	0,10	1,5	0,29	0,546	2,051	0,001	0,00192	$\bar{\mp}$ -
2	0,10	1,5	0,02	0,577	2,066	0,000	0,00076	+
5	0,10	1,5	-0,70	0,503	1,991	0,004	0,00046	-
20	0,10	1,5	-1,51	0,400	1,700	0,126	0,00039	-
1	0,15	1,5	0,57	0,496	2,018	-0,003	0,00891	-
2	0,15	1,5	0,07	0,573	2,065	0,001	0,00498	+
5	0,15	1,5	-0,52	0,533	2,024	0,004	0,00279	-
20	0,15	1,5	-1,35	0,422	1,766	0,063	0,00223	-
1	0,20	1,5	0,80	0,476	1,976	0,002	0,02162	-
2	0,20	1,5	0,17	0,562	2,061	0,002	0,01690	+
5	0,20	1,5	-0,31	0,564	2,050	0,005	0,03092	-
20	0,20	1,5	-1,08	0,471	1,848	0,023	0,02714	-

Анализ полученных результатов показывает следующее:

1. На основе топографического метода идентификации распределения отказов по критерию статической прочности подтверждено известное положение о практически полном соответствии результатов моделирования нормальному распределению для случая нормально распределенных несущей способности и технологической нагрузки при рассмотренных соотношениях коэффициентов вариации.
2. При $\alpha_2 > \alpha_1$ распределение отказов должно описываться моделью с отрицательной асимметрией. Проверка гипотезы о возможности описания экспериментальных данных бета-распределением с привлечением метода топографической идентификации свидетельствует о высоком уровне сходимости экспериментальных характеристик и полученных по (7). Относительное расхождение превышает 6% только для случаев предельной асимметрии $|As| > 1.3$.
3. При $\alpha_2 < \alpha_1$ распределение отказов должно описываться моделью с положительной асимметрией. Гипотеза о возможности описания экспериментальных данных бета-распределением так же подтверждена при использовании метода топографической идентификации. Относительное расхождение не более 0,2 %.



с. 3. Топографическая идентификация моделей отказов по критерию статической прочности. Теоретические значения критериев: 1 - для модели (1); 2 - для модели в виде бета-распределения; 3 - для модели в виде гамма-распределения.

4. Достаточно близко группируются данные и возле линии, соответствующей гамма-распределению, однако этой модели присущ недостаток - невозможность описания данных с отрицательной асимметрией.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

В результате проведенных исследований уточнен вид модели отказов механического оборудования прокатных станов по критерию статической прочности в случае описания распределения несущей способности детали нормальным распределением, а распределения нагрузки - двусторонним экспоненциальным законом. Предлагаемая статистическая модель отказов учитывает влияние технологических особенностей формирования нагрузок механического оборудования прокатной клетки.

Список литературы: 1. Большаков В.И., Веренев В.В. Особенности идентификации динамической модели главного привода листопрокатного стана//Защита металлургических машин от поломок – Мариуполь, 1998. – Вып. 3. – С.30-34. 2. Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования М.: Машиностроение. 1986. – 224 с. 3. Решетов Д.Н., Иванов А.С. Фадеев. Надежность машин. М.: Высш.шк., 1988. – 238 с. 4. Деркач А.В. Прогнозирование максимальной технологической нагрузки для произвольного сортамента прокатного стана. Металл и литье Украины. № 7-8, 2000. – С. 32-34. 5. Деркач А.В. Вероятностная модель эксплуатационного режим нагружения при линейном изменении средних нагрузок в схеме прокатки // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Междунар. сб. науч. трудов. – Вып. 10. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – С. 71-75. 6. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с. 7. Деркач А.В. Сравнительный анализ вероятностных моделей технологической нагрузки оборудования циклического действия // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Междунар. сб. науч. трудов. – Вып. 20. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – С 125-129.

УТОЧНЕННЯ ВИДУ МОДЕЛІ ВІДМОВ ПО КРИТЕРІЮ МІЦНОСТІ МЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРОКАТНИХ СТАНІВ

Деркач О.В.

Проведено дослідження закономірностей відмов по критерію статичної міцності для умов навантаження прокатного обладнання. Встановлено закон розподілу відмов з урахуванням впливу розподілу технологічного навантаження, яке описано двобічним експоненціальним розподілом. Доказано можливість опису відмов моделлю у вигляді бета-розподілу.

УТОЧНЕНИЕ ВИДА МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Деркач А.В.

Исследованы закономерности возникновения отказов по критерию статической прочности для условий нагружения прокатного оборудования. Установлен закон распределения отказов с учетом влияния распределения технологической нагрузки описанной двусторонним экспоненциальным распределением. Доказана возможность описания отказов моделью в виде бета-распределения.

SPECIFICATION OF THE MODEL'S KIND OF REFUSALS BY CRITERION OF DURABILITY FOR MECHANICAL EQUIPMENT OF ROLLING MILLS

Derkach A.V.

Laws of occurrence of refusals by criterion of static durability for loading's conditions of the rolling equipment are investigated. The law of distribution of refusals is established in view of distribution's influence of technological loading which described bilateral exponential distribution. The opportunity of the description of refusals to model as betha-distribution is proved.