

Алгоритм индивидуального прогнозирования предельных экономически целесообразных сроков эксплуатации измерительных комплексов

А. Н. Новиков

Настоящий алгоритм предназначен для индивидуального прогнозирования остаточного ресурса измерительных комплексов (ИК) по критерию недопустимого возрастания эксплуатационных затрат. Основным результатом прогнозирования с помощью данного алгоритма является оценка значения нижней доверительной границы (НДГ) гамма-процентного остаточного ресурса ИК. Дополнительными результатами являются точечные и интервальные прогнозные оценки изменения эксплуатационных затрат, а также прогнозные значения оценок вероятности невыхода эксплуатационных затрат за предельно допустимый уровень. Выходные результаты алгоритма могут быть использованы как для обоснования решений по срокам проведения капитального ремонта, так и модернизации подвижных лабораторий измерительной техники.

Ключевые слова: измерительные комплексы, критерий недопустимого возрастания эксплуатационных затрат, оценка гамма-процентного остаточного ресурса, интенсивность метрологических отказов, качество измерений.

1. Введение

В зависимости от того, какой информацией обладает оператор, возможны различные методы определения предельного срока службы и остаточного ресурса машин и оборудования. Наиболее надежный прогноз остаточного ресурса может быть осуществлен, если выполнить полномасштабное техническое диагностирование с использованием соответствующих средств диагностики [1, 2], причем в некоторых случаях в режиме мониторинга. Такой подход требует больших затрат и поэтому, за исключением случаев, когда оцениваются единичные (уникальные) и дорогостоящие машины или технологические линии, в широкой практике обычно не применяется. Методы индивидуального прогнозирования остаточного ресурса машин и конструкций, основанные на моделях физических процессов износа машин и конструкций (накопление усталостных повреждений, изнашивание механизмов и т.п.), изложенные в различных публикациях, например [3–5], также не нашли широкого практического применения при оценивании остаточного ресурса машин в связи с их трудоемкостью и необходимостью применения сложного математического аппарата теории случайных процессов. Более широкое распространение в практике определения остаточного срока службы и остаточного ресурса получили методы, основанные на представлениях о том, что остаточный срок службы (ресурс) машины является случайной величиной, которую можно описать только вероятностными моделями [6–7]. В отличие от детерминированных моделей данная методология расширяет возможности методов оценивания и позволяет привести их к наиболее адекватному отражению физических процессов изнашивания (старения).

В современных условиях в связи с повышением требований к качественной оптимизации расходования материальных средств на поддержание многофункциональных измерительных комплексов, таких как, например, подвижные лаборатории измерительной техники в готовности к применению с требуемой степенью надежности, возникает необходимость обоснования предельных сроков эксплуатации ИК по экономическому критерию, особенно когда это касается решения вопроса о целесообразности модернизации ИК, что в значительной мере определяется достоверностью оценки предельных сроков эксплуатации ИК при условии невыхода объемов затрат на эксплуатацию за установленные рамки.

В данной статье статистический подход к задаче прогнозирования предельного срока службы (остаточного ресурса) машин и оборудования, такого как многофункциональные измерительные комплексы, по экономическому критерию развивается на основе моделей [8–11], которые могут оказаться наиболее приемлемыми во многих реальных ситуациях, связанных с оценкой ИК, когда причиной увеличения эксплуатационных затрат является возрастание стоимости поддержания ИК в работоспособном состоянии в условиях повышения интенсивности отказов из-за старения аппаратной части ИК и средств их ремонта и поверки. При этом показатель эксплуатационных затрат интегрально отражает рост стоимости устранения как аппаратных отказов, связанных с полной потерей возможности проведения измерений, так и метрологических отказов, возникающих при превышении погрешности измерений некоторого критического уровня, при котором качество измерений считается неудовлетворительным.

2. Математическая постановка задачи

В качестве объекта прогнозирования рассматривается один отдельный экземпляр ИК, т.е. прогноз базируется на одной реализации случайного процесса изменения затрат. Причем характер изменения реализации в среднем носит линейный характер. На основе эксперимента установлено, что линейная модель применима при количестве точек временного ряда примерно от 7 до 40 (при измерениях затрат один раз в квартал).

Признаком наступления предельного состояния для ИК является достижение показателем «средние удельные эксплуатационные затраты» заданного предельно допустимого уровня.

Для нахождения значения $T_{\gamma ост}^S$ оценки нижней доверительной границы остаточного гамма-процентного ресурса по критерию недопустимого возрастания эксплуатационных затрат необходимо спрогнозировать изменение НДГ вероятности $\tilde{P}_t^S$ недостижения максимально допустимого уровня $S_{доп}$ средними удельными эксплуатационными затратами на интервале упреждения $t \in T_L = [t_n; t_{n+L}]$:

$$\tilde{P}_t^S = \text{Вер}(\tilde{S}_t \leq S_{доп}). \quad (1)$$

Тогда оценка НДГ остаточного гамма-процентного ресурса по критерию недопустимого возрастания эксплуатационных затрат вычисляется на основе следующего выражения:

$$T_{\gamma ост}^S = T_{\gamma}^S - t_n, \quad (2)$$

где T_{γ}^S – оценка НДГ полного гамма-процентного ресурса, определяемая как

$$T_{\gamma}^S = \max t \mid \tilde{P}_t^S \geq \gamma / 100 \%, t \in T_L = [t_n; t_{n+L}], \quad (3)$$

т.е. T_{γ}^S – это такое максимальное значение времени эксплуатации ИК, при котором НДГ вероятности $\tilde{P}_t^S$ не снижается ниже порога, равного $\gamma / 100 \%$.

Для оценивания вероятности $\tilde{P}_t^S$ воспользуемся зависимостью средних удельных затрат S_t от времени для интервала наблюдения $[0, t_n]$. Для построения модели изменения затрат во времени применим линейный аппроксимирующий полином первой степени:

$$\tilde{S}_t = a + bt. \quad (4)$$

Выражения для оценки параметров a и b , полученные при решении системы нормальных уравнений в явном виде, могут быть преобразованы к виду:

$$a = \frac{4n+2}{n^2-n} \sum S_t - \frac{6}{n^2-n} \sum S_t t; \quad (5)$$

$$b = -\frac{6}{n^2-n} \sum S_t - \frac{12}{n^3-n} \sum S_t t. \quad (6)$$

В общем виде доверительный интервал для прогноза изменения во времени средних удельных затрат S_t определяется как:

$$\tilde{S}_t^{\alpha} \in [\tilde{S}_t^{\epsilon}; \tilde{S}_t^{\eta}], \quad (7)$$

где α – значение доверительной вероятности прогноза; $\tilde{S}_t^{\epsilon}$ – прогнозные значения верхней доверительной границы средних удельных затрат на эксплуатацию ИК; $\tilde{S}_t^{\eta}$ – прогнозные значения нижней доверительной границы средних удельных затрат на эксплуатацию ИК; $t \in T_L = [t_n; t_{n+L}]$.

Значения доверительных границ могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$\tilde{S}_t^{\epsilon} = \tilde{S}_t + \sigma_S K^*, \quad (8)$$

$$\tilde{S}_t^{\eta} = \tilde{S}_t - \sigma_S K^*, \quad (9)$$

где σ_S – среднее квадратическое отклонение фактических наблюдений S_t от расчетных значений тренда $\tilde{S}_t$.

Значения σ_S и K^* для прямой рассчитываются по формулам:

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (S_t - \tilde{S}_t)^2}{n-2}}, \quad (10)$$

$$K^* = t_{\alpha} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{1}{\sum t^2} t_L^2}. \quad (11)$$

Значения коэффициента K^* рассчитываются с учетом того, что:

t_{α} – значение t -критерия Стьюдента уровня α при числе степеней свободы, равном $n-2$;

t_L – время, для которого делается прогноз, т.е. $t_L = n + L$;

$\sum t^2$ и $\sum t^4$ определяются в соответствии с выражениями:

$$\sum t^2 = \sum t \frac{2n+1}{3} = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}, \quad (12)$$

$$\sum t^4 = \sum t^2 \frac{3n^2+3n-1}{5} = \frac{n(n+1)(2n+1)(3n^2+2n-1)}{12}. \quad (13)$$

Учитывая линейный характер реализации случайного процесса изменения средних удельных эксплуатационных затрат, аддитивность факторного пространства формирования эксплуатационных затрат, применим допущение о нормальности распределения вероятности $\tilde{P}_t^S$, $t \in T_L = [t_n; t_{n+L}]$ недостижения предельно допустимого уровня $S_{\text{доп}}$ средними удельными затратами на эксплуатацию ИК. Тогда прогнозные значения $\tilde{P}_t^S$ могут быть вычислены на основе следующих выражений:

$$\tilde{P}_t^S = \int_0^{S_{\text{доп}}} \phi(\tilde{S}_t, \sigma_t^S) dS, \quad (14)$$

где

$$\phi(\tilde{S}_t, \sigma_t^S) = \frac{1}{\sigma_t^S \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(S - \tilde{S}_t)^2}{2\sigma_t^{S^2}} \right]. \quad (15)$$

Значение σ_t^S находится при заданном α из уравнения

$$\int_{\tilde{S}_t^H}^{\tilde{S}_t^E} \phi(\tilde{S}_t, \sigma_t^S) dS = \alpha. \quad (16)$$

3. Описание алгоритма решения

Шаг 0. Ввод исходных данных (табл. 1):

$$S_t; S_{\text{доп}}; t_n; n; T_L; L; \alpha; \gamma; t_\alpha.$$

Таблица 1. Состав исходных данных для прогнозирования остаточного ресурса индивидуальным методом

№ п/п	Наименование исходного параметра	Обозначение	Размерность
1.	Текущие значения средних удельных затрат на эксплуатацию ИК (за 1 квартал) *	$S_t, t = \overline{1, n}$	Ед. ср. уд. затрат
2.	Значение предельно допустимого уровня средних удельных затрат на эксплуатацию ИК (за 1 квартал)	$S_{\text{доп}}$	Ед. ср. уд. затрат
3.	Продолжительность эксплуатации на момент прогнозирования остаточного ресурса	t_n	Ед. времени
4.	Длительность интервала упреждения прогноза	T_L	Ед. времени
5.	Число шагов интервала упреждения прогноза	L	В кварталах
6.	Значение доверительной вероятности прогноза	α	-
7.	Значение гамма-процентного уровня прогноза	γ	%
8.	Значение t -критерия Стьюдента уровня α	t_α	-

Шаг 1. Нахождение оценок параметров аппроксимирующего полинома a , b на основе выражений (5) и (6).

Шаг 2. Расчет прогнозных оценок изменения математического ожидания средних удельных затрат на эксплуатацию ИК на интервале упреждения прогноза $T_L = [t_n; t_{n+L}]$ по формуле (4).

Шаг 3. Расчет значения σ_S среднеквадратического отклонения фактических наблюдений S_t от расчетных значений тренда $\tilde{S}_t$ по формуле (10).

Шаг 4. Расчет значений коэффициента K^* по формуле (11).

Шаг 5. Расчет $\tilde{S}_t^6$ прогнозных значений верхней доверительной границы средних удельных затрат на эксплуатацию ИК из выражения (8).

Шаг 6. Расчет $\tilde{S}_t^H$ прогнозных значений нижней доверительной границы средних удельных затрат на эксплуатацию ИК из выражения (9).

Шаг 7. Расчет значений среднеквадратического отклонения нормального усеченного распределения средних удельных затрат на эксплуатацию ИК для каждого сечения $t \in T_L = [t_n; t_{n+L}]$ из уравнения (16).

Шаг 8. Расчет прогнозных значений $\tilde{P}_t^S$ НДГ вероятности недостижения максимально допустимого уровня $S_{ДОП}$ средними удельными затратами по выражениям (14), (15) и (16).

Шаг 9. Расчет значений оценки НДГ полного гамма-процентного ресурса по критерию недопустимого возрастания эксплуатационных затрат T_γ^S по правилу (3).

Шаг 10. Расчет значений оценки НДГ остаточного гамма-процентного ресурса по критерию недопустимого возрастания эксплуатационных затрат $T_{\gamma_{ост}}^S$ по формуле (2).

Литература

1. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 томах. М.: Машиностроение, 1987. 351 с.
2. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».
3. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
4. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З. Надежность машин. М.: Высшая школа, 1988. 238 с.
5. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.
6. Абрамов О. В., Розенбаум А. Н. Прогнозирование состояния технических систем. М.: Наука, 1990. 126 с.
7. Бобровников Г. Н., Клебанов А. И. Прогнозирование в управлении техническим уровнем и качеством продукции. М.: Изд. стандартов, 1984. 232 с.
8. Миронов А. Н. Многомодельное прогнозирование показателей долговечности технологического оборудования стартовых комплексов // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 8. С. 39–48.
9. Миронов А. Н., Бармин И. В., Прохорович В. Е. Стратегия эксплуатации стартовых комплексов космического назначения за пределами назначенного ресурса // Полет. 2000. № 4. С. 22–27.
10. Новиков А. Н., Шестопалова О. Л. Алгоритм экстраполяции определяющих параметров технического состояния объектов эксплуатации // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского. 2008. Вып. 27. С. 371–376.
11. Новиков А. Н., Шестопалова О. Л. Алгоритм формирования перечня ремонтно-профилактических работ по результатам мониторинга технического состояния // Сбор-

ник алгоритмов и программ типовых задач. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2008. Вып. 27. С. 378–385.

*Статья поступила в редакцию 01.02.2016;
переработанный вариант – 10.03.2016.*

Новиков Александр Николаевич

к.т.н., доцент кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел. +7 (904) 603-04-83, e-mail: novalloll@mail.ru

Individual forecasting algorithm of marginal economically viable lifetime of measuring complexes

A. N. Novikov

The present algorithm is intended for individual forecasting of a residual resource of the measuring complexes (MC) by criterion of inadmissible increase of operational expenses. The main result of forecasting by means of this algorithm is the assessment of value of lower confidence bound (LCB) of the MC gamma-percent residual resource. Additional results are pointed and interval predictive estimate of operational expenses change, and also forecast values of estimates of operational expenses absenteeism probability for maximum permissible level. Algorithm output results can be used for decisions substantiation on timing of the overhaul (average and capital) and (or) modernization of mobile laboratories measuring equipment (MLME).

Keywords: measuring complexes, criterion of inadmissible increase of operational expenses, assessment of a gamma percent residual resource, intensity of metrological refusals, quality of measurements.