

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ПО ИЗНОСУ УЗЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ

Д.т.н, профессор Лелеков В.И.<sup>1</sup>, асп. Авцинова А.Н.<sup>1</sup> (Московский Государственный Открытый Университет им. В.С.Черномырдина)

*АННОТАЦИЯ.* Рассмотрены различные схемы прогнозирования долговечности отдельных узлов изделия по результатам ускоренных испытаний. Предложен новый способ оценки долговечности изделий.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* прогнозирование, долговечность, метод наименьших квадратов.

Проблема прогнозирования долговечности сложных механических изделий становится особенно актуальной, когда нет достаточного статистического материала по эксплуатации, а натурные испытания длительны или дорогостоящи. Наиболее распространенный путь решения этой задачи базируется на ускоренных испытаниях [1].

Перед постановкой ускоренных ресурсных испытаний на основе тлеющего опыта проводят углубленный инженерный анализ особенностей работы изделия во всех эксплуатационных режимах, выделяют слабые в отношении долговечности узлы и основные процессы отказа в них. Результаты анализа используют при составлении программы испытаний, интерпретации полученных данных и прогнозировании долговечности. Часто не удается проведение ускоренных испытаний изделия в целом, а при испытаниях отдельных узлов – доведение их до отказа. Модели прогнозирования долговечности изделия, разработанные по результатам таких испытаний, рассматриваются в настоящей статье.

Рассмотрим сначала отдельный узел в случае, когда процесс его износа связан с одним параметром условий работы. Пусть случайная функция  $y(\tau, \theta)$  описывает процесс износа, то есть постепенное накопление повреждений в узле, описанном в работе [2], где значение  $y$  характеризует износ; параметр  $\theta$  указывает условия процесса (например температуру, давление и т.п.); аргумент  $\tau$  интерпретируется как наработка узла, измеряющая продолжительность действия или работу сил разрушения (например, время пребывания под нагрузкой, число пусков или других циклов и т.п.). Задачей ускоренных испытаний узла является изучение износа с учетом его разброса в зависимости от условий работы и наработки, т. е. измерение в ряде точек  $\tau_i, \theta_j$ , ( $i = 1, 2, \dots, I$ ;  $j = 1, 2, \dots, J$ ) значений износа  $y_{ij}^{(k)}$  для нескольких образцов ( $k = 1, 2, \dots, K$ ). Ускорение испытаний достигается за счет жесточения условий работы, например, при  $\theta \geq \theta_0$ , где  $\theta_0$  – номинальное

значение параметра  $\theta$  (т. е. нормальные условия работы).

Рассмотрим случай, когда в испытаниях узлы не доводят до отказа, и контролируемой величиной износа является среднее по образцам значение износа –  $\bar{y}(\tau, \theta)$ . Обозначим:

$$\bar{y}_{ij} = \bar{y}(\tau_i, \theta_j) = \sum_k y_{ij}^{(k)} / k *$$

Для прогнозирования долговечности необходимо:

- назначить предельное (максимальное) значение  $y_m$  для переменной  $y$ ;
- на основе имеющихся сведений о процессе установить зависимость износа от переменных  $\tau, \theta$  в виде аналитической функции  $f(\tau, \theta, \bar{\alpha})$ , которая содержит неизвестные коэффициенты  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \bar{\alpha}$ .

Значения коэффициентов находят в зависимости  $y_{ij}^{(k)}$  от  $\tau_i, \theta_j$ , полученной в результате испытаний. В частности, например, методом наименьших квадратов могут быть вычислены значения  $(\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_n^*) = \bar{\alpha}^*$  названных коэффициентов, которые минимизируют среднеквадратичное расхождение эмпирических и теоретических точек:

$$\min \sum (\bar{y}_{ij} - f(\tau_i, \theta_j, \bar{\alpha}))^2$$

Таким образом определяют функцию  $f(\tau, \theta, \bar{\alpha}^*)$ . Далее, путем экстраполяции ее на номинальные условия работы –  $f(\tau, \theta, \bar{\alpha}^*)$  находят предельную наработку  $\tau_0$ , отвечающую предельному износу  $y_m$ . Для этого решают следующее уравнение относительно величины  $\tau_0$ :

$$y_m = f(\tau_0, \theta_0, \bar{\alpha}^*) \quad (1)$$

Результаты испытания приведены на рис. 1, где эмпирические точки  $\bar{y}_{ij}$  в зависимости от  $\tau_i, \theta_j$ , нанесены совместно с указанием среднеквадрата-

<sup>1</sup> 107996, Россия, Москва, ул. Павла Корчагина, 22

точного разброса износа:

$$\sigma_y(\tau_i, \theta_j) = \sqrt{\sum_k [y_{ij}^{(k)} - \bar{y}_{ij}]^2 / (k-1)} \quad (2)$$

Там же приведены верхние  $y_{ij}^+$  и нижние  $y_{ij}^-$ , доверительные границы для среднего из  $\bar{y}$  в точках,  $\tau_i, \theta_j$ , определяемые в соответствии с нормальным распределением по формулам (3):

$$\left. \begin{aligned} y_{ij}^+ &= \bar{y}_{ij} + \frac{\sigma_y(\tau_i, \theta_j)}{\sqrt{k-1}} t(\beta, k-1) \\ y_{ij}^- &= \bar{y}_{ij} - \frac{\sigma_y(\tau_i, \theta_j)}{\sqrt{k-1}} t(\beta, k-1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $t(\beta, k-1)$  – квантиль распределения Стьюдента с  $(K-1)$  степенями свободы для доверительной вероятности  $\beta/3$ .

Для оценки разброса времени до отказа необходимо изучить зависимость от параметров  $\tau, \theta$  (т. е. от координат точек  $I, j$ ) величины среднеквадратичного отклонения экспериментальных точек от аппроксимационной кривой:

$$\Delta y(\tau_i, \theta_j) = \sqrt{\sum_k [y_{ij}^{(k)} - f(\tau_i, \theta_j, \bar{\alpha}^*)]^2 / (k-1)} = \sqrt{\sigma_y^2(\tau_i, \theta_j) + \varepsilon_y^2(\tau_i, \theta_j)} \quad (4)$$

где  $\varepsilon_y^0(\tau_i, \theta_j) = (y_{ij} - f(\tau_i, \theta_j, \bar{\alpha}^*))$  – погрешность аппроксимации функции  $y(\tau, \theta)$  кривой  $f(\tau, \theta, \bar{\alpha}^*)$  в точке  $\tau_i, \theta_j$ . В соответствии с выражением (4) целесообразно рассмотреть по отдельности величины  $\sigma_y, \varepsilon_y$  аналогично исследованию среднего износа

носа  $\bar{y}_0$ . В результате такого анализа оценивается величина отклонения  $\Delta y = \Delta y(\tau_0, \theta_0)$  для номинальных условий в предельной точке по наработке. На основе представления

$$\begin{aligned} y_m &= f(\tau_0, \theta_0, \bar{\alpha}^*) \pm \Delta y(\tau_0, \theta_0) \cong \\ &\cong f(\tau_0, \theta_0, \bar{\alpha}^*) + \left[ \frac{\partial f(\tau_0, \theta_0, \bar{\alpha}^*)}{\partial \tau} \right]_{\tau=\tau_0} \pm \Delta y \quad (5) \end{aligned}$$

и уравнения (1) получаем среднеквадратичное отклонение для предсказываемого времени до отказа:

$$\Delta_\tau^0 = \Delta_y^0 / \left[ \frac{\partial f(\tau_0, \theta_0, \bar{\alpha}^*)}{\partial \tau} \right]_{\tau=\tau_0} \quad (6)$$

Перейдем теперь к случаю, когда ускоренные испытания завершаются отказом изделий. В этом случае прогнозирование обычно проводят не по вышеописанной схеме, хотя она полностью применима, когда в ходе испытаний выполняется измерение износа. Если измерение износа осуществить невозможно, то результатом испытаний является зависимость наработки до отказа от условий работы. Среднее значение этой величины  $\tau_m$  в зависимости от параметра  $\theta$  ( $\tau_m = \tau_m(\theta)$ ) обычно аппроксимируют аналитической функцией и путем ее экстраполяции, как показано на рис. 2, определяют среднее значение ресурса  $\tau_0 = \tau_m(\theta_0)$  в выбранных единицах измерения наработки. Такой способ прогнозирования широко применяется,

например, при обработке результатов ускоренных ресурсных испытаний изоляции электрических машин [4]. На рис. 2, кроме того, указан среднеквадратичный разброс  $\sigma_\tau(\theta)$  экспериментальных точек около среднего значения, а также доверительные границы  $\tau_m^+(\theta), \tau_m^-(\theta)$ , построение которых для нормального распределения проводится по соотношениям, аналогичным (3).

Для оценки разброса предсказываемого значения времени до отказа следует проанализировать зависимость от параметра  $\theta$  характеристики  $\Delta_\tau^2(\theta) = \varepsilon_\tau^2(\theta) + \sigma_\tau^2(\theta)$ , составляющая  $\varepsilon_\tau$  которой представляет погрешность аппроксимации среднего значения  $\tau_m(\theta)$  теоретической кривой. Аналогично ранее рассмотренному, целесообразно раздельное изучение

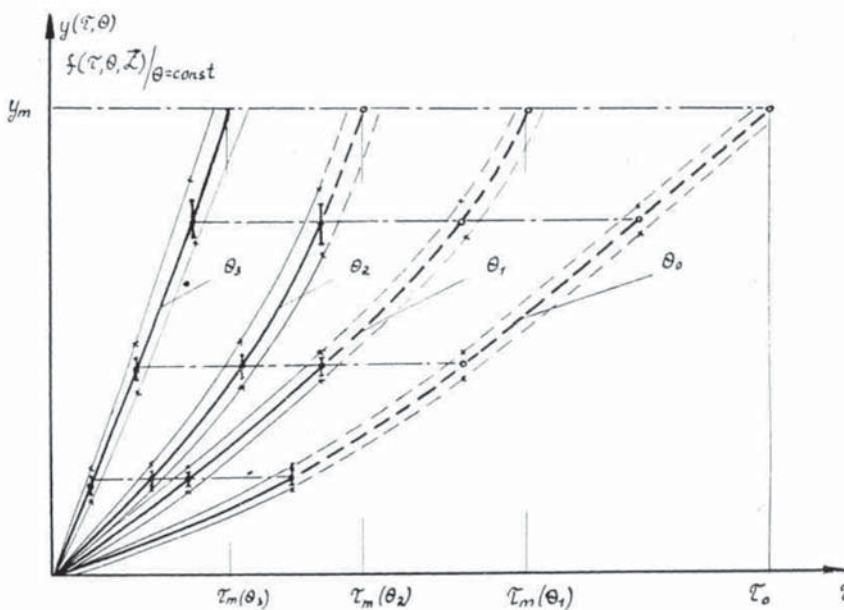


Рис. 1. Аппроксимация и экстраполяция  $\bar{y}(\tau, \theta)$ .

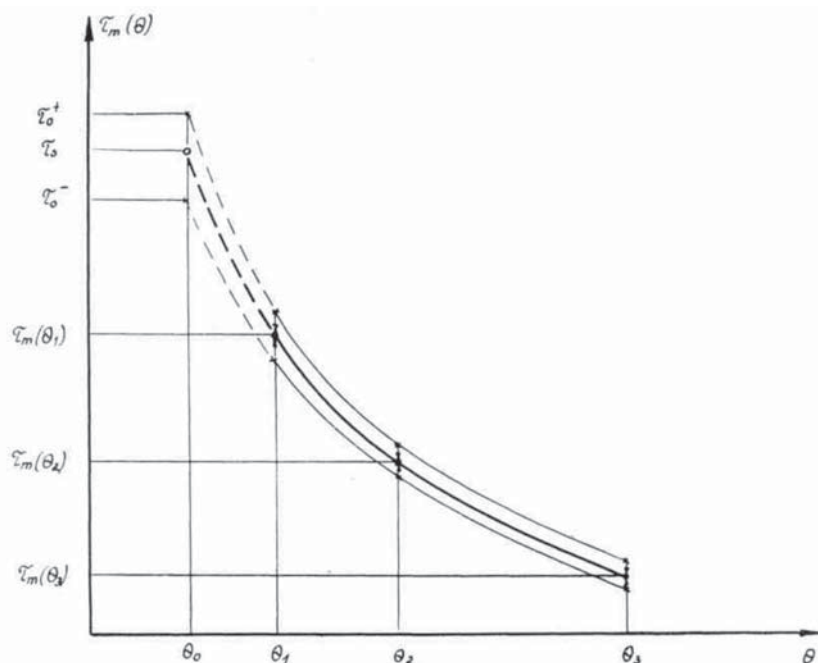


Рис. 2. Аппроксимация и экстраполяция зависимости  $\tau_m(\theta)$ .

зависимостей  $\varepsilon_r(\theta)$ ,  $\sigma_r(\theta)$ . Если  $\varepsilon_r < \sigma_r$  или  $\varepsilon_y < \sigma_y$ , и точность экстраполяции  $\sigma_y$ ,  $\sigma_r$  на нормальные условия ( $\theta = \theta_0$ ) высокая (что выясняется при конкретном рассмотрении), то возможна оценка доверительного интервала для прогнозируемого среднего значения времени до отказа, как показано на рис. 1, 2. Значения  $\sigma_y$ ,  $\sigma_r$  оценивают, если необходимо рассматривать не среднее значение ресурса, а гамма-процентный ресурс.

С целью установления связи между описанными схемами рассмотрим следующий способ обработки информации в случае испытаний без отказов. Сначала оценим величину наработки до отказа путем изучения экстраполяции зависимости износа от наработки при фиксированных величинах  $\theta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$  параметра  $\theta$ . Затем с помощью второй схемы выполним экстраполяцию полученных средних значений наработки до отказа на нормальные условия (см. рис. 1, 2). Такой способ прогнозирования, в отличие от первого из вышеописанных, более удобен, так как предусматривает исследование функций одной переменной. Для сокращения объема испытаний и повышения достоверности прогнозирования иногда целесообразно совмещать вышеописанные схемы прогнозирования.

После получения оценок долговечности узлов необходимо их объединить с целью оценки долговечности изделия. Для выполнения такого синтеза удобно использовать модель слабейшего звена при формулировке условия работоспособности изделия и модель эксплуатации – при сравнении между собой износов узлов. Согласно модели слабейшего звена считают, что изделие работает, если исправны все выделенные узлы, и отказывает, если отказал хотя бы один из них /5/. С помощью модели эксплуатации устанавливают коэффици-

енты пропорциональности между наработками узлов разного вида на основе характерного периода работы изделия в эксплуатации: например, в течение календарного года эксплуатации изделие наработывает определенное число часов, простаивает некоторое время, подвергается включениям определенное число раз, обслуживанию и т.п. После приведения наработок узлов к единой шкале определяют ресурс изделия, как минимум наработок до отказа узлов, и вероятность безотказной работы, как произведение вероятностей для узлов.

В практике встречаются ситуации, когда износ узлов связан с несколькими процессами, отвечающими разным режимам работы.

Такой процесс износа описывается функцией  $y(\tau^1, \tau^2, \dots, \tau^s, \theta^1, \theta^2, \dots, \theta^s)$ ,

где  $\tau_l$ ,  $\theta_l$  – наработка и параметр (условие) соответственно  $l$ -го процесса износа,  $l = 1, 2, \dots, S$ . Для прогнозирования долговечности узла в этом случае следует применить вышеописанные схемы по отношению к каждому процессу (режиму) и установить предельное значение наработки  $\tau_m^{(l)}$  по отдельности для каждого режима. Оценка долговечности узла в эксплуатационном режиме в единицах наработки изделия  $t_0$  может быть определена из следующего уравнения, полученного на основе гипотезы линейного суммирования повреждений (гипотезы Майнера, /6/):

$$t_0 \sum_l \frac{x_l}{\tau_m^{(l)}} = 1; \quad \tau_m^{(l)} = x_l t; \quad l = 1, 2, \dots, s, \quad (7)$$

где  $x_l$  – коэффициент перевода наработки  $t$  в эксплуатационном режиме  $l$  в наработку  $\tau^{(l)}$ .

Отметим, что испытания для установления значений  $i^{(n)}$  в режиме  $n$  следует проводить в условиях:  $\theta^l = \theta_0^l$ ,  $l \neq n$ , если процессы износа в узле коррелируют и не поддаются исследованию по отдельности.

Проиллюстрируем изложенный подход к прогнозированию долговечности на примере бессальникового водяного насоса (варианты конструкции таких насосов приведены в /7/). В качестве узлов, определяющих долговечность насоса, рассмотрим подшипники скольжения и обмотку электродвигателя. Состояние самосмазывающихся подшипников обычно характеризуют величиной объемного или линейного износа пары трения. Этот износ связан с наличием двух режимов: стационарного (длительной работы) и переходного (пусков-остановов). Аргументами Функции износа в данном случае являются суммарное время ра-



боты и число пусков, как показано в /8/, а параметрами режимов – окружная скорость, удельное давление, температура. В соответствии с вышеописанным, для оценки долговечности подшипника следует осуществить ускоренные испытания в каждом из режимов. Предельный износ подшипника определяют в результате анализа конструкции подшипника с учетом взаимодействия его с другими элементами насоса.

Состояние изоляции обмотки электродвигателя характеризуется величиной пробивного напряжения, которое снижается вследствие старения изоляции в зависимости от времени пребывания в горячих условиях. Пробой изоляции происходит в результате превышения случайным коммутационным перенапряжением величины пробивного напряжения, как отмечено в /4/, поэтому наряду с временем работы необходимо учитывать число коммутаций.

Ускоренные испытания (испытания при повышенной температуре) проводят обычно для ряда секций. Эти испытания направлены на установление характеристик распределения пробивного напряжения секции как функции времени работы и температуры. Пересчет характеристик пробивного напряжения секции на изоляцию обмотки всего электродвигателя выполняют по модели слабейшего звена, рассматривая секции в качестве однотипных звеньев. При этом, как показано в /4/, широко используется распределение Вейбулла для пробивного напряжения изоляции, которое обладает свойством самовоспроизведения в указанном пересчете согласно /5/. Для прогнозирования долговечности изоляции применимы обе вышеописанные схемы при условии достоверной

имитации в испытаниях пробивного напряжения, действующего в эксплуатации.

Оценка долговечности насоса по модели слабейшего звена находится после приведения предельных наработок для подшипников и изоляции к единой шкале как минимальное значение из этих наработок. Коэффициенты пропорциональности между наработками узлов на стадии проектирования обычно принимают по моделям эксплуатации прототипов изделия.

Описанный подход к прогнозированию долговечности целесообразно использовать для объединения результатов испытаний отдельных узлов с данными по износу, полученными из эксплуатации прототипов.

### Литература

1. Перроте А.И., Сторчак М.А. Ускоренные испытания изделий на надежность. М., Машиностроение, 1975.
2. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. М., Советское радио, 1966.
3. Смирнов Н.В., Дунин-Борковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М., Наука, 1969.
4. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. Л., Энергия, 1976.
5. Справочник по надежности. Под редакцией В.Айресона. Т.1.М., Мир, 1969.
6. Карташов Г.Д. О гипотезе Майнера и принципе Семякина. – Известия АН СССР. Серия: Техническая кибернетика, 1970, № 6, с. 71.
7. Синев Н.М., Удовиченко П.М. Бессальниковые водяные насосы. М., Атомиздат, 1972.
8. Баташов Б.А., Гальпер Р.Р., Леванов З.Л. Испытания материалов подшипников при смазке водой. – Судостроение, 1974, №2, с. 33.

