

*В.М. Грибов, канд. техн. наук, проф.,  
(Национальный авиационный университет, Украина, г. Киев)  
В.П. Стрельников, д-р техн. наук, проф.  
(Национальная Академия Наук, Украина, г. Киев)*

## **ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ КОМПОНЕНТОВ АВИОНИКИ**

*Представлены компьютерные алгоритмы и результаты прогнозирования надёжности, применение которых в планировании технического обслуживания эксплуатируемых компонентов авионики обеспечивает повышение эффективности функционирования авиакомпании.*

**Вступление.** Вероятностно-физическая методология исследования надежности разработана коллективом учёных Национальной Академии Наук Украины в период 1985-1993 г.г. и развивается в отделе надежности института проблем математических машин и систем (ИПММС) НАНУ в течение последних десятилетий. Вероятностно-физический подход основан на использовании законов распределения отказов (моделей надежности), вытекающих из анализа физических процессов деградации в элементах технических систем и приводящих к их отказу. При этом физические процессы деградации рассматриваются в виде случайных процессов. Такой подход к исследованию надежности назван вероятностно-физическим, поскольку он непосредственно устанавливает связь вероятности достижения предельного уровня физическим определяющим параметром, т.е. связывает значения вероятности отказа и физического параметра, вызывающего отказ. Вследствие этого параметры получаемого вероятностного распределения отказов имеют конкретный физический смысл. В частности, в рассматриваемых двухпараметрических вероятностно-физических моделях отказов параметр масштаба совпадает со значением средней скорости изменения определяющего параметра, а параметр формы – с коэффициентом вариации этой скорости [3].

Возможности вероятностно-физического прогнозирования надёжности эксплуатируемых компонентов бортового оборудования (БО) целесообразно использовать в интересах интегрированной поддержки технического обслуживания и ремонта (ТОиР) воздушных судов (ВС). Разработка и внедрение в структуру и деятельность аэропортов информационной системы позволит обеспечить эффективную эксплуатацию сложных наукоемких изделий, каковыми несомненно являются системы БО и ВС в целом и эксплуатация которых, как известно, зачастую обходится владельцу гораздо дороже, чем приобретение. По данным международных статистик в области применения информационных технологий использование последних при создании и эксплуатации сложных наукоемких систем является гарантом непрерывного повышения производительности и качества без изменения затрат времени [4].

Возможности вероятностно-физического прогнозирования надёжности. Математический аппарат решения задач надежности на основе диффузионных распределений приводит не только к более точным прогнозным оценкам по

сравнению с традиционным, основанным на экспоненциальной модели, но и к решению существенно большего числа типовых задач надежности. Если на основе диффузионного немонотонного (DN) распределения решается 25 типовых задач надежности, то на основе экспоненциального распределения только 13 из упомянутых 25 [3]. Высокая универсальность двухпараметрических диффузионных распределений позволяет решить необходимую задачу унификации методов измерений надежности элементной базы и систем БО ВС (как электронных, так и механических).

Оказалось, что вероятностно-физические методы оценки показателей надежности весьма эффективны в условиях наблюдения (при эксплуатации) высоконадежных объектов, в частности, авионики в составе БО ВС, когда имеется малая статистика отказов. В такой ситуации, благодаря использованию дополнительной априорной информации о физических процессах деградации наблюдаемых объектов, представляется возможным получить прогнозные оценки показателей надежности.

Вероятностно-физическая технология исследования надёжности даёт возможность дополнить электронные системы информационного обеспечения ТОиР [4] ВС компьютерными алгоритмами, реализованными, в частности, в пакете Mathcad и обеспечивающими прогнозирование: средней наработки до отказа компонентов БО в процессе лётной эксплуатации при наличии единичных отказов; средней наработки до отказа компонентов БО при отсутствии отказов в процессе лётной эксплуатации; остаточных ресурсов после безотказного функционирования системы БО в течение фиксируемого времени  $\tau$ ; среднего срока службы (и календарной продолжительности эксплуатации) компонентов БО при заданном критерии предельного состояния; гамма-процентного срока службы компонентов БО при заданном значении вероятности недостижения предельного состояния  $\gamma$ ; распределения числа отказов компонентов и систем на этапе длительной эксплуатации БО (в течение всего срока службы); распределения вероятностей проявления ровно  $m$  отказов,  $m \in 1 \dots M$ , в процессе длительной эксплуатации БО; количественной оценки запасных компонентов в составе обменного фонда авиакомпания при заданном значении показателя достаточности.

Указанные возможности вероятностно-физического прогнозирования надёжности являются весьма существенным дополнением к информационному обеспечению ТОиР ВС, которое включает взаимодействие эксплуатанта с предприятиями разработчика, поставщика и государственных органов управления и контроля за безопасностью полетов в части обеспечения и поддержания лётной годности ВС.

В подтверждение изложенного приведём некоторые из указанных реализаций вероятностно-физического прогноза количественных оценок показателей надёжности. Исходными данными для реализации возможностей прогноза являются среднее значение  $T_0$  и коэффициент вариации  $\nu$  наработки до отказа исследуемых компонентов авионики. В ряде случаев эти характеристики известны эксплуатанту. Если априорные оценки безотказности отсутствуют, то они могут быть получены после начала эксплуатации при появлении первых отказов. Рассмотрим алгоритмы прогнозирования надёжности компонентов авионики, в том числе и для случая, когда исходные данные по безотказности эксплуатанту неизвестны. Прогнозирование средней

наработки до отказа при наличии единичных отказов. Пусть в составе бортового оборудования ВС эксплуатируется  $N = 50$  однотипных вычислительных блоков. В течение 3000 летних часов после начала их эксплуатации потеря полётных функций ( работоспособности ) была зафиксирована встроенными средствами контроля и подтверждена при наземных проверках у трёх блоков ( $K = 3$ ). Нарботки блоков до отказа составили 2010, 2780 и 3000 часов.

Среднюю наработку до отказа (МТТФ) найдём методом квантилей, полагая, что распределение наработки до отказа эксплуатируемых блоков описывается  $DN$ -моделью надёжности. Тогда выражение для вероятности  $j$ -го отказа определится как

$$\Phi\left(\frac{t_j - T_0}{v \cdot \sqrt{t_j \cdot T_0}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{t_j + T_0}{v \cdot \sqrt{t_j \cdot T_0}}\right) = \frac{j}{N}, \quad (1)$$

где  $\Phi(\arg)$  – функция нормированного нормального распределения;

$v = 0,80$  – коэффициент вариации наработки электронного блока до отказа.

Уравнение (1) запишем в виде

$$\Phi\left(\frac{X - 1}{v \cdot \sqrt{X}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{X + 1}{v \cdot \sqrt{X}}\right) = \frac{j}{N}, \quad (2)$$

где  $X = t_j / T_0$  – приведенная наработка эксплуатируемых блоков до отказа.

Точечная оценка средней наработки до отказа вычисляется по зависимости [3]

$$T_0 = \frac{1}{K} \cdot \sum_{j=1}^K \frac{t_j}{X(j/N, v)},$$

в котором приведенная наработка  $X(j/N, v)$  определяется по значениям эксплуатационной вероятности отказа  $F_j = j / N$  и коэффициента вариации наработки до отказа  $v$  путём решения трансцендентного уравнения (2). Решение задачи в Mathcad приведено на листинге 1, где искомые значения  $X_j$  вычисляются с помощью блока Given / Find при последовательном изменении индекса  $j$  в исходных данных от 1 до  $K$ .

Листинг 1. Вычисление МТТФ методом квантилей при единичных отказах

Исходные данные:			
$j := 2$	$t_1 := 2010$	$t_2 := 2780$	$t_3 := 3000 \quad K := 3 \quad N := 50 \quad v := 0.80$
1. Вычисление квантилей $DN$ -распределения			
Given	Ориентировочное значение $X := 0.1$	Эксплуатационная вероятность отказа $Q := j \div N$	
	$\text{снорм}\left(\frac{X - 1}{v \cdot \sqrt{X}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \text{снорм}\left(-\frac{X + 1}{v \cdot \sqrt{X}}\right) - \frac{j}{N} = 0$		
Find(X)	$= 0.23376$	Квантили: $x_1 := 0.19612$	$x_2 := 0.23376 \quad x_3 := 0.26314$
2. Оценка МТТФ эксплуатируемых блоков		$T_0 := \frac{1}{K} \cdot \sum_{j=1}^K \frac{t_j}{x_j} = 1.118 \times 10^4$ летних часов	

Прогнозирование средней наработки до отказа при отсутствии отказов. Пусть в составе бортового оборудования ВС авиакомпании эксплуатируется  $N = 50$  однотипных комплектов спутниковой навигационной системы (СНС), которые в течение  $\tau = 5000$  часов после начала их лётной эксплуатации функционировали безотказно. Найти оценку МТТФ эксплуатируемых СНС.

Известно [4], что нижняя граница вероятности отсутствия отказа за интервал  $\tau$  безотказной эксплуатации  $N$  изделий ( $N \geq 4$ ) может быть вычислена по формуле

$$\underline{R}(\tau) = \left( \frac{1-q}{2} \right)^{1/N},$$

где  $q = 0,95$  – двухсторонняя доверительная вероятность оценки показателя безотказности.

С другой стороны, нижняя доверительная вероятность безотказной работы при известном законе распределения отказов может быть выражена через функцию безотказности диффузионной немонотонной модели надёжности:

$$\underline{R}(\tau) = \Phi\left(\frac{\underline{\mu} - \tau}{\bar{v} \cdot \sqrt{\underline{\mu} \tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\bar{v}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\underline{\mu} + \tau}{\bar{v} \cdot \sqrt{\underline{\mu} \tau}}\right) = \left(\frac{1-q}{2}\right)^{1/N},$$

где  $\underline{\mu}$  – искомая нижняя доверительная граница оценки средней наработки СНС до отказа;  $\bar{v} = 1,0$  – верхняя доверительная граница оценки коэффициента вариации наработки СНС до отказа.

Следовательно, при известном значении верхней доверительной оценки коэффициента вариации наработки до отказа  $\bar{v}$  можно получить оценку нижней границы параметра  $\underline{\mu}$  с заданной доверительной вероятностью  $q$  (листинг 2).

Листинг 2. Вычисление МТТФ СНС при отсутствии отказов

Given	Ориентир $\mu := 10000$ лётных часов
$\text{cnorm}\left(\frac{\underline{\mu} - \tau}{\bar{v} \cdot \sqrt{\underline{\mu} \tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\bar{v}^2}\right) \cdot \text{cnorm}\left(-\frac{\underline{\mu} + \tau}{\bar{v} \cdot \sqrt{\underline{\mu} \tau}}\right) - \left(\frac{1-q}{2}\right)^{1+N} = 0$	
$\text{MTTF} := \text{Find}(\underline{\mu}) = 2.403 \times 10^4 \text{ лётных часов}$	

**Прогнозирование распределения числа  $m$  отказов** выполнено на примере многослойной печатной платы (МПП), являющейся сменной сборочной единицей (ССЕ) в составе быстростъёмного блока (БСБ) авионики. Состав электрорадиоэлементов платы включает: 20 дискретных ИМС, 86 резисторов (МЛТ), 72 конденсатора (керамических), 24 контакта ШР, 2260 паяных соединений и 1 МПП. Прогнозирование распределения  $m$  выполнено на основе модели восстановления вида

$$F(m) = \Phi\left(\frac{m - X_{сл}}{v_{сл} \cdot \sqrt{X_{сл}}}\right) + \exp\left(\frac{2 \cdot m}{v_{сл}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{m + X_{сл}}{v_{сл} \cdot \sqrt{X_{сл}}}\right),$$

где  $X_{сл}$  – приведенное среднее значение срока службы платы;  $v_{сл}$  – коэффициент вариации срока службы, которые являются функциями

параметров безотказности  $\mu_c$ ,  $\nu_c$  платы. Результаты прогнозирования распределения числа  $m$  отказов платы приведены на рис. 1 и 2.

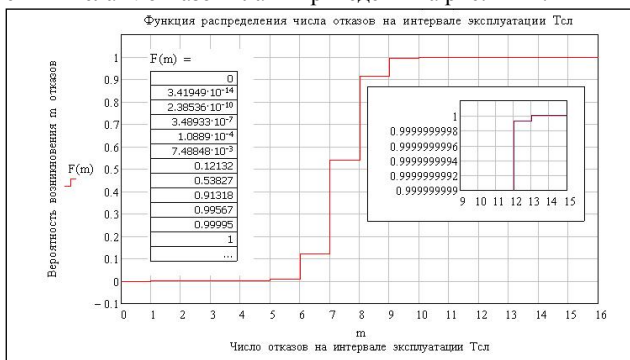


Рис. 1. Распределение числа отказов  $m$  печатной платы (CCE)

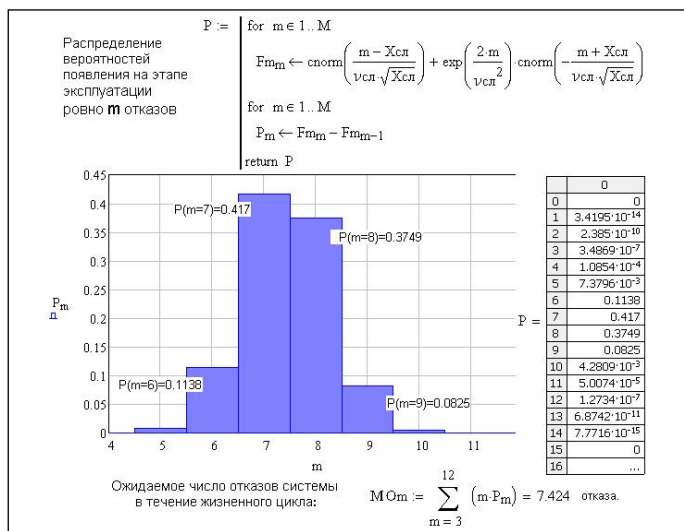


Рис. 2. Распределение вероятностей проявления ровно  $m$  отказов

**Прогнозирование количественного состава запасных элементов.** Вероятности проявления числа отказов (см. рис. 2. вектор P) существенно отличаются, и вряд ли нужно учитывать все отказы при оценке количественного состава запасных элементов. Авиационные правила [1, раздел А – Общие положения] содержат определения, терминологию и общие требования к летной годности самолета при отказах функциональных систем. События типа “отказные состояния” по частоте возникновения делятся на категории с соответствующими количественными оценками вероятностей их проявления и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Классификация авиационных событий и вероятности их проявления

Классификация отказных состояний	Вероятность проявления	Классификация отказных состояний	Вероятность проявления
<b>Вероятные</b>	более $10^{-5}$	<b>Редкие (невероятные)</b>	$10^{-5} \dots 10^{-9}$
– частые	более $10^{-3}$	– маловероятные	$10^{-5} \dots 10^{-7}$
– умеренно вероятные	$10^{-3} \dots 10^{-5}$	– крайне маловероятные	$10^{-7} \dots 10^{-9}$
<b>Практически невероятные</b>			менее $10^{-9}$

При прогнозировании количественного состава запасных элементов можно на основе табл. 1 задать критерий (границу) неучёта тех отказов, вероятность проявления которых меньше заданного критерия. Так, при “жестком” критерии  $P_m = 10^{-9}$  практически невероятными на интервале длительной эксплуатации являются ситуации проявления менее 3-х и более 12-ти отказов (см. рис. 2). Такой подход даёт оценку минимального количественного состава запасных элементов (листинг 3).

Листинг 3. Прогнозирование состава  $Z$  запасных элементов ( $ИМС, R$  и  $C$ ) для ССЕ

```

Вычисление запасного комплекта (ИМС, R и C, N' := 3) при PD := 0.99 :
S := 4000  s := 1..S  Δs := 10-2  zs := Δs * s  PDi := (PD1+s/N')
Z := for i ∈ 1..N'
      for s ∈ 2..S
        Pdi,s ← cnorm( (zs - bi) / (vi√zs) ) - exp( [ 2 * bi / (vi)2 ] * cnorm( (zs + bi) / (vi√zs) ) )
        break if Pdi,s > PDi
        Δ ← (zs - zs-1) / (Pdi,s - Pdi,s-1 + 10-100) * (PDi - Pdi,s-1)
        Zi ← zs-1 + Δ
        Zi ← ceil(Zi + 0.5)
      return Z
Зачасной комплект:
ИМС  Z = ( 12 )
R    Z = ( 9 )
C    Z = ( 10 )

```

**Вывод.** Изложенный подход и полученные результаты исследования надёжности при длительной эксплуатации создают предпосылки для обеспечения как безопасности полётов, так и эффективного технического обслуживания, исключая ситуацию “самолёт на земле из-за отсутствия запасных элементов”.

### Список литературы

1. АП-25. Авиационные правила. Нормы лётной годности самолётов. – М.: МАК, 1994.
2. Бойко Б.В., Комаров Ю.Ю. Система информационного обеспечения технического обслуживания и ремонта самолётов: экономическая выгода и безопасность полётов // Труды авиационного института. – М.: МАИ. – № 3, 2008.
3. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. ДСТУ 3433-96. – К.: Держстандарт України, 1996.
4. Стрельников В.П. Оценка ресурса изделий электронной техники // Математические машины и системы. – К.: НАНУ. – № 2, 2004.