

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

УДК 681.51

Геннадий Александрович Беркетов
к.т.н., профессор, профессор кафедры Автоматизированных систем обработки информации и управления, Институт компьютерных технологий Московского государственного университета экономики, статистики и информатики.

Анатолий Петрович Цуркин
к.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры Автоматизированных систем обработки информации и управления, Институт компьютерных технологий Московского государственного университета экономики, статистики и информатики.

Денис Владимирович Головкин
аспирант кафедры Автоматизированных систем обработки информации и управления, Институт компьютерных технологий Московского государственного университета экономики, статистики и информатики.

Статья посвящена проблеме прогнозирования остаточного ресурса сложных технических систем на стадии их эксплуатации. Эту проблему приходится решать, например, при замене устройств и приборов, выработавших назначенный ресурс (предупредительные замены), а также в случае продления сроков эксплуатации системы сверх гарантийных. Предлагаемый метод позволяет также организовать профилактическое обслуживание и ремонт системы с учетом её текущего технического состояния, что позволяет снизить эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: надежность сложных технических систем, прогнозирующий параметр, моделирование надежности, обслуживание систем по состоянию, оценка остаточного ресурса.

Gennadiy A. Berketov,
PhD in Engineering, Professor, the Department of Automated Systems of Information Processing and Management, Institute of Computer Technology, Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics,
E-mail: GABerketov@mesi.ru

Anatoly P. Tsurkin,
PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor, the Department of Automated Systems of Information Processing and Management, Institute of Computer Technology, Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics,
E-mail: APcurkin@mesi.ru

Denis V. Golovko,
Post-graduate student, the Department of Automated Systems of Information Processing and Management, Institute of Computer Technology, Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics

FORECASTING OF A REMAINING LIFE OF ENGINEERING SYSTEMS BY USING THE PARAMETRIC MODELS OF RELIABILITY VARIATION

The article is devoted to the problem of forecasting of a remaining life of complex engineering systems at the operational stage. The example of solving this problem is replacement of devices if their specified life has been completed (preventive replacements) or if we extend the lifetime a system in addition to guarantee. This method allows to organize a preventive maintenance of a system taking into account its technical position at this moment all that lead to reducing the maintenance costs.

Keywords: reliability of complex engineering systems, predictor, reliability modeling, system maintenance, assessment of remaining life.

1. Введение

Прогнозирование долговечности объектов – важная составная часть теории надежности. Ресурс и срок службы, будучи показателями надежности, являются одними из основных понятий теории надежности. Особое место в теории надежности занимает прогнозирование ресурса объектов на стадии эксплуатации. В отличие от стадии проектирования, когда прогнозу подлежит ресурс генеральной совокупности объектов, прогнозирование ресурса на стадии эксплуатации выполняется для конкретных объектов. Определению подлежит остаточный ресурс, значение которого является возможной продолжительностью эксплуатации объекта с данного момента времени до достижения параметром технического состояния его предельного значения. Эту проблему приходится решать, например, при замене устройств и приборов, выработавших назначенный ресурс (предупредительные замены), а также в случае продления сроков эксплуатации сверх гарантийных.

Особый практический интерес представляет проблема прогнозирования индивидуального остаточного ресурса подсистем (или технической системы в целом) по результатам наблюдений за их состоянием в процессе эксплуатации. Полученные при подобном прогнозировании оценки, в частности, могут быть использованы при планировании эксплуатационных процессов для сложных технических комплексов (СТК).

Обычно предельная наработка СТК определяется как 95%-й гамма-ресурс, т.е. фактический ресурс большинства объектов совокупности с высокой вероятностью превышает гарантийный. Индивидуальная оценка технического состояния объектов позволяет обосновано продлевать их сроки эксплуатации.

Контроль технического состояния объектов основывается на оценке изменений диагностических параметров. Достижение параметром предельной величины определяет отказ объекта. При этом принимают, что существует полное соотношение (жесткая связь) между потерей объектом работоспособности и моментом достижения его параметром предельной величины.

Выбор диагностических параметров осуществляется на основе анализа эксплуатационной нормативно-справочной документации, оценки их информативности и доступности для измерений. Существенное влияние на выбор параметров оказывает также наличие необходимых средств диагностирования. Например, при оценке остаточного ресурса дизельных двигателей используют следующие диагностические параметры: давление масла в системе смазки, расход масла на угар, герметичность нагнетательных клапанов, давление наддува под нагрузкой и др.

2. Математическая модель оценки остаточного ресурса

На реальный процесс изменения параметров технического состояния объектов оказывает влияние значительное количество технологических и эксплуатационных факторов.

Изменение параметра состояния объекта под действием первой группы факторов в постоянных эксплуатационных условиях обычно характеризуется плавной возрастающей (убывающей) кривой. Если взять не один объект, а несколько, то получим совокупность возрастающих (убывающих) кривых, отличающихся друг от друга интенсивностью изменения параметра (рис. 1).

Такую совокупность кривых получают обычно в результате заводских испытаний. Изменения параметра состояния объекта под влиянием второй группы факторов происходит уже не по плавной, а по ломаной возрастающей кривой (рис. 2).

Причем резкое увеличение интенсивности изменения параметра в отдельные моменты обусловлено случайными неблагоприятными условиями эксплуатации (зима, лето).

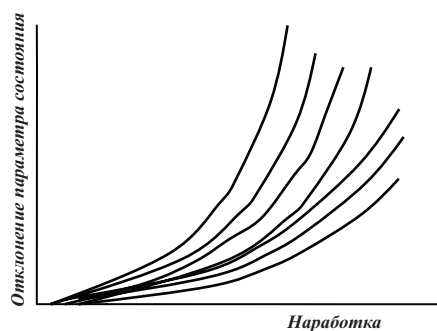


Рис. 1. Характер изменения диагностических параметров под действием технологических факторов

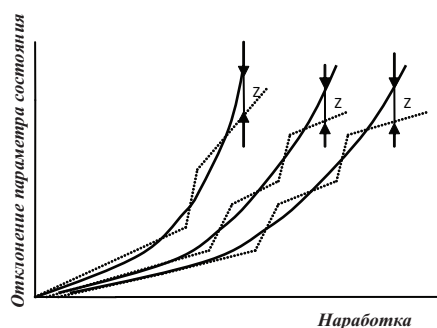


Рис. 2. Характер изменения диагностических параметров под действием эксплуатационных факторов

При прогнозировании технического состояния объектов, учитывая, что некоторые изменения эксплуатационных условий носят ограниченное последствие, кривую изменения параметра состояния, с достаточной точностью, можно аппроксимировать гладкой кривой, как изображено на рис. 2.

Выбор и обоснование функции, описывающей процесс изменения параметра, является весьма важным моментом в разработке методов прогнозирования. От выбора аппроксимирующей функции в конечном итоге зависят погрешность и трудоемкость прогнозирования.

Вначале рассмотрим модель прогнозирования, в которой используется единственный диагностический параметр.

Обозначим через $U(t)$ значение параметра, отвечающее наработке t . В общем случае функция $U(t)$ является случайной, ее реализация для конкретного объекта зависит от ряда случайных факторов как технологических, так и эксплуатационных. Таким образом,

$$U(t) = U(t, q) \quad (1)$$

где q – вектор значений случайных факторов.

Вектор q часто называют вектором напряжений или нагрузок.

В общем случае $q = q(t)$, т. е. q является вектор-функцией.

При расчетах удобно использовать нормированные значения параметра

$$\bar{U}(t) = \frac{U(t) - U_n}{U_n - U_n},$$

где U_n – предельное значение параметра состояния, при котором вероятность отказа превышает допустимое значение;

U_n – номинальное значение параметра.

Для упрощения обозначений вместо символа $\bar{U}(t)$ будем использовать значение $U(t)$.

В дальнейшем предполагается, что нормированная функция изменения диагностического параметра $U(t, q)$ является монотонной и принимает только положительные значения при любой реализации случайного вектора q . Данное требование не является слишком жестким, поскольку большинство диагностических параметров с достаточной точностью аппроксимируются монотонными функциями.

Считая, что параметр U полностью характеризует уровень износа объекта, выведем уравнение, которое описывает изменение параметра U во времени.

Пусть текущая наработка равна t . Пренебрегая последствием, примем, что приращение функции $U(t)$ на малом интервале времени $[t, t + dt]$ зависит лишь от значения $U(t)$ в начале интервала и нагрузок (напряжений), действующих на этом отрезке. Тогда

$$\frac{dU}{dt} = f(U, q). \quad (2)$$

Для того чтобы уравнение (2) описывало кумулятивный процесс накопления износных явлений, функция $f(U, q)$ должна быть неотрицательной. Кроме того, на функцию f следует наложить ограничения, при которых решение уравнения (2) существует и является единственным.

При фиксированном q время $T(q)$ от начала эксплуатации объекта до истощения его ресурса можно найти, решив обратную краевую задачу для уравнения (2) с граничными условиями $U(0) = 0$ $U(T) = 1$. Показатель $U(t)$ соответствует доле израсходованного ресурса, поэтому равенство $U(T) = 1$ означает, что в момент T ресурс объекта израсходован полностью.

Если для процесса износа объекта выполняется свойство автотель-

ности, уравнение (2) можно конкретизировать.

С математической точки зрения, автотельность процесса накопления «повреждений» (износа) означает, что правая часть уравнения (2) может быть представлена в виде произведения двух множителей, один из которых зависит только от U , а второй только от q , т. е.

$$\frac{dU}{dt} = f_1(U) f_2(q). \quad (3)$$

В общем случае $q = q(t)$, т. е. является вектор-функцией. Уравнение решается методом разделения переменных.

3. Вывод формул для прогнозирования остаточного ресурса

Условия, накладываемые на функции $f_1(U)$ и $f_2(q)$, сводятся к требованию существования интегралов в левой и правой частях соотношения

$$\int_0^U \frac{dU}{f_1(U)} = \int_0^t f_2[q(\tau)] d\tau,$$

причем левая часть должна быть нормирована к единице:

$$\int_0^1 \frac{dU}{f_1(U)} = 1. \quad (4)$$

Если интеграл (4) отличен от единицы, необходимо выполнить перенормировку функций $f_1(U)$ и $f_2(q)$ в правой части уравнения (3).

Пусть, например, уравнение для диагностического параметра некоторого устройства представлено в виде $\frac{dU}{dt} = (1-U)^{-\mu} f_2(q)$, где $\mu > 0$.

Поскольку

$$\int_0^1 (1-U)^{-\mu} dU = (1+\mu)^{-1} \neq 1,$$

то для приведения уравнения к требуемому виду необходимо умножить обе его части на $(1+\mu)$.

Рассмотрим частный случай уравнения (2), когда его правая часть не зависит от параметра U . При заданном процессе нагружения $q(t)$ правая часть такого уравнения – явная функция времени. Решение уравнения с начальным условием $U(0) = 0$ имеет вид

$$U(t) = \int_0^t f[q(\tau)] d\tau. \quad (5)$$

Время T до достижения предельного состояния определим из условия $U(T) = 1$.

Введя обозначение $T_b(q) = 1 / f(q)$, приходим к следующему уравнению для определения T :

$$\int_0^T \frac{d\tau}{T_2[q(\tau)]} = 1.$$

Если $q = \text{const}$, то $T = T_b(q)$. Это означает, что величина $T_b(q)$ равна ресурсу при стационарном режиме эксплуатации с заданным значением вектора q .

Введенное понятие позволяет конкретизировать уравнение (3). Предположим, что зависимость $U = U(t, q)$ при $q = \text{const}$, введением безразмерной переменной $t / T_b(q)$ можно привести к виду

$$U_b = \varphi[t / T_b(q)]. \quad (6)$$

Функция $\varphi[z]$ в представлении (6) должна удовлетворять условиям $\varphi[0] = 0$, $\varphi[1] = 1$. Кроме того, при всех рассматриваемых значениях z функция $\varphi[z]$ должна быть монотонной. Принятое допущение гарантируют существование обратной функции $\varphi^{-1}[U_b]$.

Продифференцировав соотношение (6) по t и воспользовавшись обратной функцией $\varphi^{-1}[U_b]$, получим

$$\frac{dU_b}{dt} = \frac{\varphi'[\varphi^{-1}(U_b)]}{T_2(q)}. \quad (7)$$

Соотношение (7) получено при условии $q = \text{const}$. Но поскольку оно связывает приращение параметра U с его значением и уровнем нагрузки в рассматриваемый момент времени, то естественно предположить, что соотношение (7) является справедливым и в общем случае, когда $q = q(t)$. В результате приходим к уравнению

$$\frac{dU}{dt} = \frac{f_1(U)}{T_b(q)}, \quad (8)$$

где $f_1(U) = \varphi'[\varphi^{-1}(U)]$.

Разделяя в уравнении (8) переменные и интегрируя по t при начальном условии $U(0) = 0$, получим:

$$\int_0^U \frac{dU}{f_1(U)} = \int_0^t \frac{d\tau}{T_2[q(\tau)]}. \quad (9)$$

Обозначим

$$U^*(t) = \int_0^t \frac{d\tau}{T_2[q(\tau)]}. \quad (10)$$

Напомним, что $q(t)$ является случайной вектор-функцией, поэтому $U^*(t)$ – случайная функция. Величина $U^*(t)$ характеризует износ объекта при

наработке t в условиях некоторой реализации $q(t)$.

Левая часть соотношения (10) удовлетворяет тождеству

$$\int_0^U \frac{dU}{\varphi'[\varphi^{-1}(U)]} = \varphi^{-1}(U). \quad (11)$$

Из соотношения (9) с учетом (10) и (11) окончательно получаем

$$U(t) = \varphi[U^*(t)]. \quad (12)$$

Формула (12) представляет собой основное соотношение для модели износа объекта, основанной на предположении об автомодельности этого процесса. Эта формула имеет важное практическое значение, поскольку позволяет целенаправленно формировать соотношения, связывающие значения диагностического параметра со степенями износа объекта.

В справочнике [3] для аппроксимации $\varphi(z)$ предлагается использовать степенную функцию. В этом случае формула (12) перепишется в виде

$$U(t) = [U^*(t)]^\gamma = \left(\int_0^t \frac{d\tau}{T_2[q(\tau)]} \right)^\gamma = \left(\frac{t}{T_2[q(t)]} \right)^\gamma, \quad (13)$$

где γ – положительный показатель степени.

При $\gamma < 1$ эта формула описывает замедляющийся процесс износа, а при $\gamma > 1$ – ускоряющийся процесс.

Зафиксируем значение $T_b[q(\tau)]$, положив его равным среднему значению T_b . Подобная замена эквивалентна предположению о том, что объект эксплуатируется в усредненном режиме $\bar{q}$. При сделанных предположениях формула (13) перепишется в виде $U(t) = (t / T_b)^\gamma$.

Полагая $T = T_b = t + t_{\text{ост}}$, после соответствующих преобразований получаем:

$$t_{\text{ост}} = t \left\{ [1 / U(t)]^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right\}. \quad (14)$$

Формула (14) позволяет прогнозировать остаточный ресурс объекта $t_{\text{ост}}$ при известном значении диагностического параметра U .

Отметим, что аналогичная формула применяется для прогнозирования остаточного ресурса дизельных двигателей.

В общем случае процесс изменения параметров объекта может иметь вид, приведенный на рис.3, т.е. содержать участки, как замедления, так и ускорения.

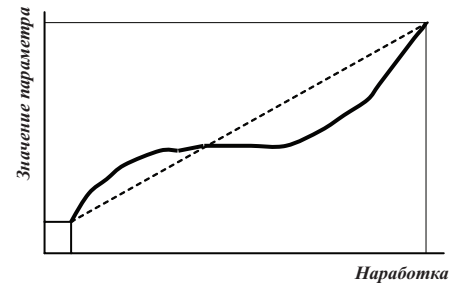


Рис. 3. Зависимость изменения диагностического параметра от наработки в общем случае

Для описания подобных процессов необходимо усовершенствовать модель (14), заменив постоянный показатель некоторой функцией, зависящей от текущей наработки t и используемого режима эксплуатации q .

$$t_{\text{ост}} = t \left\{ \left[1 / U(t) \right]^{\frac{1}{\gamma(t,q)}} - 1 \right\}. \quad (15)$$

Для использования формулы (15) с целью прогнозирования величины остаточного ресурса объекта $t_{\text{ост}}$ функцию $\gamma(t, q)$ следует заменить функцией $\gamma(t)$, которая является средней по ансамблю реализаций.

Функцию $\gamma(t)$ удобно аппроксимировать многочленом

$$\gamma(t) \approx \alpha_0 + 1 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 + \dots + \alpha_m \cdot t_m. \quad (16)$$

Коэффициенты в (16) могут быть определены как по результатам специальных экспериментов, так и по данным, полученным в ходе эксплуатации реальных технических систем. При обработке полученных данных можно использовать методы, изложенные в монографии [2].

Для повышения качества прогноза следует использовать не один, а несколько диагностических показателей (параметров). Вектор показателей обозначим

$$\bar{U}(t) = [U_1(t), U_2(t), \dots, U_m(t)].$$

Часто показатели, используемые при диагностировании объекта с достаточной точностью, можно считать независимыми. В этом случае определение остаточного ресурса объекта осуществляется по следующей схеме. Сначала определяется остаточный ресурс по каждому из параметров, т.е. находятся значения $t_1, t_2, \dots, t_m$. Затем вычисляется величина $t = \min \{ t_1, t_2, \dots, t_m \}$. Величина t принимается в качестве прогнозируемого остаточного ресурса.

4. Заключение

Оценка остаточного ресурса надежности сложных систем является

важной практической задачей. В статье разработана математическая модель и инструментарий для оценки остаточного ресурса систем. Особый практический интерес представляет предлагаемый метод прогнозирования индивидуального остаточного ресурса подсистем (или технической системы в целом) по результатам наблюдений за их состоянием в процессе эксплуатации. Полученные при подобном прогнозировании оценки, в частности, могут быть использованы при планировании эксплуатационных процессов для сложных технических комплексов.

Литература

1. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984.
2. Надёжность и эффективность в технике. Эффективность технических систем. Т. 3. М.: Машиностроение, 2004.
3. Справочник по прикладной статистике. Т. 1. /Под ред. Э. Ллойда, У. Лидермана, М.: Финансы и статистика, 2005.
4. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности: учебное пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.

References

1. Bolotin V. V. Forecasting of a resource of cars and konstruktion. M: Mechanical engineering, 1984.
2. Reliability and efficiency in equipment. Efficiency of technical systems. T. 3. M: Mechanical engineering, 2004.
3. Directory on applied statistics. T. 1. / Under the editorship of E.Lloyd, U.Liderman, M: Finance and statistics, 2005.
4. Polovko A.M. Gurov S. V. Bases of the theory of reliability: manual. – SPb. : BHV-Petersburg, 2006.