

Прогнозирование остаточного ресурса по результатам диагностирования натуральных конструкции и при непрерывном отслеживании их технического состояния

д.т.н. проф. Гусев А.С., к. т.н. доц. Стародубцева С.А., к.т.н. проф. Щербаков В.И.
 МГТУ им. Н.Э.Баумана, Университет машиностроения
 asiastars@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы прогнозирования остаточного ресурса по результатам диагностирования натуральных конструкции и при непрерывном отслеживании их технического состояния.

Ключевые слова: остаточный ресурс, прогнозирование, техническое состояние, статистические методы.

Ранее были рассмотрены вопросы прогнозирования остаточного ресурса по статистической информации об отказах и по расчетным моделям накопления повреждений [5].

Рассмотрим ситуацию, когда показатель изменения технического состояния k заранее не известен и может быть найден только по результатам диагностирования объектов во время эксплуатации. При этом вначале будем полагать, что диагностическое обследование проводится один раз и ему подвергается достаточно большая партия однотипных объектов. На момент времени t_* для них определяются функция $F_x(x)$ и плотность $f_x(x, t_*)$ распределения вероятностей показателя технического состояния $x(t)$ (рисунок 1).

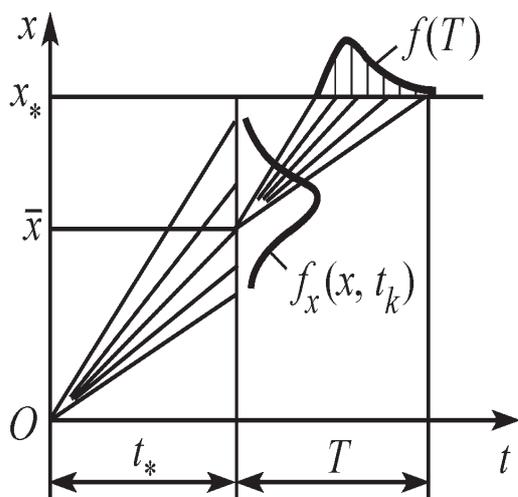


Рисунок 1

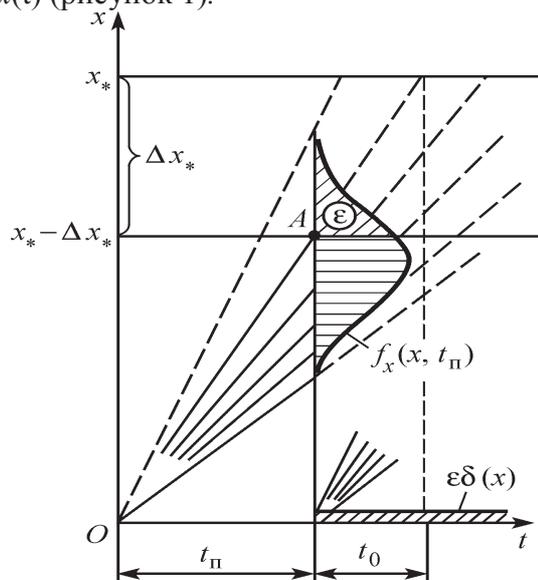


Рисунок 2

Техническое состояние конкретного объекта, для которого прогнозируется остаточный ресурс, характеризуется показателем технического состояния \bar{x} . Если изменение параметров исследуемого объекта при дальнейшей эксплуатации описывается теми же вероятностными характеристиками, что и изменение параметров рассматриваемого комплекса объектов в исходном состоянии эксплуатации, за начало отсчета остаточного ресурса можно принять точку с координатами $\{\bar{x}, t_*\}$. При этом остаточный ресурс определяется как:

$$T = \frac{x_* - \bar{x}}{k}, \quad (1)$$

где функция распределения вероятностей случайного параметра k :

$$F_k(k) = F_x(kt_*). \quad (2)$$

С учетом (1) и (2) функцию распределения вероятностей для остаточного ресурса мож-

но найти по формуле:

$$F(T) = 1 - F_k \left(\frac{x_* - \bar{x}}{T} \right) = 1 - F_x \left\{ (x_* - \bar{x}) \frac{t_*}{T} \right\}. \quad (3)$$

При этом значение $\gamma\%$ -ного остаточного ресурса определяется из уравнения:

$$F(T_\gamma) = \gamma. \quad (4)$$

Следует отметить, что в случаях, когда диагностирование объектов осуществляется многократно, появляется возможность выбирать вид функции $x(t)$ из альтернативных вариантов с использованием различных критериев ее адекватности опытным данным.

В рамках рассмотренной модели также можно оценить эффективность мер, которые могут быть приняты в моменты остановок эксплуатации объекта, для повышения показателей надежности и остаточного ресурса. В связи с этим рассмотрим ситуацию, когда в некоторый момент времени остановки работы производится одноразовое нагружение объекта с параметрами, превышающими номинальные. Это позволяет не только выявить ненадежные элементы и заменить их на новые, но и более точно оценить реальную ситуацию, сложившуюся к рассматриваемому моменту времени.

Расчетная модель такой ситуации показана на рисунке 2, на котором последствия в результате одноразовой перегрузки в момент времени t_Π отождествляются с понижением допустимого уровня показателя технического состояния x_* на величину Δx . При этом доля элементов, подлежащих отбраковке и замене на новые, равна:

$$\varepsilon = \int_{x_* - \Delta x_*}^{\infty} f_x(x, t_\Pi) dx. \quad (5)$$

Можно предположить, что в дальнейшем изменение состояния этих элементов будет происходить так же, как и новых элементов. Началом отсчета их ресурса будет момент времени t_Π . Изменение состояния оставшихся элементов будет продолжаться по законам, зависящим от условий эксплуатации. При этом вновь образованный комплекс из старых и новых элементов будет представлять собой вероятностную смесь и иметь показатель технического состояния, описываемый следующей плотностью распределения вероятностей:

$$F(x) = \begin{cases} (1 - \varepsilon) f_x(x, t_\Pi) + \varepsilon \delta(x), & x \leq x_* - \Delta x_*, \\ 0, & x > x_* - \Delta x_*, \end{cases} \quad (6)$$

где: $\delta(x)$ – дельта-функция.

Выражение (6) позволяет впоследствии использовать описанную выше методику для прогнозирования остаточного ресурса с учетом принимаемых технических мер во время остановок для диагностирования. Следует отметить, что от перемещения точки A (рисунок 2) зависит минимальный (гарантированный) остаточный ресурс, найденный по формуле:

$$t_0 = t_\Pi \frac{\Delta x_*}{x_* - \Delta x_*}. \quad (7)$$

Более надежное прогнозирование остаточного ресурса основано на непрерывном отслеживании технического состояния объекта. Для этого применяют специальные датчики – измерители уровня накапливаемого усталостного повреждения или износа. Существует два основных метода применения таких датчиков: во-первых, для регистрации нагрузок, их автоматического пересчета в накопленное усталостное повреждение и вывода этой информации на пульт оператора для принятия соответствующего решения по управлению объектом; во-вторых, для непрерывной регистрации накопленного повреждения или степени износа. Поскольку накопленное усталостное повреждение в местах установки датчиков изменяется в зависимости от их некоторых физических характеристик (обычно электрического сопротивления), именно эти изменения и регистрируются специальными приборами. При этом необходимо установить корреляционную зависимость между рассматриваемыми величинами

нами. При использовании второго метода обычно применяют фольговые или полупроводниковые датчики, электрическое сопротивление которых при циклическом нагружении изменяется и коррелируется с накопленным усталостным повреждением. Простейший вариант использования таких датчиков для прогнозирования остаточного ресурса состоит в сопоставлении изменения электрического сопротивления ψ с критическим значением этого сопротивления $\psi_{кр}$, соответствующим моменту разрушения.

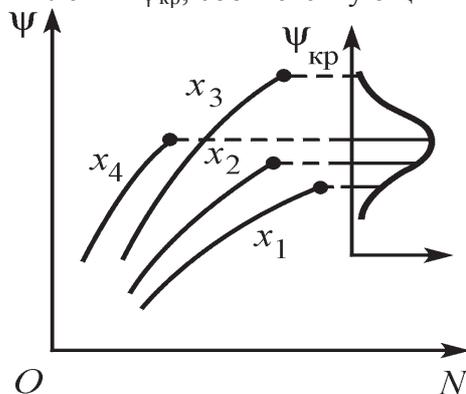


Рисунок 3

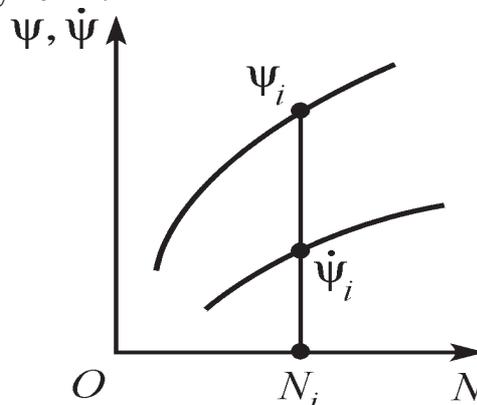


Рисунок 4

Зависимость $\psi = \psi(N, x)$ (где N – число циклов нагружения; x – амплитуда циклов деформирования материала в местах установки датчиков) и значение $\psi_{кр}$ устанавливают для данной серии датчиков при тарировочных испытаниях образцов в лабораторных условиях. Результаты таких испытаний представляют в виде графиков (рисунок 3). Как правило, величина $\psi_{кр}$ имеет статистический разброс значений. Пусть этот разброс оценивается функцией $P(\psi_{кр})$. Тогда вероятности безотказной работы на интервалах времени $(0 - t_*)$ и $(t_* + T_\gamma)$ будут определяться как $P\{\psi(t_*) < \psi_{кр}\}$ и $P\{\psi(t_* + T_\gamma) < \psi_{кр}\}$ соответственно. Подставляя

эти значения вероятностей в $\gamma = \frac{P(t_* + T_\gamma)}{P(t_*)}$, получаем уравнение для нахождения γ %-ного остаточного ресурса.

Использование другого варианта применения датчиков накопления усталостных повреждений дает возможность установить зависимость $x(N)$ или определить вероятностные характеристики процесса с последующим использованием этих данных для прогнозирования остаточного ресурса. В этом случае процесс изменения электрического сопротивления $\psi(N, x)$ датчиков описывается кинетическим уравнением:

$$\frac{d\psi}{dN} = f(\psi, x), \quad (8)$$

где функция $f(\psi, x)$ определяется по тарировочным данным.

Эту зависимость используют следующим образом. Пусть в результате наблюдения за работой конструкции при эксплуатации непрерывно регистрируется процесс $\psi = \psi(N)$ и вычисляется его производная $\dot{\psi} = \dot{\psi}(N)$. Тогда для нахождения амплитуды x_i в момент, соответствующий определенному номеру цикла нагружения N_i , достаточно решить уравнение (8) относительно $x = x_i$ при заданных значениях $\psi = \psi_i$ и $\dot{\psi} = \dot{\psi}_i$ (рисунок 4). Повторяя такие вычисления, можно получить последовательность амплитуд x_i ($i = 1, 2, \dots$). Использовать данную информацию можно следующим образом. Пусть известно, что за N_0 циклов нагружения значение функции $\psi(N)$ изменилось на величину $\Delta\psi$, а процесс нагружения выражается последовательностью циклов с плотностью распределения вероятностей амплитуд $p(x, \alpha)$ с неизвестным параметром α , который необходимо найти.

Будем считать, что функцию $f(\psi, x)$ можно представить в виде произведения двух

функций: $f_1(\psi)$ и $f_2(x)$, первая из которых зависит только от аргумента ψ , а вторая – только от аргумента x . Проинтегрировав уравнение (8), получаем:

$$\int_0^{\Delta\psi} \frac{d\psi}{f_1(\psi)} = g = \sum_{i=1}^{N_0} f_2(x_i), \quad (9)$$

где g – значение вычисленного интеграла.

Осреднив обе части равенства (9) и предположив, что его левая часть имеет малую флуктуацию, получаем уравнение:

$$g = N_0 \int_0^{\infty} f_2(x) p(x, \alpha) dx, \quad (10)$$

которое является уравнением с одним неизвестным α . Решив его, находим плотность распределения вероятностей $p(x, \alpha)$ амплитуд циклов нагружения.

Данный вариант расчета можно использовать, если число N_0 циклов нагружения неизвестно. Тогда к уравнению (30) необходимо добавить еще одно уравнение, чтобы получить систему из двух уравнений с двумя неизвестными. Для этого кроме первого датчика, фиксирующего заданный процесс нагружения, на специальном устройстве (мультипликаторе) устанавливают второй датчик, который фиксирует процесс $x_2(t) = hx(t)$, где h – коэффициент усиления мультипликатора. Мультипликатор, представляющий собой пластину с локальным сужением, изображен на рисунке 5.

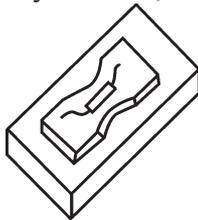


Рисунок 5

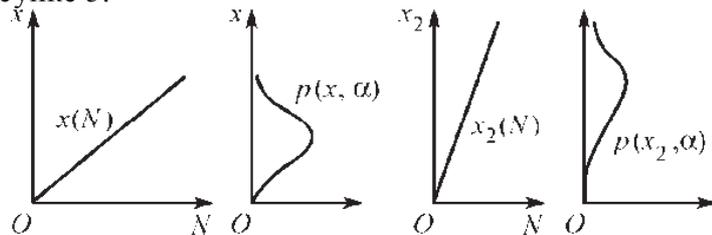


Рисунок 6

Принцип его действия состоит в том, что датчик устанавливают в области концентрации напряжений, и поэтому он показывает повышенное значение изменения его электрического сопротивления. Коэффициент h определяют при тарировке. Возможные изменения сопротивлений первого и второго датчиков показаны на рисунке 6. По аналогии с соотношениями (9) и (10) для второго датчика можно записать:

$$g_2 = g(\psi) \Big|_0^{\Delta\psi_2} = N_0 \int_0^{\infty} f_2(x_2) p(x_2, \alpha) dx_2, \quad (11)$$

где: $\Delta\psi_2$ – изменение сопротивления второго датчика.

Соотношения (10) и (11) являются системой двух уравнений с двумя неизвестными: N_0 и α . Для получения единственного решения этой системы необходимо, чтобы эти уравнения были функционально независимыми. Это накладывает определенные ограничения на вид функций $f_2(x)$ и $p(x, \alpha)$.

Заключение

Предложенные методы расчетов позволяют с большей достоверностью прогнозировать остаточный ресурс в ситуациях диагностирования натуральных конструкции и при непрерывном отслеживании их технического состояния.

Литература

1. Вибрации в технике: Справочник. Т. 1 под редакцией В.В. Болотина. Колебания линейных систем. – М.: Машиностроение, 1999.

2. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
3. Гусев А.С., Карунин А.Л., Крамской Н.А., Стародубцева С.А. Надежность механических систем и конструкций при случайных воздействиях. – М.: МГТУ МАМИ, 2001.
4. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучести конструкций при случайных нагрузках. - М.: Машиностроение, 1989.
5. Стародубцева С.А., Гусев А.С. Прогнозирование остаточного ресурса конструкций и деталей машин. Известия МГТУ МАМИ научный рецензируемый журнал. Том 1. М. Октябрь 2012г.
6. Whitney C.A. Random processes in physical systems. New York.: John Willey, 1990.