

УДК 629.735.015.4

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРОЩЕННЫХ ОЦЕНОК НЕОБХОДИМЫХ ЗАПАСОВ ПО СТЕПЕНИ НАДЕЖНОСТИ КОНТРОЛЯ

Ю.В. ФЕШКИН

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Никоновым В.В.**

В статье рассматривается применение вероятностной модели для упрощенных оценок необходимых запасов по степени надежности контроля (вероятности обнаружения трещины). Приводятся соотношения и графики для оценок коэффициентов надежности от вероятности обнаружения усталостной трещины. Показано, что применение коэффициентов надежности, равных 2...3, возможно при высоком качестве диагностирования (вероятность обнаружения усталостной трещины более 0,95).

**Ключевые слова:** усталостные трещины, живучесть, силовые элементы авиаконструкции, периодичность контроля.

Поскольку явление усталости носит случайный характер [5], то в основе нормирования требований к обеспечению безопасности от явлений усталости (в частности, при определении необходимых запасов) лежат вероятностные модели.

По частоте возникновения события (отказы, отказные состояния, особые ситуации, внешние воздействия), отнесенные к одному часу полета либо к одному полету, делятся на повторяющиеся (вероятность отказа более  $10^{-3}$ ), умеренно вероятные (в диапазоне  $10^{-3} - 10^{-5}$ ), маловероятные (в диапазоне  $10^{-5} - 10^{-7}$ ), крайне маловероятные (в диапазоне  $10^{-7} - 10^{-9}$ ) и практически невероятные (менее  $10^{-9}$ ) [1].

Практика применения этих нормативных требований, как правило, ставит в соответствие катастрофической ситуации практически невероятное событие, аварийной ситуации – крайне маловероятное, сложной ситуации – маловероятное и усложнению полета – умеренно вероятные события.

В основе нормированных соотношений для расчетов периодичности контроля лежит формула  $\Delta t = t_*/\eta$  ( $t_*$  - длительность роста трещины от начального размера до предельного;  $\eta$  – коэффициент надежности, выбираемый по рекомендациям МОР АП-25.571 [4]). Проблема расчетов по указанной формуле заключается в трудности оценок величины  $t_*$  (периода живучести) [6] в условиях реальной эксплуатации и выборе коэффициента надежности  $\eta$ . Как следует из табл. 1, теоретически коэффициент надежности при определении периодичности осмотров варьируется от 2,0 до 20,25 [3].

На практике же коэффициент надежности для алюминиевых сплавов редко превышает пять единиц.

Кроме того, важно хотя бы приближенно оценить величину требуемого коэффициента надежности в зависимости от вероятности обнаружения трещины и степени влияния рассматриваемого силового элемента на безопасность полетов.

В общем случае соотношение для расчета вероятности безотказной работы силового элемента с усталостной трещиной имеет вид [3]

$$R(t) = \begin{cases} 1, & t < t_*; \\ F_{t_L}(t_*), & t \geq t_*, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R(t)$  – вероятность безотказной работы элемента;  $F_{t_L}(t_*)$  - функция распределения времени развития трещины до критического размера (время существования трещины в конструкции  $t_*$ ).

Таблица 1

## Коэффициенты надежности

	Учитывает	При установлении безопасного ресурса или наработки до начала осмотров	При определении периодичности осмотров	Зависит от
$\eta_1$	Уровень соответствия структуры программы реальным спектрам нагружения	1,0 – 1,5	1,0 – 1,5	полноты воспроизведения нагрузок типового полета
$\eta_2$	Степень опасности разрушения	1,0 – 1,5	1,0 – 1,5	однопутности или многопутности передачи нагрузок
$\eta_3$	Рассеивание нагруженности конструкции в эксплуатации	1,0 – 2,0	1,0 – 2,0	степени учета возможного влияния условий эксплуатации
$\eta_4$	Разброс характеристик усталости и длительности роста трещин	3,0 – 5,0	2,0 – 3,0	количества испытательных экземпляров
$\eta_5$	Влияние окружающей среды	-	1,0 – 1,5	результатов специального анализа
$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5$		3,0 – 22,5	2,0 – 20,25	
$\eta_{\text{доп1}}$	Повышенный разброс результатов испытаний (в дополнение к $\eta_4$ )	1,0 – 1,5	1,0 – 1,5	фактического разброса результатов испытаний
$\eta_{\text{доп2}}$	Применение расчетных методом (пересчеты результатов испытаний или прямые расчеты)	1,0 – 2,0	1,0 – 2,0	Апробированности расчетных методов

Если считать, что вероятность обнаружения трещины  $P_{\text{обн}}$  постоянна при каждом из осмотров ( $P_{\text{обн}} = \text{const}$ ), то справедливо соотношение

$$R(T) = 1 - F_{t_0}(T - t_*)[1 - P_{\text{обн}}]^I. \quad (2)$$

В соотношении (2)  $F_{t_0}(x)$  – функция распределения времени образования трещины;  $T$  – назначенный ресурс;  $I$  – количество осмотров.

Будем считать, что усталостная трещина изначально существует в конструктивном элементе ( $F_{t_0}(T - t_*) = 1$ ), и осмотры проводятся с начала эксплуатации. Эти допущения идут в запас по расчетам надежности. Нетрудно заметить, что в этом случае число осмотров  $I$  связано с коэффициентом запаса  $\eta$  соотношением  $I = \text{INT} \left[ \frac{t_*}{\Delta t} \right] = \text{INT}[\eta]$ . Проводя данные преобразования в соотношении (2), получим нижнюю оценку надежности  $\check{R} < R$

$$\check{R}(T) = 1 - [1 - P_{\text{обн}}]^{\text{INT}[\eta]}, \quad (3)$$

где  $\text{INT}[\eta]$  – целая часть числа.

Соотношение (3) может быть получено и из более простых и очевидных соображений. Вероятность отказа ( $1 - \check{R}(T)$ ) силового элемента заключается в вероятности достижения трещиной своего предельного значения  $L_{\text{пр}}$ . Событие достижения трещиной предельного значения эквивалентно пропуску трещины при всех  $I$  осмотрах. События пропуска трещины при каждом из осмотров независимы и имеют постоянную вероятность  $(1 - P_{\text{обн1}})$ , а

вероятность отказа за I осмотров –  $[1 - P_{обн1}]^I$ . Выражая количество осмотров через коэффициент надежности, получим соотношение, эквивалентное (3)

$$1 - \check{R}(T) = [1 - P_{обн}]^{INT[\eta]}. \tag{4}$$

Логарифмируя (4) и проводя необходимые преобразования, получим соотношение для оценок коэффициента надежности

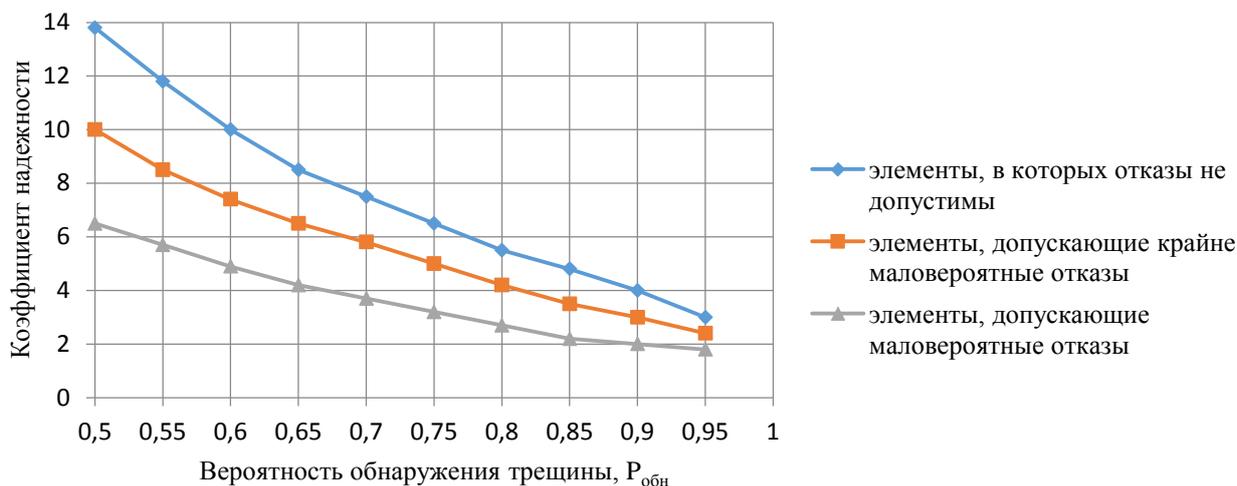
$$INT[\eta] = \log[1 - \check{R}(T)] / \log[1 - P_{обн1}]. \tag{5}$$

Обозначим за  $P^H(T) = 1 - \check{R}(T)$  допустимую вероятность отказа за все время эксплуатации. Тогда коэффициент безопасности должен удовлетворять условию

$$INT[\eta] \geq \log[P^H(T)] / \log[1 - P_{обн1}]. \tag{6}$$

Допустимую вероятность отказа  $P^H(T)$  можно определить из нормативных значений надежности, определенных в АП-25.571. Так для элементов, единичный отказ (усталостное разрушение) которых может привести к аварийной либо катастрофической ситуации (особо ответственные силовые элементы), отказ трактуется как крайне маловероятное событие, вероятность возникновения которого за час налета должна лежать в диапазоне  $10^{-8} \dots 10^{-7}$ . В этом случае допустимую вероятность отказа можно приблизительно оценить  $P^H(T) \approx 10^{-8}T$ . Учитывая, что ресурс современных самолетов гражданского назначения имеет порядок  $T \sim 10^5$ , получим порядок вероятности отказа  $P^H(T) \sim 10^{-3}$ . При этом надежность  $\check{R}(T) \approx 0,999$ . Системы с таким уровнем надежности относятся к высоконадежным [2].

На рис. 1 приведен график зависимости коэффициента надежности по периодичности контроля  $\eta$  от вероятности обнаружения трещины при однократном осмотре. График построен из условия равенства в соотношении (7), что соответствует минимально возможным значениям величин  $\eta$ . Нормативное значение вероятности отказа принято равным  $P^H(T) = 10^{-3}$ .



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента надежности от вероятности обнаружения трещин

Из графика видно, что при значениях вероятности обнаружения трещины 0,95; 0,90 и 0,5 коэффициент надежности для элементов, допускающих крайне маловероятные отказы, равен  $\eta \cong 2,3$  и 10 соответственно. Поэтому применение коэффициентов надежности  $\eta = 2 \dots 3$  (наиболее применяемых на практике) возможно при высоком качестве диагностирования ( $P_{обн} > 0,95$ ). Данный вывод соответствует требованиям МОС к АП 25.571 [4] к обнаруживаемой трещине.

Если нормируется количество отказов на тысячу летных часов  $K_{1000}^H$  или величина средней вероятности отказа на один час налета  $\omega^{HT}$ , для расчетов можно использовать формулы:

$$\eta = \log(10^{-3} K_{1000}^H T) / \log(1 - P_{обн}); \quad (7)$$

$$\eta = \log(\omega^{HT}) / \log(1 - P_{обн}). \quad (8)$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **АП-25.** Нормы летной годности самолетов транспортной категории. - М.: ОАО «Авиаиздат», 2009.
2. **Болотин В.В.** Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. - М.: Стройиздат, 1971.
3. **Бутушин С.В., Никонов В.В., Фейгенбаум Ю.М., Шапкин В.С.** Обеспечение летной годности воздушных судов гражданской авиации по условиям прочности. - М.: МГТУ ГА, 2013.
4. **МОС к АП 25.571.** Обеспечение безопасности конструкции по условиям прочности при длительной эксплуатации: директ. письмо АР МАК от 30.12.96 г. № 5-96.
5. **Никонов В.В., Стреляев В.С.** Расчетно-экспериментальная оценка циклической трещиностойкости при эксплуатационных режимах нагружения. - М.: Машиностроение, 1991.
6. **Никонов В.В.** Проблемы живучести в контексте перевода авиатехники на эксплуатацию по состоянию // Научный Вестник МГТУ ГА, сер. Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. Безопасность полетов. - 2004. - № 80(10).

#### THE USE OF PROBABILITY MODELS FOR SIMPLIFIED ESTIMATES OF REQUIRED RESERVES RELIABILITY CONTROL

Feshkin Yu.V.

The article discusses the use of a probabilistic model for simplified assessments required reserves reliability control (crack detection probability). Ratios and charts for estimating reliability coefficients of the probability of detection of a fatigue crack are given. The use of safety factors equal to 2 ... 3 possible with a high quality of diagnosis (probability of detecting fatigue crack greater than 0.95) is shown.

**Keywords:** fatigue cracks, durability, load-bearing element of air frame, frequency control.

#### Сведения об авторе

**Фешкин Юрий Владимирович**, 1989 г.р., окончил МГТУ ГА (2012), аспирант МГТУ ГА, область научных интересов – живучесть авиационных конструкций.