

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗДЕЛИЙ (ОБЗОР)

Анотація. Проведено аналіз сучасних методів оцінювання залишкового ресурсу виробів. Наводяться понятійні розбіжності у трактуванні залишкового ресурсу у працях вітчизняних та зарубіжних вчених.

Ключові слова: залишковий ресурс, прогнозування, метод оцінювання, моделювання.

Аннотация. Проведен анализ современных методов оценки остаточного ресурса изделий. Приводятся понятийные различия в трактовании остаточного ресурса в работах отечественных и зарубежных ученых.

Ключевые слова: остаточный ресурс, прогнозирование, метод оценки, моделирование.

Abstract. The analysis of new modern methods of estimation of residual resource of the products is performed. Conceptual distinctions in interpretation of residual life in works of domestic and foreign scientists are resulted.

Key words: a residual value, forecasting, an estimation method, modelling.

1. Введение

Ресурс сложных технических изделий (машин, систем машин, приборов, инструментов, конструкций и сооружений) является важной технико-экономической характеристикой. При существующих в настоящее время темпах прогресса в науке и технике поколения ряда машин и приборов должны сменяться примерно каждые десять лет. Фактический ресурс должен быть согласован с оптимальными значениями срока службы. К сожалению, в большинстве отраслей назначенный ресурс не достигает оптимальных с экономической точки зрения значений, а по ряду изделий средний фактический ресурс оказывается меньше назначенного [1, 2]. Актуальной является задача разработки модели определения и прогнозирования значения фактического ресурса невозобновляемых объектов техники.

Следует отметить некоторое различие понятия "остаточного ресурса" ("residual value", "residuals") для отечественной и зарубежной литературы. Согласно [3], а также традиции понимать под понятием "ресурс изделия" его собственный технический ресурс, ресурсом называют наработку объекта от начала или возобновления эксплуатации до наступления предельного состояния. В зависимости от того, как выбирают начальный момент времени, в каких единицах измеряют продолжительность эксплуатации и что понимают под предельным состоянием, понятие ресурса, естественно, получает естественно различное толкование. В качестве меры продолжительности может быть выбран любой неубывающий параметр, характеризующий продолжительность эксплуатации объекта. Для самолетов и авиационных двигателей естественной мерой ресурса служит налет в часах, для автомобилей – пробег в километрах, для прокатных станов – масса прокатанного металла в тоннах и т.п. Если наработку измерять числом производственных циклов, то ресурс будет принимать дискретные значения [4–6]. Однако универсальной мерой продолжительности остается единица времени (рис. 1).

Для зарубежной литературы характерен следующий подход: с понятием "ресурса" однозначно связывается сумма денег, за которую данное изделие, объект, машина могут быть проданы на рынке за некоторый ограниченный период времени в будущем [6], тем самым расширяя данное понятие по сравнению с понятием "технический ресурс" объекта, включая в его состав как микро-, так и макроэкономические показатели.

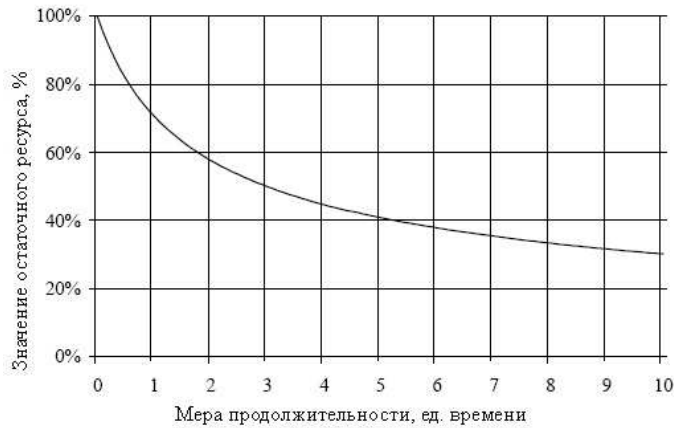


Рис. 1. Пример зависимости остаточного ресурса от выбранной меры продолжительности (в данном случае единиц времени)

$$\frac{R[\tau + \pi_{\gamma}(\tau)]}{R(\tau)} = \gamma.$$

- В данной статье рассматриваются следующие методы оценки остаточного ресурса:
- вероятностный;
 - параметрический (на основе магнитной характеристики металла), а также методы, основанные на использовании:
 - диффузионного распределения;
 - индивидуальных кривых усталости;
 - анализа временных рядов.

2. Вероятностные методы расчета ресурса

Работу вероятностного метода проиллюстрируем на примере оценки ресурса для различных вероятностных повреждений образцов легкого сплава АМг-6 и стали ЭП-630, испытанных при действии суммы случайных процессов различной интенсивности и подвергающиеся консольному изгибу на электродинамических установках с автоматическим поддержанием реализуемого случайного процесса [7, 8].

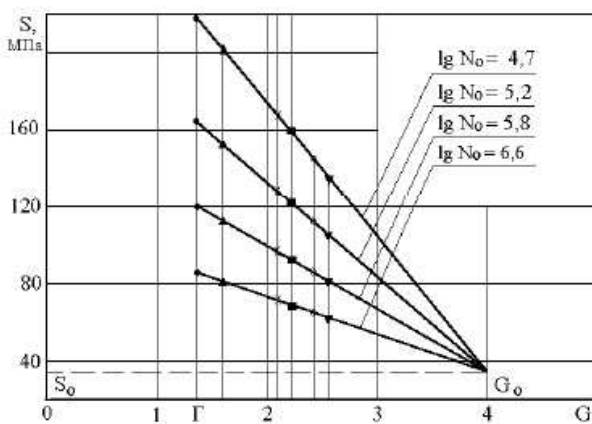


Рис. 2. Обобщенная диаграмма характеристик сопротивлений усталости образцов сплава АМг-61

В качестве основных показателей остаточного ресурса принято рассматривать следующие:

- средний остаточный ресурс $\pi(t)$, определяемый как математическое ожидание остаточного ресурса после наработки t ;
- гамма-процентный остаточный ресурс $\pi_{\gamma}(t)$, определяемый как наработка с некоторого момента времени t , в течение которого безотказно наработавший объект будет иметь значение условной вероятности безотказной работы уровня γ :

На основе исследований ряда сплавов при различных нагружениях установлено, что, с точки зрения влияния на долговечность, любой процесс может быть представлен тремя параметрами: математическим ожиданием напряжений σ_m , отражающим статическое смещение процесса нагружения объекта (например, под действием установленного груза); средним квадратичным отклонением напряжений S , характеризующим интенсивность динамического нагружения; параметром структуры процесса G , интегрально оценивающим вероятностное соотношение ординат и максимумов процесса (рис. 2). Время воздействия на объект представля-

ется числом пересечений центрированным процессом нулевого уровня с заданным знаком производной – N_0 . Представление случайных и других процессов с помощью отмеченных параметров позволяет описать результаты усталостных испытаний, полученных при различных видах нагружений (гармоническом, полигармоническом, случайном, смешанном).

3. Параметрические методы оценки текущего состояния и остаточного ресурса металлоконструкций на основе метода неразрушающего контроля

В основу подхода положен неразрушающий метод текущего контроля (в процессе всего срока службы) по результатам измерения такой магнитной характеристики металла, как коэрцитивная сила (H_c). Подобный подход давно признан в металлургии и машиностроении при сдаточном контроле готовой металлопродукции по механическим свойствам [9-11].

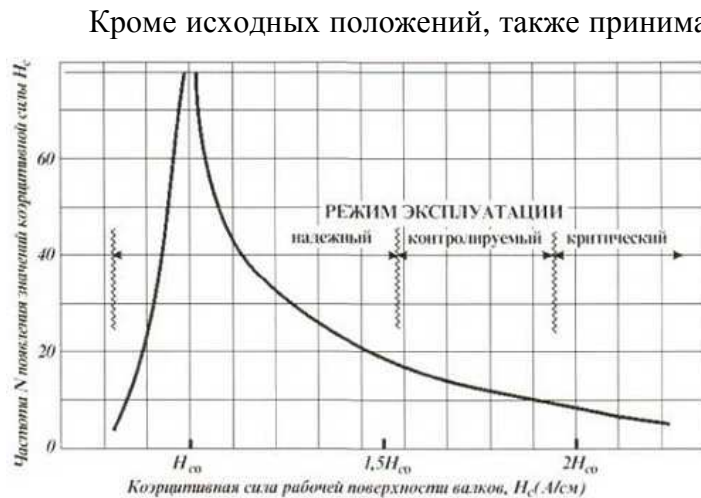


Рис. 3. Генеральное распределение значений коэрцитивной силы на поверхности катания опорных валков из стали 75ХМФ

Кроме исходных положений, также принималось во внимание, что H_c – это одна из наиболее структурочувствительных магнитных характеристик металла, поэтому по результатам измерений H_c контролируются механические свойства не только нового металла (конкретно-прокатного валка), но и прослеживается динамика изменения состояния рабочего слоя в процессе всего срока службы валка (рис. 3).

Ниже при измерениях H_c поверхности катания представительной выборки из 60 штук прокатных валков в течение их срока службы показано, что данный параметр неразрушающего контроля оправдал такие ожидания [12]. Всю эту группу валков

наблюдали в течение полутора лет. При контроле на рабочую поверхность валка наносили координатную сетку с привязкой ее к конструкции валка для выполнения всех последующих замеров в одних и тех же точках в процессе перевалок. Измерения выполняли ручным портативным магнитным структуроскопом КРМ-Ц-К2М.

Таким образом, при эксплуатации коэрцитивная сила напрямую связана с действующими эксплуатационными напряжениями и накоплением повреждений в металле, которые определяют остаточный ресурс конструкции.

4. Метод оценки ресурса с использованием диффузионного распределения

В последнее время всё большее распространение в качестве теоретической модели распределения отказов механических изделий получает диффузионное монотонное распределение (DM-распределение) [13].

Если известна первоначальная функция распределения ресурса исследуемых изделий $F(t)$ (или плотность распределения ресурса $f(t)$), то можно определить выражения для характеристик остаточного ресурса.

Плотность DM-распределения:

$$f(t) = \frac{t + \mu}{2\nu t \sqrt{2\pi\mu t}} \cdot \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\nu^2 \mu t}\right],$$

где μ – параметр масштаба, совпадающий со значением медианы распределения; ν – параметр формы, совпадающий с коэффициентом вариации распределения.

Функция DM-распределения:

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right).$$

Выражение для вероятности безотказной работы $R(t)$ определяется из следующих соотношений:

$$R(t) = 1 - DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right).$$

Используя известное выражение плотности распределения остаточной наработки [13], получаем математическое ожидание остаточного ресурса:

$$\pi(\tau) = \frac{\left[\mu\left(1 + \frac{\nu^2}{2}\right) - \tau\right] \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right) + \frac{\mu\nu^2}{2} e^{2\nu^2} \Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right) + \frac{\nu\sqrt{\mu\tau}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - \mu)^2}{2t^2\mu\tau}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right)}.$$

5. Методы определения распределений ресурса по индивидуальным кривым усталости

Одним из возможных способов расчета распределения ресурса является использование индивидуальных кривых усталости (ИКУ) в виде квантилей соответствующих значений вероятностей [14, 15].

Возможны два подхода к построению ИКУ: прямой и обратный. Прямой подход состоит в нахождении распределения ресурса и определении действительного поведения образцов на основе этих распределений. Существует и обратный подход к моделированию усталостного феномена. Если даны распределения ресурса, полученные на основе испытаний, необходимо найти случайные объекты, ответственные за усталостное поведение образцов [16].

В качестве примера расчета усталостной долговечности рассмотрим процесс нагружения элемента металлоконструкции в опорах козлового крана, полученный при натурном тензометрировании, гистограмма амплитуд которого обработана по методу дождя и аппроксимирована распределением Вейбулла с параметрами масштаба $\mu = 67,6$ и формы $\varphi = 2,2$.

На рис. 4 изображены характеристические функции для модели 1 (предел выносливости $S_{lim} = 32,5 \text{ МПа}$) и модели 2 (изменяющийся предел выносливости). Модель с нулевым значением предела выносливости не рассматривается вследствие ее малой пригодности.

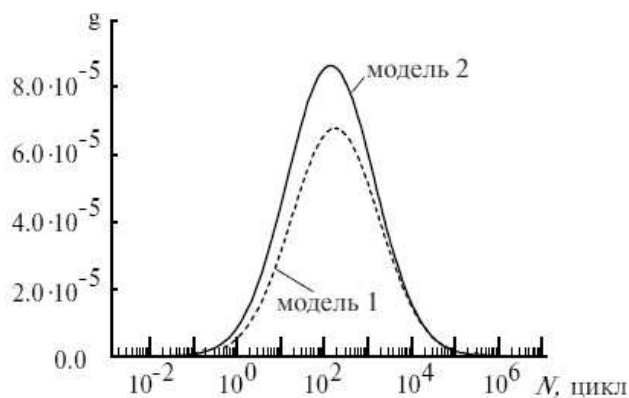


Рис. 4. Плотность распределения ресурса элемента металлоконструкции

Отметим, что для модели 2 необходимо выполнить ограничение справа диапазона возможного изменения случайной величины N значением $N_0 = 2 \cdot 10^6$. Если же плотность распределения сместится вниз по оси S (т.е. амплитуды нагружения будут меньше, чем в рассматриваемом случае), то плотность распределения сместится вправо, ограниченность распределения ресурса будет проявляться более явно и ее отличие от логнормального распределения станет более разительным.

Прогнозирование распределения остаточного ресурса также основывается на фундаментальном предположении о наличии у каждого образца своей ИКУ и, кроме того, на апостериорной информации о том, что к моменту прогнозирования при данной истории нагружения h исследуемого образца его разрушение не произошло. Тогда, если известна предшествовавшая история нагружения, можно выделить во всем пространстве ИКУ множество кривых, не реализовавшихся при данной истории нагружения, а, значит, и вычислить апостериорные распределения значений ресурса.

Рассмотрим детерминированный вариант прогнозирования остаточного ресурса N_{res} для случая двухступенчатого стационарного нагружения: сначала образец нагружается в течение n_1 циклов с амплитудой S_1 , а затем доводится до разрушения при нагружении с амплитудой S_2 .

Остаточный ресурс определяется соотношением

$$N_{res} = N_2(1 - n_1 / N_1),$$

где $N_1 = N(S_1)$ и $N_2 = N(S_2)$.

Приведенная модель накопления повреждений, исходные данные по усталости и способ прогнозирования ресурса являются взаимосвязанными элементами замкнутой модели надежности элемента по критерию усталостной долговечности. В случае нестационарного нагружения с более сложной историей нагружения потребуются, естественно, более трудоемкая процедура вычисления распределений остаточного ресурса с привлечением распределений величины накопленного повреждения.

6. Модели остаточного ресурса с использованием методов анализа временных рядов

Под временным рядом будем подразумевать множество значений ресурса, зафиксированных в определенное время. Подобные ряды очень часто формируются для контроля технологического процесса, а также для учета ресурсных затрат и ряда других целей. Модели, в основе которых лежит использование данных временных рядов (или временных серий), позволяют получать прогнозы фиксируемых значений в ближайшем будущем. Построение таких моделей содержит в себе два этапа [17, 18]:

1. Анализ внутренней структуры данных и поиск количественных и качественных тенденций. Обычно на этом этапе происходит не прямое разделение исходных данных на систематический (прогнозируемый) и случайный (не поддающийся прогнозу) компоненты.

2. Построение модели и прогнозирование.

Существуют два подхода к созданию моделей [19]:

- Статические методы прогноза – производят оценку тенденций, формирующих систематический компонент только один раз, на начальной стадии анализа данных, полагая их статичность и неизменность на протяжении всего периода рассматриваемого времени. Данные методы все будущие ошибки прогноза рассматривают только в качестве случайного компонента.

- Адаптивные методы прогноза – в отличие от статических методов, модернизируют оценки, полученные на первом этапе исследования после каждого нового наблюдения. Методы, принадлежащие к данной категории, предполагают, что часть ошибок прогноза,

которые возникают вследствие неправильного формирования систематического компонента на предыдущих шагах, может быть устранена.

Приведем алгоритм работы адаптивного метода анализа временных рядов для прогнозирования остаточного ресурса [20]:

1. Инициализация – проводятся анализ внутренней структуры данных и поиск количественных и качественных тенденций. Разделение исходных данных на систематический (прогнозируемый) и случайный (не поддающийся прогнозу) компоненты.

2. Прогнозирование – прогноз значения ресурса в момент времени $t+1$ с учетом значений ресурса для моментов времени t , где $t = 0, 1, \dots, n$.

3. Вычисление ошибки прогнозирования – в качестве ошибки прогноза допустимо принимать абсолютную разность между действительным значением ресурса в момент времени $t+1$ и прогнозируемым.

4. Модификация – изменение оценок, полученных на первом этапе (пересмотр показателей) для момента времени $t+1$ с учетом полученной ошибки прогнозирования и с целью понижения абсолютного значения ошибки.

Модифицированный прогноз на следующих этапах используется для прогнозирования значений ресурса в момент времени $t+2$.

Шаги 2, 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет проанализирован весь имеющийся временной ряд. Последняя оценка (для момента времени $t = n$) используется для прогноза будущих значений ресурса.

Преимущество методов анализа временных рядов состоит в простоте их использования, а также в быстром получении необходимого результата.

На данном этапе они также широко применяются в прогнозировании рынка продаж, бюджетном анализе, при проектировании и внедрении технологий на производстве [21].

Однако данные методы позволяют получать удовлетворительный прогноз только для относительно "стабильных" данных, тенденции которых не склонны к резкому изменению. Следовательно, их применение наиболее подходит в условиях стабильной экономики.

7. Выводы

Проведенный анализ методов оценки остаточного ресурса показал целесообразность дальнейшего усовершенствования методик более точного обнаружения неисправностей изделий на ранней стадии эксплуатации. Оценка остаточного ресурса при использовании таких методик характеризуется применением большого числа многофакторных зависимостей, что исключает расширение базы данных непосредственно в технологическом процессе. Модели изнашивания по своей сути являются статическими.

Таким образом, актуальными являются следующие задачи: разработка новых динамических моделей, учитывающих сложные многофакторные фазовые и структурные изменения технического изделия; создание методик получения наиболее информативных признаков изделия с целью дальнейшего диагностирования и оценивания вероятности выхода объекта из строя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ксендзов В.Н. Прогнозирование остаточного ресурса деталей приводов машин / В.Н. Ксендзов, Г.А. Дыко, С.П. Мурашко // Надёжность и контроль качества. – 1988. – № 10. – С. 18 – 24.
2. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия, термины и определения. – Введ. 01.07.90. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 38 с.
3. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / Болотин В.В. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

4. Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А.А. Дубов // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 3. – С. 46 – 49.
5. Шевнин В.М. Методы оценки остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы / В.М. Шевнин, Ю.М. Гофман // Подъемные сооружения и спец. техника. – 2001. – № 2. – С. 25 – 26.
6. Mitchell Z.W. A Statistical Analysis of Construction Equipment Repair Costs Using Field Data & The Cumulative Cost Model / Z.W. Mitchell // Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. – Blacksburg, 2003. – 292 p.
7. Шефер Л.А. Вероятностные методы расчета ресурса в условиях случайных вибраций / Л.А. Шефер, А.Е. Саночкин // Проблемы прочности. – 2001. – № 1. – С. 19 – 22.
8. Бородин Н.А. Проблемы и методы оценки сопротивления металлических материалов многоциклового усталости и длительному статическому разрушению / Н.А. Бородин, С.П. Борисов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – № 1. – С. 89 – 93.
9. ГОСТ 30415-96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом. – Введ. 01.01.98. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 58 с.
10. Горецкий В.М. Исследование структурной повреждаемости стальных образцов с использованием метода магнитной памяти металла / В.М. Горецкий, А.А. Дубов, Е.А. Демин // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 3. – С. 23 – 26.
11. Хапонен Н.А. Перспективы развития неразрушающего контроля / Н.А. Хапонен, Г.П. Иванов, А.А. Худошин // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 1. – С. 48 – 50.
12. Оценка текущего состояния и остаточного ресурса прокатных валков на основе магнитного (по коэрцитивной силе) метода неразрушающего контроля / Г.Я. Безлюдько, В.Ф. Мужичкий, Л.А. Крутикова [и др.] // Специальные научные разработки. – 2003. – № 2. – С. 31 – 33.
13. Стрельников В.П. Определение ожидаемой остаточной наработки при ДМ-распределении / В.П. Стрельников // Математичні машини і системи. – 2000. – № 1. – С. 94 – 100.
14. Изерманн Р. Перспективные методы контроля, обнаружения и диагностики неисправностей и их применение / Р. Изерманн // Приборы и системы управления. – 1998. – № 4. – С. 56 – 70.
15. Анализ применимости уравнений и исследование формы кривой усталости / Ю.С. Борисов, Ю.Н. Благовещенский, С.С. Дмитриченко [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. – № 10. – С. 41 – 52.
16. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. – Введ. 01.07.83. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 80 с.
17. Kopnov V.A. Residual life, linear fatigue damage accumulation and optimal stopping / V.A. Kopnov // Reliability Engineering and System Safety. – 1993. – N 40. – P. 319 – 325.
18. Chopra S. Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation / S. Chopra, P. Meindl // Prentice-Hall. – 2004. – N 2. – С. 40 – 44.
19. Brockwell P.J. Introduction to Time Series and Forecasting / P.J. Brockwell, D.V. Davis. – Springer-Verlag, 2002. – 153 p.
20. Chen H.M. Multiscale forecasting method using armax models / H.M. Chen., B. Vidakovic, N.D. Mavris // Technological Forecasting and Social Change. – 2004. – N 1. – P. 34 – 39.
21. Tarnurr N.R. Quantitative Forecasting Methods. The Duxbury Series in Statistics and Decision Sciences / N.R. Tarnurr, L.W. Stanton. – Boston: PWS-KENT Publishing Company, 1989. – 185 p.

Стаття надійшла до редакції 07.05.2010