УДК 622:629

**И.И. НИКОЛАЕНКОВ,** *инженер, kaf_math_spmi@rambler.ru*
*ООО «Елсеремо»*
**А.П. ГОСПОДАРИКОВ,** *д-р техн. наук, профессор, kaf_math_spmi@rambler.ru*
*Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)*

**I.I. NIKOLAENKOV,** *engineer, kaf_math_spmi@rambler.ru*
*«Elseremo» Co*
**A.P. GOSPODARIKOV,** *Dr. in eng. sc., professor, kaf_math_spmi@rambler.ru*
*Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)*

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Предложены математические модели оценки технического состояния элементов корабельной техники. Последние реализованы для различных режимов работы оборудования корабля.

***Ключевые слова:*** оценка, математическая модель, сходимость, режим работы.

# MATHEMATICAL MODELS OF TECHNICAL STATE ESTIMATION OF SHIP ELEMENTS

The methods of mathematical models estimation of ship elements technical state were worked out in this work. The latter were realized for different conditions of ship elements work.

***Key words:*** estimation, mathematical model, convergence, operating conditions.

Опыт эксплуатации, результаты ресурсных испытаний корабельной техники показывают, что даже для нормированных условий и режимов эксплуатации фактическая выработка ресурса работоспособности, контролируемая по наиболее достоверным и объективным признакам утраты нормальной работоспособности, не соответствует нормативным срокам и ресурсам наработки.* Наступление момента выработки ресурса можно связать с тенденцией изменения соответствующих (контрольных) признаков работоспособности оборудования.

Необходимо разработать ресурсно-диагностическую модель корабельной техники, отражающую связь между параметрами внешних воздействий, режимами использования и параметрами, характеризующими интенсивность расходования ресурса. Отличием предлагаемой модели от тради-

* *Турусов С.Н.* Системы интеллектуальной поддержки процессов управления готовностью комплекса технических средств корабля / С.Н.Турусов, С.Д.Шапошников, И.И.Николаенков // Межд. форум «Информатизация-95»: Сб. докладов. СПб, 1995. С.60-63.

*Turusov S.N., Shaposhnikov S.D., Nikolaenkov I.I.* Systems of smart support of readiness management processes for set of ship technical elements // Proceedings of International forum «Informatization-95». Saint Petersburg, 1995. P.60-63.

* *Турусов С.Н.* Об одной модели принятия решений в задачах поддержания готовности судовых технических средств / С.Н.Турусов, С.Д.Шапошников // Изв. Санкт-Петербургского электротехнического ун-та, 1995. Вып.484. С.54-57.

*Turusov S.N., Shaposhnikov S.D.* One model of decision-making to readiness problems in ship technical elements // Proceedings of SPBGTETU 1995. Issue 484. P.54-57.

ционно применяемого способа оценки технического состояния по наработке или сроку службы является возможность корректировки назначенного ресурса и уточнение остаточного ресурса в процессе принятия решений по управлению готовностью корабельной техники.

Для каждого контрольного признака на основе испытаний или опыта эксплуатации оборудования устанавливаются начальное значение $R_0$ и предельное значение $R_m$, достижение которого может привести к нарушению нормальной работоспособности, а также средний темп нарастания значений контрольного признака работоспособности.

В ресурсной модели необходимо учитывать величину текущего значения контрольного признака $R_i$, фактический темп нарастания контрольного признака (или, что то же самое, фактический темп приближения контрольного признака к предельному значению $R_m$) и время $t_{\text{э}}$, прошедшее с начала эксплуатации объекта.

Введем обозначения: $T_m$ – максимальный ресурс при нормативных условиях ($y_m$) и режимах ($x_m$) эксплуатации объекта; $\Delta R_m$ – расчетное среднее значение скорости (темпа) изменения значения контрольного признака для этих условий и режимов. При построении математической модели затраты ресурсов будем исходить из предположений, учитывающих реальные условия и режимы эксплуатации объекта.

Модель затраты ресурса строится так, что оценка временного периода, в течение которого *i*-й контрольный параметр может достичь своего предельного значения (что соответствует выработке ресурса), имеет вид функциональной зависимости $T = f(R_i, \Delta R_i, t_{\text{э}})$. Очевидно, что при $R_i = R_{im}$ ресурс выработан ($T = 0$), при $R_i = R_{i0}$ ресурс вырабатывается нормативно ($T = T_m - t_{\text{э}}$).

Принимая экспоненциальную гипотезу математической модели затраты ресурса, получим выражение для определяющего значения контрольного признака:

$$R_i(y_m, x_m, t_{\text{э}}) = R_{i0}\mathrm{e}^{-jt_{\text{э}}},$$

где значение $j$ определяется условием нормировки: $j = \frac{1}{T_m}\ln\left(\frac{R_{i0}}{R_{im}}\right)$ при $R_{i0}\mathrm{e}^{-jT_m} = R_{im}$. Таким образом,

$$R_i(y_m, x_m, t_{\text{э}}) = R_{i0}\mathrm{e}^{-\frac{t_{\text{э}}}{T_m}\ln\left(\frac{R_{i0}}{R_{im}}\right)}. \qquad (1)$$

Нормативная скорость (темп) изменения *i*-го параметра в любой момент времени $t_{\text{э}} \in (0, T_m]$

$$R_i = \frac{dR_i}{dt_{\text{э}}} = -\frac{R_{i0}}{T_m}\ln\left(\frac{R_{i0}}{R_{im}}\right)\mathrm{e}^{-\frac{t_{\text{э}}}{T_m}\ln\left(\frac{R_{i0}}{R_{im}}\right)}. \qquad (2)$$

Из формулы (1) после несложных преобразований получим

$$T_0 = T_m\left(1 - \frac{\ln[R_{im}(t_{\text{э}})] - \ln R_{i0}}{\ln R_{im} - \ln R_{i0}}\right), \qquad (3)$$

где $R_{im}(t_{\text{э}}) = R_i(y_m, x_m, t_{\text{э}})$ – прогнозируемое нормативное значение $R_i$ *i*-го контрольного параметра в момент временим $t_{\text{э}}$; $T_0$ – остаточный ресурс, $T_0 = T_m - t_{\text{э}}$.

Нетрудно убедиться, что зависимость (3) отвечает рассмотренным выше требованиям к математической модели затраты ресурса, хотя она не учитывает фактический темп изменения параметра затраты ресурса, который в соответствии с (2) считается нормативным.

При отклонении действительного значения $R_i(t)$ от $R_{im}(t_{\text{э}})$ необходимо провести анализ предыстории, т.е. определить, каким образом значение $R_i(t)$ стало отличным от $R_{im}(t_{\text{э}})$.

При принятом подходе считаем, что с самого начала режимы и внешние устройства отличались от нормативных, т.е.

$$R_i(y, x, t_{\text{э}}) = R_{i0}\mathrm{e}^{-j^{(1)}t_{\text{э}}},$$

где

$$j^{(1)} = \frac{1}{T_m}\ln\left(\frac{R_{i0}}{R_{im}}\right) - \frac{1}{t_{\text{э}}}\ln\left(\frac{R_i(y, x, t_{\text{э}})}{R_{im}(t_{\text{э}})}\right) =$$

$$= j - \frac{1}{t_{\text{ý}}} \ln\left( \frac{R_i(y, x, t_{\text{ý}})}{R_{im}(t_{\text{ý}})} \right).$$

Отметим то обстоятельство, что если параметры $x_i$ могут быть измерены, то $y_i$ (параметры внешних условий) можно оценить не всегда. Пусть $y_i$ – наблюдаемые параметры, тогда примем

$$\frac{R_i(y_i, x_i, t_{\text{ý}})}{R_{im}(t_{\text{ý}})} = \mu\left( \frac{y_i}{y_{im}}, \frac{x_i}{x_{im}} \right), \qquad (4)$$

где $\mu$ – неизвестная функция.

Вид функции $\mu$ получим из формулы (4) и того условия, что из равенств $y = y_m$ и $x = x_m$ следует $j^{(1)} = j$. В предположении вида функции $\mu$ как логарифмической зависимости принимает вид

$$j^{(1)} = j \ln\left( \frac{x_i}{x_{im}} \frac{y_i}{y_{im}} \right) = j\left[ \ln\left( \frac{x_i}{x_{im}} \right) + \ln\left( \frac{y_i}{y_{im}} \right) \right];$$

$$R_i(y, x, t_{\text{ý}}) = R_{i0} \mathrm{e}^{-\frac{t_{\text{ý}}}{T_m} \ln\left( \frac{R_{i0}}{R_{im}} \right) \ln\left( \frac{x_i}{x_{iv}} \frac{y_i}{y_{im}} \right)}.$$

Аналогично формуле (3) запишем

$$T_0' = T_m \left( 1 - \frac{\ln[R_i(y, x, t_{\text{ý}})] - \ln R_{i0}}{\ln R_{im} - \ln R_{i0}} \right).$$

Следовательно, уменьшение ресурса по сравнению с нормативными затратами

$$\Delta T_0 = T_0 - T_0' = T_m \times$$

$$\times \left( 1 - \frac{\ln[R_i(y_i, x_i, t_{\text{ý}})] - \ln R_{im}(t_{\text{ý}})}{\ln R_{im} - \ln R_{i0}} \right).$$

Если имеется выборка значений $R_i(t)$ на промежутке $(0, t_{\text{ý}}]$, то прогноз наступления состояния, когда остаточный ресурс может стать равным нулю, возможен следующим образом. Вычислим значения $R_i(u)$ для $\forall t_i \in (0, t_{\text{ý}}]$. Получим выборку, по которой можно определить тренд скорости затраты остаточного ресурса, используя линейную регрессию.

При малых значениях отношения $R_{im} - R_i(u)/(R_{im} - R_{i0})$ необходимо использовать прогноз по значению $R_i(t)$. Тогда остаточный ресурс

$$T_0 = T_m \frac{R_{im} - R_i(t_{\text{ý}})}{\frac{dR_i(t_{\text{ý}})}{dt}}.$$

Предложенный метод, по сути дела, является методом гарантированного результата, в котором не используются статистические характеристики возникновения различных режимов, однако он позволяет принимать решение по выборкам малого объема с использованием нормированных значений $R_{im}$ и $R_{i0}$.