

В.А.ЖОВДАК, докт.техн.наук;
А.Б.БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, НТУ «ХПИ»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАМ ТЕЛЕЖЕК ВАГОНОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

Розглядається задача визначення характеристик надійності рам візків вагонів електропоїздів з урахуванням випадковості навантаження та характеристик опору втоми. Прогнозування надійності проводиться на підставі вирішення задачі статистичної динаміки. Наведено методику та результати чисельних досліджень.

The problem of definition of reliability characteristics of bogie frames of transit vehicles taking into account the chance of loading and characteristics of fatigue resistance is considered. Prognostication of reliability is conducted on the basis of solution of statistical dynamics problem. The methods of solution and results of computational investigation are given.

Введение и анализ исследований. Железнодорожный транспорт является наиболее развитым в Украине, по общей длине путей он занимает четвертое место в мире (после США, России и Канады). По грузообороту он выполняет основные объемы перевозок – 40-50 %, а по пассажирообороту является неоспоримым лидером - на него приходится 50-70 % общего объема перевозок. В настоящее время большое количество рам тележек вагонов электропоездов исчерпали свой назначенный ресурс, но благодаря высокой надежности они продолжают эксплуатироваться. Также, в Украине существуют экономические трудности, которые не позволяют производить обновление подвижного состава. В связи с этим возникает вопрос о продлении ресурса рам тележек вагонов, которые исчерпали назначенный ресурс, при безусловном обеспечении требований безопасности движения электропоездов.

Решение задач прогнозирования надежности рам тележек вагонов поводкового типа проводилось в работах [1,2], где учитывался случайный разброс характеристик сопротивления усталости и нагруженности. Расчет наработки до отказа для шпинтонных тележек представлен в работе [3], в которой применялся МКЭ для получения статических напряжений от веса вагона, а значения динамических напряжений брались из работы [2]. При этом использовались детерминированные значения предела выносливости.

В представленных работах для получения статических и динамических напряжений, необходимых для прогнозирования надежности рам тележек, использовались или экспериментальные исследования, которые являются трудоемкими, особенно для тележек, находящихся в эксплуатации, или упрощенные конечно-элементные модели, не учитывающие всех особенностей геометрии конструкций.

1. Постановка задачи. Объектом исследования являются рамы тележек вагонов типа 81-717, широко применяемые в метрополитенах Украины и стран СНГ [4, 5]. Ставится задача прогнозирования надежности тележек типа 81-717 по прототипу (ЕЖ-3). Поскольку рамы тележек типа 81-717 имеют подобную технологию изготовления и эксплуатируются при похожих условиях нагружения, что и рамы тележек типа ЕЖ-3, то можно прогнозировать надежность рам тележек типа 81-717 по данным об отказах прототипа. Исходными данными для проведения расчета служили экспериментальные данные об отказах рам тележек типа ЕЖ-3 [6], результаты решения задачи статистической динамики для тележек двух типов и литературные данные о характеристиках сопротивления усталости [1-3].

Поставленная задача решалась с использованием численных исследований характеристик надежности рам тележек вагонов электропоездов на основе трехмерных конечно-элементных моделей. При этом учитывался случайный характер нагружения и случайный разброс предела выносливости.

2. Решение прямой задачи надежности. Прямая задача прогнозирования надежности рам тележек заключается в определении вероятностных характеристик надежности рам тележек при известных вероятностных характеристиках сопротивления усталости и нагруженности. Для прогнозирования характеристик надежности рассмотрим выражение для пробега тележки вагона до появления усталостной трещины при детерминированном блочном нагружении и детерминированном значении предела выносливости [1-3]:

$$L = L_0 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^m, \quad (1)$$

где $L_0 = \frac{N_0 V_c}{3600 f_e}$ (N_0, m – параметры кривой усталости, V_c – средняя скорость, f_e – эффективная частота), $\sigma_{-1} = \varphi_\sigma \sigma_{-1D}$ (σ_{-1} – предел выносливости тележки с учетом асимметрии цикла, σ_{-1D} – предел выносливости конструкции, φ_σ – коэффициент асимметрии цикла при схематизации диаграммы по способу Серенсена-Киносашвили), $\sigma_a = \sum_i \frac{P_i V_c}{V_i} \sigma_{ai}$ (σ_a – приведенная амплитуда напряжений, σ_{ai} – амплитуда напряжений при i -м режиме нагружения, которая удовлетворяет неравенству $\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1D}$, P_i – вероятность появления скорости движения V_i в эксплуатации).

Введем безразмерные переменные s и r следующим образом:

$$s = r^m = \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^m = \frac{L}{L_0}, \quad r = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \leq 1. \quad (2)$$

Для решения задачи применяется метод условных плотностей вероятностей [7]. При определении плотности вероятности $f(\sigma_a)$ используется метод статистиче-

ского моделирования амплитуд напряжений σ_{ai} [8]. Согласно этому методу для моделирования стационарного релейского случайного процесса

$$f(\sigma_{ai}) = \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{\sigma_i}^2} \exp\left\{-\frac{\sigma_{ai}^2}{2\sigma_{\sigma_i}^2}\right\}$$

применялся датчик случайных чисел, генерирующий

реализации случайной величины u , распределенной равномерно в интервале $[0, 1]$. Реализации амплитуд напряжений при релейской плотности вероятности будут равны $\sigma_{ai} = \sigma_{\sigma_i} \sqrt{-2 \ln u_i}$, где значения среднеквадратичных отклонений (СКО)

σ_{ai} определяются из решения задачи статистической динамики рам тележек. При этом проводилась проверка каждой амплитуды напряжений условию $\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1}$, если это условие не удовлетворялось, то $\sigma_{ai} = 0$. В соответствии с центральной предельной теоремой [8] плотность вероятности приведенной амплитуды напряжений подчиняется нормальному закону. Поэтому выражение для условной плотности вероятности введенной безразмерной переменной r при условии, что σ_{-1} – фиксированное значение, получается на основе использования функционального преобразования [9] случайных величин (2) и предположения о нормальности распределения приведенной амплитуды напряжений $f(\sigma_a)$:

$$f_y(r/\sigma_{-1}) = f\left(\sigma_a = \frac{\sigma_{-1}}{r}\right) \frac{\sigma_{-1}}{r^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\sigma} \exp\left[-\frac{\left((\sigma_{-1}/r) - m_\sigma\right)^2}{2\sigma_\sigma^2}\right] \frac{\sigma_{-1}}{r^2}. \quad (3)$$

Тогда безусловная плотность вероятности переменной r определяется следующим выражением:

$$f(r) = \int_a^b f_y(r/\sigma_{-1}) f(\sigma_{-1}) d\sigma_{-1}, \quad (4)$$

где $f(\sigma_{-1})$ – плотность вероятности предела выносливости.

Пределы интегрирования a и b для интеграла (4) определяются из рис. 1 следующим образом:

$$\begin{cases} a = \sigma_{-1H}, & b = \sigma_{aB} \cdot r \quad \text{при } r_{\min} \leq r \leq r'; \\ a = \sigma_{aH}, & b = r\sigma_{-1B} \quad \text{при } r' \leq r \leq 1, \end{cases} \quad (5)$$

где $\sigma_{-1H}, \sigma_{aH}, \sigma_{-1B}, \sigma_{aB}$ – минимальные и максимальные значения предела выносливости и приведенной амплитуды напряжений, $r_{\min} = \sigma_{-1H} / \sigma_{aB}$, $r' = \sigma_{-1B} / \sigma_{aB}$.

Выражение для плотности вероятности переменной s согласно формул функционального преобразования [9] случайных величин (2) имеет вид:

$$f(s) = f\left(r = s^{1/m}\right) \frac{1}{m} s^{-\frac{1-m}{m}}. \quad (6)$$

Таким образом, получены основные соотношения для решения прямой задачи надежности: $[\sigma_{-1}, \sigma_a] \rightarrow [s]$. Для определения плотностей вероятности

стей приведенных амплитуд напряжений применялся метод статистического моделирования амплитуд напряжений, где значения СКО амплитуд напряжений определялись из решения задачи статистической динамики рам тележек.

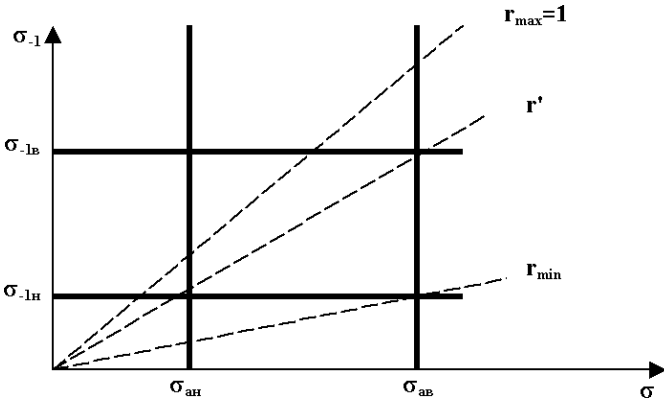


Рисунок 1 – Пределы интегрирования для прямой задачи надежности

3. Решение обратной задачи надежности. Обратная задача надежности рам тележек заключается в определении (идентификации) вероятностных характеристик нагруженности конструкции по известным вероятностным характеристикам надежности и сопротивления усталости: $[s, \sigma_{-1}] \rightarrow [\sigma_a]$.

Для решения данной задачи использовался подход, аналогичный изложенному в разд. 2. Выражение для плотности вероятности переменной r согласно формул функционального преобразования случайных величин имеет вид:

$$f(r) = f(s = r^m) m r^{m-1} = \frac{m \cdot r^{m-1}}{\sqrt{2\pi} \sigma_s} \exp \left[-\frac{(r^m - m_s)^2}{2\sigma_s^2} \right], \quad r \leq 1. \quad (7)$$

Введем условную плотность вероятности приведенных амплитуд напряжений при условии, что $\sigma_{-1} \leq \sigma_a$, согласно введенным обозначениям (2):

$$f_y(\sigma_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_s} \exp \left[-\frac{((\sigma_{-1}/\sigma_a)^m - m_s)^2}{2\sigma_s^2} \right] m \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^{m-1} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a^2}. \quad (8)$$

Тогда безусловная плотность вероятности приведенных амплитуд напряжений определяется из выражения:

$$f(\sigma_a) = \int_c^d f_y(\sigma_a) f(\sigma_{-1}) d\sigma_{-1}. \quad (9)$$

Пределы интегрирования c и d для интеграла (9) определяются из рис. 2 следующим образом:

$$\begin{cases} c = \sigma_{-1H}, & d = \sigma_a & \text{при } \sigma_a \leq \sigma_{-1B}; \\ c = \sigma_{-1H}, & d = \sigma_{-1B} & \text{при } \sigma_a > \sigma_{-1B}. \end{cases} \quad (10)$$

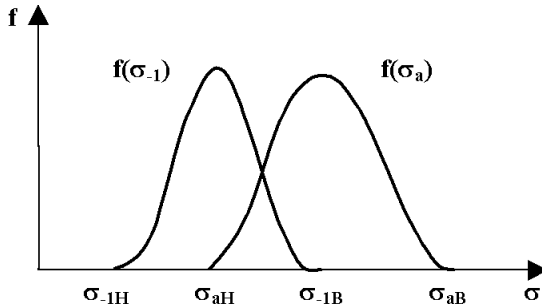


Рисунок 2 – Пределы интегрирования для обратной задачи надежности

4. Численные исследования

4.1. Прямая задача надежности. Рассмотрим решение прямой задачи прогнозирования надежности для рам тележек типа ЕЖ-3 при использовании метода статистического моделирования амплитуд напряжений. Моделирование случайных величин производилось с использованием ПК MATLAB 5.2.

Для расчетов принимались следующие параметры: базовое число циклов до разрушения $N_0 = 10^7$, показатель степени кривой усталости $m = 3,5$, коэффициент влияния асимметрии цикла $\varphi_\sigma = 0,77$, эффективная частота случайного процесса $f_e = 1,4$ Гц. Из экспериментальных данных об отказах рам тележек следует бимодальность закона распределения пробегов рам тележек, которая объясняется бимодальностью предела выносливости, связанной с несовершенством технологии изготовления рам тележек, вследствие чего возникают технологические дефекты первого и второго рода. Предполагалось, что плотность вероятности предела выносливости подчиняется нормальному закону [1, 2] со следующими параметрами: математические ожидания (МО) $\bar{m} = 23$ МПа и $\bar{m} = 40$ МПа, СКО $\sigma_{\sigma-1} = 2,28$ МПа. Из результатов численных исследований следует, что плотность вероятности приведенной амплитуды напряжений подчиняется нормальному закону. Параметры нормального закона для приведенных амплитуд напряжений при двух значениях МО и СКО предела выносливости представлены в табл. 1.

Для оценки полученных результатов использовались экспериментальные данные метрополитена г. Харькова (см. рис. 3) [6]. Анализ данных показывает, что зависимость имеет явно выраженную бимодальность, обусловленную наличием максимумов при двух значениях переменной $s = 0,25$ и $s = 0,6$. Наличие двух максимумов можно объяснить существованием в рамах тележек технологических дефектов первого и второго рода.

Проводилось сравнение расчетной плотности вероятности $f(s)$ с эксперимен-

тальными данными (см. рис. 3). Как следует из рис. 3, расчетная плотность вероятности $f(s)$ хорошо согласуется с экспериментальной плотностью вероятностью для рам тележек типа ЕЖ-3, что позволяет сделать вывод о достоверности разработанной методики решения прямой задачи надежности рам при использовании метода статистического моделирования амплитуд напряжений.

Таблица 1 – Параметры нормального закона для приведенных амплитуд напряжений

№	Предел выносливости, МПа		Приведенная амплитуда напряжений, МПа	
	МО	СКО	МО	СКО
1	23	2,28	26,5	3,4
2	40	2,28	34,3	3,4

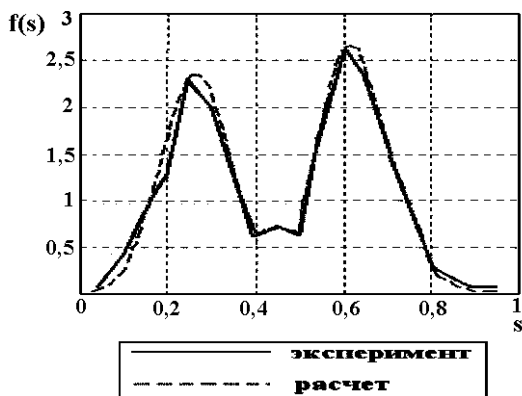


Рисунок 3 – Плотность вероятности переменной s

Далее проводилось решение прямой задачи прогнозирования надежности рам тележек типа 81-717. В результате усовершенствования технологии изготовления рам тележек удалось повысить сопротивляемость конструкции усталостному разрушению. Гарантированная оценка для пробега тележек типа 81-717 до появления усталостных трещин, полученная из условий эксплуатации вагонов метрополитена г. Харькова, составляет $L = 1,9$ млн. км ($s = 0,4$). Это значение принято за нижнюю границу плотности вероятности пробегов. Следовательно, средний ресурс рам тележек данного типа должен быть выше на 28 % по сравнению с тележками типа ЕЖ-3 при равных СКО пробегов для тележек ЕЖ-3 и 81-717 (см. рис. 4).

Поскольку дефекты первого рода в рамах тележек не проявляются, то при расчетах принимались следующие параметры нормального закона для предела выносливости: МО $\bar{m} = 40$ МПа, СКО $\sigma_{\sigma-1} = 2,28$ МПа, параметры

нормального закона для переменной s : МО $m_s = 0,685$ МПа, СКО $\sigma_s = 0,07$ МПа. Расчетные плотности вероятностей $f(s)$ при использовании метода статистического моделирования амплитуд напряжений σ_{ai} представлены на рис. 5, из которого следует, что МО случайной величины s при одинаковых СКО отличаются на 2 %. Данный результат позволяет сделать вывод о достоверности решения задачи статистической динамики рам тележек. Такие же результаты для вероятностных характеристик приведенных амплитуд напряжений получены и для рам тележек типа ЕЖ-3.

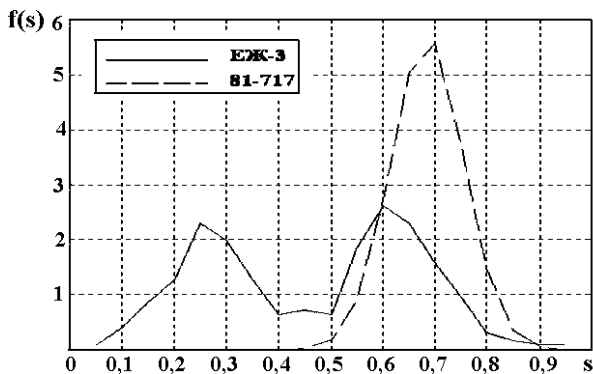


Рисунок 4 – Плотности вероятностей $f(s)$ для рам тележек серий ЕЖ-3 и 81-717

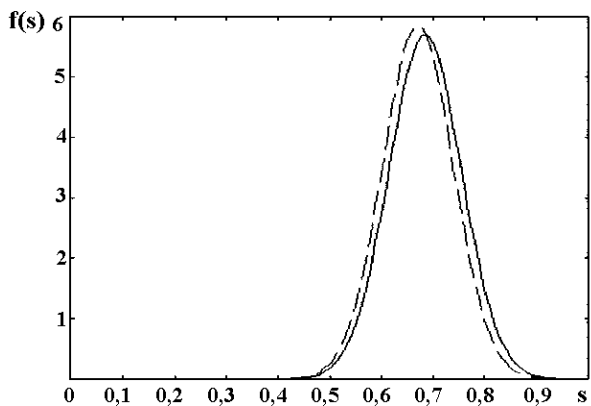


Рисунок 5 – Расчетная плотность вероятности $f(s)$

4.2. Обратная задача надежности. Рассмотрим решение обратной задачи надежности для рам тележек вагонов типа ЕЖ-3. Представим плотность вероятности переменной s (см. рис. 3) в виде суммы двух нормальных законов: $f(s) = k_1 f_1(s) + k_2 f_2(s)$, где $k_1 = 0,46$; $k_2 = 0,54$;

$$f_i(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Si}} \exp\left[-\frac{(r^m - m_{Si})^2}{2\sigma_{Si}^2}\right], \quad i = 1, 2 \quad (m_{Si} - \text{МО переменной } s, \sigma_{Si} - \text{СКО}$$

переменной s .

График плотностей вероятностей приведенных амплитуд напряжений и их аппроксимаций в виде нормального закона показан на рис. 6, из которого следует, что расчетная плотность вероятности приведенных амплитуд напряжений хорошо аппроксимируется нормальным законом для принятой плотности вероятности предела выносливости. Такие же результаты для вероятностных характеристик приведенных амплитуд напряжений дает и метод статистического моделирования.

Результаты расчета МО приведенных амплитуд напряжений с учетом одинаковых значений СКО при решении обратной задачи надежности рам тележек с использованием метода статистического моделирования представлены в табл. 2

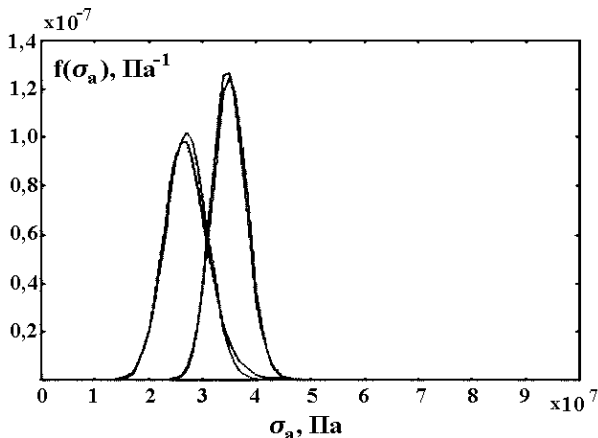


Рисунок 6 – Плотности вероятностей $f(\sigma_a)$ и их аппроксимации в виде нормального закона

Таблица 2 – МО приведенных амплитуд напряжений

№	Значение МО, МПа		Отличие, %
	обратная задача надежности	статистическое моделирование	
1	27	26,5	1,8
2	35	34,3	2

Как следует из табл. 2, наибольшее отличие в МО приведенных амплитуд напряжений, полученных при использовании двух методов расчета, не превышает

2 %, то есть для получения вероятностных характеристик нагруженности рам тележек можно использовать как метод статистического моделирования амплитуд напряжений, так и решение обратной задачи надежности рам тележек.

Затем было выполнено решение обратной задачи надежности для рам тележек типа 81-717. График плотностей вероятностей приведенных амплитуд напряжений и их аппроксимаций в виде нормального закона показан на рис. 7, из которого следует, что расчетная плотность вероятности приведенных амплитуд напряжений для рам тележек типа 81-717 хорошо аппроксимируется нормальным законом для принятой плотности $f(\sigma_{-1})$.

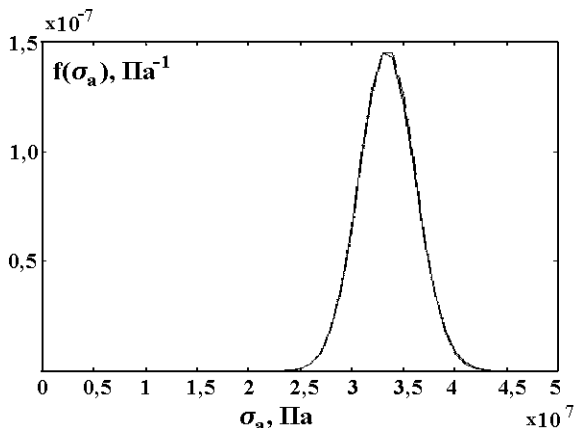


Рисунок 7 – Плотности вероятностей амплитуд напряжений и их аппроксимаций

Выводы. Разработаны методы решения прямых и обратных задач надежности рам тележек вагонов электропоездов и проведены численные исследования характеристик надежности. Выполнено сопоставление расчетной и экспериментальной плотностей вероятностей пробегов рам тележек до появления усталостных трещин, которое показало достоверность разработанных методов. Проведен расчет характеристик надежности рам тележек по прототипу и выполнены численные исследования.

Список литературы: 1. Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / И.В.Бирюков, А.Н.Савоськин, Г.П.Бурчак и др. / Под ред. И.В.Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с. 2. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / А.Н. Савоськин, Г.П.Бурчак, А.П.Матвеевичев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с. 3. Егоренков А.В. Обоснование технических решений по повышению усталостной долговечности рам шпинтонного типа тележек вагонов метро: Автореф. дис...канд.техн.наук: 05.22.07 / БГТУ. – М., 2002. – 21 с. 4. Добровольская Э.М. Вагоны метрополитена типа Е. Устройство и обслуживание. – М.: Транспорт, 1989. – 302 с. 5. Раков В.А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956-1975 гг.). – М.: Транспорт, 1999. – 443 с. 6. Жовдак В.А., Смирнов М.М., Ломакин А.Н. и др. Прогнозирование остаточного ресурса элементов конструкций вагонов метрополитена // Тр. Междунар. конф. «Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций». – Киев,

2000. – Т. 1. – С. 883-888. 7. *Болотин В.В.* Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с. 8. *Жовдак В.А, Мищенко И.В.* Прогнозирование надежности элементов конструкций с учетом технологических и эксплуатационных факторов: Монография. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 120 с. 9. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1974. – 552 с.

Поступила в редколлегию 29.05.2005

УДК 62-192.624.041

В.А.ЖОВДАК, докт.техн.наук, ***Л.Ф.ТАРАСОВА***, НТУ «ХПИ»

ПРИМЕНЕНИЕ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ОТКАЗАХ

Запропоновано методикү прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій на основі використання кінетичних рівнянь для опису міри пошкодження і математичного апарату теорії марковських процесів. У результаті визначаються найбільш інформативні показники залишкового ресурсу – ймовірність безвідмовної роботи й щільність імовірності відмовлень. Методика дозволяє враховувати випадковість процесу навантаження, зниження границі витривалості

The approach of the construction element's residual resource prediction, based on the use of kinetic equations for description of the measure of damage and the mathematical tool for Markoff's process theory is proposed. As the result, the most informative reliability characteristics, such as no-failure operation probability and probability density of failures, are determined. This approach allows take proper account of the random loading, fatigue point decrease.

На этапе проектирования различных конструкций, как правило, производится прогнозирование их ресурса. Это так называемый проектный ресурс должен быть обеспечен на этапах изготовления и эксплуатации путем соблюдения соответствующих регламентируемых норм. Однако, как показывает практика эксплуатации машиностроительных конструкций, проектный ресурс может существенно отличаться от фактического ресурса в силу недостоверности или неполноты исходной информации, используемой при проектировании о реальных условиях эксплуатации и свойствах материала конструкции. В связи с этим возникает актуальная проблема оценки остаточного ресурса различных конструкций после определенного срока эксплуатации.

В данной работе предлагается подход к прогнозированию остаточного ресурса элементов конструкций при случайном нагружении и постепенных отказах на основе применения кинетических уравнений для описания мер повреждений и математического аппарата теории марковских процессов.

Постановка задачи. Предполагается, что процесс нагружения $y(t)$ является узкополосным случайным процессом с огибающей $\lambda(t)$ и несущей частотой ω .