

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОХРАНЯЕМОСТИ ТЕХНИКИ НА СТАДИИ РАЗРАБОТКИ

METHODICAL APPROACH TO FORECASTING INDICATORS OF PERSISTENCE TECHNIQUES UNDER DEVELOPMENT

**S. Zavidov
E. Scherbo**

Summary. The methodical approach of forecasting of indicators of safety of equipment at a development stage which basis includes theoretical provisions of forecasting of reliability of difficult technical systems is offered. The main factors of the set affecting the preservation of equipment are determined. These include environmental factors (humidity, temperature) and storage time. Basic statistical data on the reliability of engineering products has developed a mathematical model enabling a predictive assessment of persistence techniques, taking account of trends in the persistence of analogues depending on the terms and conditions of storage.

Keywords: Persistence, reliability, storage, forecasting, mathematical model, indicator, analog, property, object.

Завидов Сергей Анатольевич

Д.т.н., доцент, Научно-исследовательский центр
бронетанковой техники, г. Кубинка, Московская
область, РФ
francuz_76@list.ru

Щербо Евгений Владимирович

С.н.с., Научно-исследовательский центр
бронетанковой техники, г. Кубинка, Московская
область, РФ
evgeniy_sherbo@bk.ru

Аннотация. Предложен методический подход прогнозирования показателей сохраняемости техники на стадии разработки, в основу которого включены теоретические положения прогнозирования надежности сложных технических систем. Определены основные факторы из множества, влияющих на сохраняемость техники. К ним относятся факторы внешней среды (влажность, температура) и время хранения. На основе статистических данных по надежности изделий машиностроения разработана математическая модель, позволяющая получить прогнозную оценку сохраняемости техники с учетом тенденций изменения сохраняемости объектов-аналогов в зависимости от сроков и условий хранения.

Ключевые слова: сохраняемость, надежность, хранение, прогнозирование, математическая модель, показатель, аналог, свойство, объект.

Под хранением понимается этап эксплуатации, при котором неиспользуемое по назначению изделие военной техники содержится в специально отведенном для его размещения месте в заданном состоянии и обеспечивается его сохраняемость в течение установленных сроков [1].

Процесс хранения объектов военной техники можно представить в виде системы (рис. 1), на выходе которой должно быть обеспечено поддержание заданного уровня эксплуатационных свойств объектов.

Для нормального функционирования системы необходимо правильное управляющее воздействие, то есть должен быть определен комплекс мероприятий по поддержанию объектов военной техники в заданном состоянии. Для определения объемов и сроков этих мероприятий в процессе хранения необходимо определить состояние объектов и оценить их сохраняемость.

Количественная оценка сохраняемости производится с целью получения исходных данных для:

- ◆ планирования материально-технического обеспечения процесса хранения;
- ◆ определения основных мероприятий по обеспечению надежности объектов военной техники;
- ◆ оценки эффективности внедрения мероприятий, направленных на повышение надежности техники;
- ◆ прогнозирования надежности проектируемых образцов военной техники.

На сегодняшний день провести оценку сохраняемости вновь разрабатываемых объектов вооружения и военной техники на этапах предварительных и государственных испытаний не представляется возможным, во-первых, из-за длительности сроков испытаний (при ускоренных климатических испытаниях — не менее 8–10 месяцев, при натурных испытаниях — не менее 10 лет); а во-вторых, из-за необходимости большого количества дорогостоящих объектов для получения достоверных результатов при проведении этих испытаний (не менее 3 единиц). Данные обстоятельства определяют актуальность разработки математической модели, позволяющей спрогнозировать значения показателей

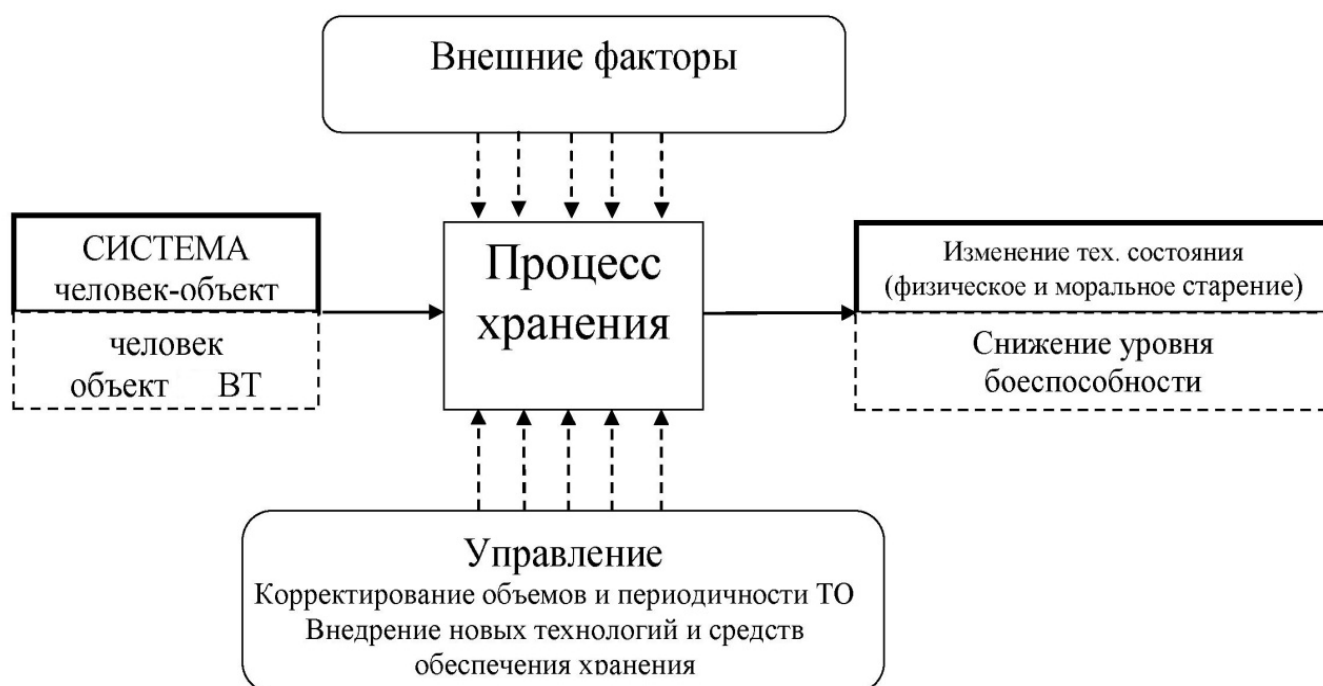


Рис. 1. Структурная схема хранения военной техники

сохраняемости объектов военной техники на стадии их разработки.

Основные теоретические положения прогнозирования надежности изделий машиностроения могут быть положены в основу разработки математической модели для прогнозирования сохраняемости объектов военной техники.

Основной составляющей оценки сохраняемости военной техники является оценка изменения технического состояния объекта и его сборочных единиц в процессе хранения. Из этого следует, что разработанные показатели оценки сохраняемости являются одновременно и показателями ее прогнозирования. В данном случае для сборочных единиц прогнозируется время безотказного хранения, а для объекта в целом — обобщенный параметр, выражающийся вероятностью безотказного хранения.

При использовании идентичных по характеристикам конструкционных и эксплуатационных материалов в узлах, агрегатах и системах объектов военной техники характер изменения их технического состояния тоже идентичен. Это особенно справедливо для объектов, находящихся на хранении. Поэтому прогнозирование сохраняемости разрабатываемого объекта военной техники может быть проведено на основе результатов обобщенной оценки сохраняемости многих однотипных объектов-аналогов.

В основу разработки модели для прогнозирования показателя сохраняемости положен математический метод, который позволяет устанавливать связь показателей сохраняемости с влияющими на них факторами (время хранения, внешняя среда и т.д.) путем проведения корреляционного анализа показателей сохраняемости ранее принятых на вооружение объектов-аналогов.

Объекты военной техники являются сложной и восстанавливаемой обслуживаемой системой многозвонного применения. Конструкцию объектов условно можно разделить на сборочные единицы. Сборочные единицы объектов состоят из деталей, выполненных из различных конструкционных материалов.

При хранении объектов военной техники под воздействием окружающей среды происходят изменения свойств конструкционных материалов, и, следовательно, деградация выходных параметров сборочных единиц, определяющих их техническое состояние.

Под выходными параметрами понимаются такие параметры, которые наиболее полно характеризуют соответствие сборочных единиц своему целевому назначению. При достижении параметрами предельного значения наступает отказ.

В качестве основного показателя технического состояния сборочных единиц военной техники на этапе хранения принято считать время безотказного хране-

ния, которое представляет собой календарную продолжительность хранения, в течение которого выходной параметр технического состояния сборочной единицы не выходит за предельное значение.

Величина времени безотказного хранения любой сборочной единицы может быть определена по формуле (1):

$$\tau_{\text{бх}} = \tau_0 + \frac{\Pi_{\text{Н}} - \Pi_{\text{П}}}{V} \quad (1)$$

где $\tau_{\text{бх}}$ — время безотказного хранения;
 τ_0 — время хранения, при котором выходной параметр не выходит за номинальное значение, год;
 $\Pi_{\text{Н}}$ — номинальное значение определяющего параметра сборочной единицы;
 $\Pi_{\text{П}}$ — предельное значение определяющего параметра сборочной единицы;
 V — скорость изменения выходного параметра.

Для количественной оценки сохраняемости объектов военной техники при хранении применяется показатель — вероятность безотказного хранения, который представляет собой вероятность того, что объекты сохранятся в работоспособном состоянии в любой случайный момент времени заданного срока хранения.

С учетом того, что время возникновения отказов в процессе хранения объектов военной техники подчиняется нормальному закону распределения, вероятность безотказного хранения определяется по выражению (2):

$$P(\tau_x) = 0,5 - \Phi(U), \quad (2)$$

где $\Phi(U)$ — функция Лапласа [2].

В функции Лапласа « U » является аргументом и определяется по формуле (3):

$$U = \frac{\tau_{xi} - \tau_{\text{хсп}}}{\sigma}, \quad (3)$$

где τ_{xi} — i -ое время длительного хранения, год (1, 2, 3, ..., $\tau_{\text{длх}}$);
 $\tau_{\text{хсп}}$ — среднее время безотказного хранения, год;
 σ — среднее квадратичное отклонение;

Среднее квадратичное отклонение определяется из выражения (4):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\tau_{\text{длх}}} N_i (\tau_{xi} - \tau_{\text{хсп}})^2}{N_i - 1}} = \sqrt{D}, \quad (4)$$

где N_i — общее количество отказавших объектов за время хранения;
 D — дисперсия времени безотказного хранения.

При определении среднего времени безотказного хранения учитываются только те отказы, которые обусловлены процессами старения и коррозии.

Среднее время безотказного хранения определяется по формуле (5):

$$\tau_{\text{хсп}} = \frac{\sum_{i=1}^{\tau_{\text{длх}}} N_i \tau_{xi} + (m - N) \tau_{\text{длх}} \left(\frac{m}{N}\right)^{\nu}}{m}, \quad (5)$$

где N_i — общее число отказавших объектов за время хранения;
 m — объем выборки;
 $\tau_{\text{длх}}$ — общая продолжительность длительного хранения, лет;
 ν — коэффициент вариации при нормальном законе распределения ($\nu=2$).

По аргументу (U) находится табличное значение $\Phi(U)$ и определяется вероятность безотказного хранения $P(\tau_x)$ объекта.

На объекты военной техники в процессе хранения воздействует множество факторов, влияющих на их сохраняемость. Основными из них являются факторы внешней среды (влажность, температура) и время хранения.

Прогнозирование значений показателей сохраняемости объекта военной техники включает следующие этапы [3]:

- ◆ разработка статистической модели;
- ◆ решение задачи;
- ◆ оценка полученных результатов.

На первом этапе одной из основных задач является разработка статистической модели, устанавливающей связь между показателями сохраняемости и факторами, влияющими на их значения.

В общем виде она представляется выражением (6):

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (6)$$

где y — зависимая переменная (показатель сохраняемости);
 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ — независимые переменные, отражающие влияние факторов на показатель сохраняемости.

При отборе факторов для включения в статистическую модель предъявлялись следующие требования:

- ♦ факторы должны объективно отражать особенности хранения
- ♦ объектов;
- ♦ показатели, характеризующие факторы, должны быть количественно измеримы;
- ♦ между выбранными факторами не должно быть функциональных связей.

Математическая форма связи между показателями сохраняемости и факторами, влияющими на них, на основании анализа статистических данных сохраняемости объектов-аналогов устанавливается линейной формой связи в виде (7):

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n, \quad (7)$$

где α_i — параметры;
 x_i — независимая переменная.

Вторым этапом является решение задачи на базе разработанной модели. Решение сводится к определению численных значений параметров уравнений регрессии. Для получения уравнения регрессии показателей сохраняемости с факторами, влияющими на них, исходный статистический материал представляется в виде матрицы (8):

$$A = \begin{pmatrix} y_{11} \dots x_{12} \dots x_{13} \dots x_{1j} \dots x_{1n} \\ y_{21} \dots x_{22} \dots x_{23} \dots x_{2j} \dots x_{2n} \\ \dots \\ y_{k1} \dots x_{k2} \dots x_{k3} \dots x_{kj} \dots x_{kn} \\ \dots \\ y_{n1} \dots x_{n1} \dots x_{n3} \dots x_n \dots x_{nn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

После представления величин в матричной форме параметры уравнения (7) рассчитываются методом наименьших квадратов [4, с. 89]. Для этого рассчитываются средние значения и средние квадратичные отклонения для каждого столбца матрицы. Средние значения рассчитываются по формулам (9):

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N y_{k1}}{N}; \quad \bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^N x_{ki}}{N} \quad (9)$$

Средние квадратичные отклонения рассчитываются по формулам (10):

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y_{k1} - \bar{y})^2}{N-1}}; \quad \sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x_{k1} - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (10)$$

Производится переход к стандартизованному масштабу по формулам (11):

$$t_I = \frac{y_{k1} - \bar{y}}{\sigma_I}; \quad t_i = \frac{x_{ki} - \bar{x}}{\sigma_i} \quad (11)$$

В этом случае уравнение (7) примет вид:

$$t_I = \alpha_1 t_1 + \alpha_2 t_2 + \dots + \alpha_n t_n \quad (12)$$

Рассчитываем парные коэффициенты корреляции по формулам (13):

$$r_{ii} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t_{ik} \cdot t_{ik}; \quad r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t_{ik} \cdot t_{jk} \quad (13)$$

Составляем систему нормальных уравнений (14):

$$\begin{aligned} r_{I1} &= \alpha_1 + \alpha_2 \cdot r_{12} + \alpha_3 r_{13} + \dots + \alpha_n r_{1n}; \\ r_{I1} &= \alpha_1 \cdot r_{21} + \alpha_2 + \alpha_3 \cdot r_{23} + \dots + \alpha_n r_{nr}; \\ &\dots \\ r_{In} &= \alpha_1 \cdot r_{n1} + \alpha_2 \cdot r_{n2} + \alpha_3 r_{n3} + \dots + \alpha_n \end{aligned} \quad (14)$$

Система решается методом определителей. Коэффициенты α_i определяются по формуле (15):

$$\alpha_i = \frac{\Delta_i(B)}{\Delta(B)}, \quad (15)$$

где $\Delta(B)$ — определитель матрицы «B»;
 $\Delta_i(B)$ — определитель матрицы «B», в которой i -ый столбец элементов является столбцом свободных членов системы уравнений.

Корреляционная матрица «B» представляет собой матрицу, элементами которой являются коэффициенты при α_i .

$$B = \begin{pmatrix} 1 \cdot r_{12} \dots r_{1i} \dots r_{1n} \\ r_{21} \cdot 1 \dots r_{2i} \dots r_{2n} \\ \dots \\ r_{i1} \cdot r_{i2} \dots 1 \dots r_{in} \\ \dots \\ r_{n1} \cdot r_{n2} \dots r_{ni} \dots 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Определитель $\Delta(B)$ n -го порядка можно разложить по элементам i -го столбца следующим образом (17):

$$\Delta(B) = \begin{pmatrix} 1 \cdot r_{12} \dots r_{1i} \dots r_{1n} \\ r_{21} \cdot 1 \dots r_{2i} \dots r_{2n} \\ \dots \\ r_{i1} \cdot r_{i2} \dots 1 \dots r_{in} \\ \dots \\ r_{n1} \cdot r_{n2} \dots r_{ni} \dots 1 \end{pmatrix} = r_{1i} D_{1i} + r_{2i} D_{2i} + \dots + r_{ni} D_{ni} \quad (17)$$

где $D_{ni} = (-1)^{n+i} M_{ni}$ — алгебраическое дополнение элемента;

M_{ni} — минор, соответствующий элементу r_{ni} .

Переход от значения a_i к значениям a_i в натурном масштабе производится по формуле (18):

$$a_i = \alpha_i \frac{\sigma_I}{\sigma_i} \quad (18)$$

Значение α_0 определяется по формуле (19):

$$\alpha_0 = \bar{y} - \sum_{i=1}^N a_i \cdot \bar{x}_i \quad (19)$$

При учете следующих основных факторов: продолжительности хранения, среднегодовой температуры и влажности уравнение (7) примет вид:

$$P(\tau_{xp}) = \alpha_0 + \alpha_1 \tau_{xp} + \alpha_2 t_{cp} + \alpha_3 R_{cp} \quad (20)$$

Оценка полученной модели представляет третий этап. Одним из критериев правильности и полноты отбора факторов является коэффициент детерминации R ,

который определяется коэффициентом множественной регрессии (21):

$$R = \sqrt{\alpha_1 \cdot r_{I1} + \alpha_2 \cdot r_{I2} + \dots + \alpha_n \cdot r_{In}} \quad (21)$$

При этом, если значение R достаточно велико (например, $R^2 > 0,5$), то значения оценок коэффициентов регрессии не будут сильно отличаться от истинных значений.

Разработанная математическая модель прогнозирования показателей сохраняемости объектов военной техники, основанная на интерполяции зависимостей, описывающих выявление тенденции изменения сохраняемости объектов-аналогов от сроков и условий хранения, позволяет провести оценку их сохраняемости на стадии разработки.

Проверку адекватности математической модели проводим по критерию Фишера. При выполнении условия $F_p < F_{кр}$, можно сделать вывод, что построенная математическая модель адекватна исследуемому объекту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по хранению бронетанкового вооружения и техники, автомобильной техники. Кн. 1. Организация хранения бронетанкового вооружения и техники, автомобильной техники. М.: Воениздат, 2005. 119 с.
2. Вентцель Е.С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 464 с.
3. Маркович, Э. С. Курс высшей математики. М.: Росвузиздат, 1963. 483 с.
4. Карасев А. И. Основы математической статистики. М.: Росвузиздат, 1962. 375 с.

© Завидов Сергей Анатольевич (francuz_76@list.ru), Щербо Евгений Владимирович (evgeniy_sherbo@bk.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»