

В.Л.Каганов, В.А.Капитонов

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ  
И ОТРАБОТОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В настоящее время в практике создания высоконадежных изделий применяются две различные модели надежности.

Наиболее распространенная математическая модель рассматривает отказ как случайное событие, проявление которого во времени описывается уравнением

$$q(\tau) = 1 - P(\tau) = \int_0^{\tau_i} f(\tau) d\tau = 1 - \exp\left[-\int_0^{\tau_i} \lambda(\tau) d\tau\right], \quad (1)$$

где  $q(\tau)$  - вероятность отказа изделия;

$P(\tau)$  - вероятность безотказной работы изделия;

$\tau_i$  - время работы (наработка) изделия;

$f(\tau)$  - плотность распределения времени безотказной работы;

$\lambda(\tau)$  - интенсивность отказов изделия.

Статистическая зависимость  $f(\tau)$  или  $\lambda(\tau)$  позволяет определить вероятность безотказной работы изделия в течение заданного времени ( $0 \dots \tau_i$ ) или определить с заданной вероятностью  $P$  время безотказной работы изделия [1,2], т.е. описать его ресурсную характеристику.

Однако эффективность применения математической модели надежности при экспериментальной отработке изделий низка, так как модель ориентирована на проведение массовых испытаний на безотказность при номинальных нагрузках.

Физическая модель надежности (модель "нагрузка - прочность") рассматривает отказ как реализацию превышения нагрузки  $Q$  над прочностью  $R$  изделия [1,3]. Так как в общем случае нагрузка и прочность являются случайными величинами, то риск отказа изделия

$$r = \text{Вер} \{ Q > R \} \quad (2)$$

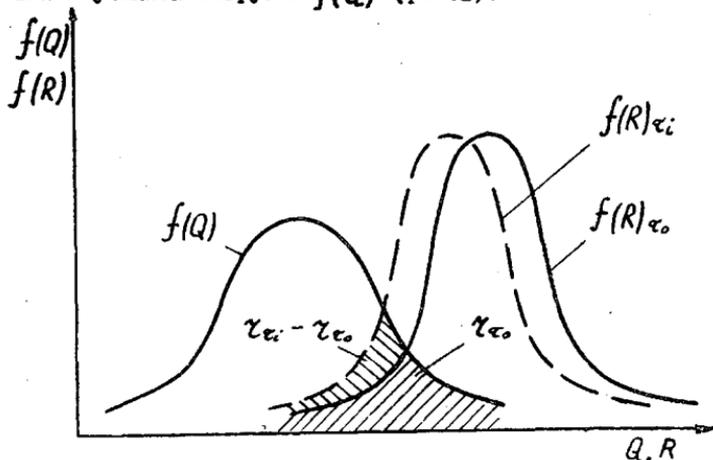
Риск отказа имеет смысл вероятности отказа изделия (доли отказавших изделий), обладающего прочностной характеристикой  $f(R)$ , при реализации случайной эксплуатационной нагрузки  $f(Q)$  в любой момент времени.

Физическая модель надежности имеет обширный методический аппарат, эффективно используемый при решении задач экспериментальной обработки, однако при отработке ресурсных характеристик этими методами пользуются редко. Попытки методически обосновать применение физической модели к решению задач обеспечения долговечности изделий предпринимались [4, 5], однако широкого распространения эти методы не нашли [6].

Сободая достоинства и недостатки рассмотренных моделей надежности, можно сказать, что математическая модель, давая зависимость  $q(\tau)$ , описывает ресурсные характеристики изделия без строгого учета реальных условий эксплуатации изделия, и эффективность ее применения при экспериментальной отработке изделий ограничивается низкой информативностью испытаний на безотказность; физической же модель, описывая работоспособность изделия в зависимости от реальных условий эксплуатации, обладает ограниченными возможностями в части оценки ресурсных характеристик изделия.

Для устранения недостатков существующих моделей надежности необходимо установить между ними взаимосвязь, которая позволила бы объединить их при решении практических задач.

Рассмотрим процесс формирования статистической зависимости плотности распределения времени безотказной работы с позиций физической модели надежности. Будем считать, что множество изделий, имеющих прочностную характеристику  $f(R)$ , изменяющуюся во времени вследствие старения ("дрейф" прочностной характеристики), подвергается воздействию случайной нагрузки  $f(Q)$  (рис.1).



Р и с.1. Изменение надежности изделия вследствие старения или износа

Необходимо отметить, что старение может проявляться не только как снижение, но и как повышение прочности изделия.

Оценивая влияние нагрузки на величину риска отказа изделия, следует обратить внимание на то, что, несмотря на независимость  $f(Q)$  от времени, в процессе эксплуатации происходит изменение нагрузок, действующих на каждое изделие, входящее в рассматриваемое множество, что приводит к увеличению числа отказавших изделий в процессе их эксплуатации при неизменных  $f(R)$  и  $f(Q)$ .

Большой практический интерес представляет случай, когда можно пренебречь влиянием случайных изменений нагрузки во времени на ресурсные характеристики. Это соответствует условиям эксплуатации изделий, для которых задаются детерминированные нагрузки или распределения нагрузок, усеченные на предельных уровнях, относительно которых выполняются все проектные оценки и проводится отработка изделий. Такое допущение справедливо также для изделий одноразового применения. За время работы изделий с указанным выше характером изменения нагрузки могут иметь место изменения прочностных характеристик. В этом случае представляется возможным объединение методов математической и физической моделей для решения практических задач обеспечения ресурсных характеристик высоконадежных изделий.

Так как рассматриваемые математическая и физическая модели надежности применены к одному множеству изделий, находящихся под действием одной и той же нагрузки, то очевидно, что вероятность отказа изделия за какой-то период времени составит

$$q_{r_i} = \int_0^{\tau_i} f(\tau) d\tau = r_{\tau_0} + (r_{\tau_i} - r_{\tau_0}), \quad (3)$$

где  $r_{\tau_0} = \text{Вер} \{ Q > R_{\tau_0} \}$  - риск отказа изделия в начальный момент;  
 $r_{\tau_i} = \text{Вер} \{ Q > R_{\tau_i} \}$  - риск отказа в момент  $\tau_i$  ;  
 $\tau_0 < \tau_i$  - время проявления начальных отказов.

Принимая  $\tau_0$  за начало отсчета наработки изделий, сохранивших работоспособность в момент приложения нагрузки, получаем

$$q_{r_i} = \int_0^{\tau_i} f(\tau) d\tau = \text{Вер} \{ Q > R_{\tau_i} \} - \text{Вер} \{ Q > R_{\tau_0} \}, \quad (4)$$

или

$$f(\tau) = \frac{dr}{d\tau}. \quad (5)$$

Уравнения (3), (4) или (5) устанавливают количественную связь между прочностными и ресурсными характеристиками изделий и могут рассматриваться как обобщенная модель надежности.

В качестве примера возможного использования обобщенной модели для решения практических задач обеспечения надежности рассмотрим методическую схему подхода к обработке надежности и ресурсных характеристик изделий.

Будем исходить из того, что при решении этих задач разработчик использует лишь один прием - проведение испытаний. Считаем, что эксплуатационная нагрузка является детерминированной величиной  $Q_3$ . В этом случае  $dr/d\tau$  имеет смысл скорости "дрейфа" прочностной характеристики изделия  $U_R(\tau)$  и учитывает изменения параметров прочностной характеристики. Необходимо иметь в виду, что используемое нами понятие "нагрузка" имеет физический смысл воздействия (однофакторного или комплексного), приводящего к отказу изделия в процессе эксплуатации. Принимаем, что нагружение каждого изделия испытательной нагрузкой  $Q_H$  приводит к усечению прочностной характеристики изделия на этом уровне и к отбраковке части изделий, равной

$$r_{Q_H} = \text{Вер} \{ Q_H > R_{\tau_0} \} \quad (6)$$

Для изделия, имеющего усеченную на уровне  $Q_H$  прочностную характеристику, возможны два варианта эксплуатации ( $Q_3 > Q_H$  или  $Q_3 < Q_H$ ), для каждого из которых будут характерны свои показатели надежности и своя ресурсная характеристика.

На рис. 2 представлена логика формирования показателей надежности изделия в случае  $Q_3 > Q_H$ . Соотношение

$$r_{\tau_0} = \text{Вер} \{ Q_3 > R_{\tau_0} \} - \text{Вер} \{ Q_H > R_{\tau_0} \} \quad (7)$$

характеризует риск отказа изделия в начальный момент эксплуатации  $\tau_0$ , а зависимость

$$r_{\tau_i} = \text{Вер} \{ Q_3 > R_{\tau_i} \} - \text{Вер} \{ Q_H > R_{\tau_i} \} \quad (8)$$

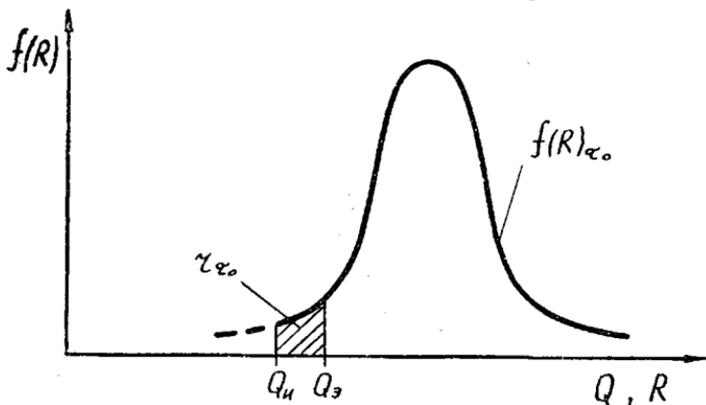
характеризует вероятность отказа изделия за время работы вследствие "дрейфа" прочностной характеристики.

На рис. 3 представлена логика формирования показателей надежности изделия в случае  $Q_3 < Q_H$ . В этом случае риск отказа изделия в начальный момент эксплуатации

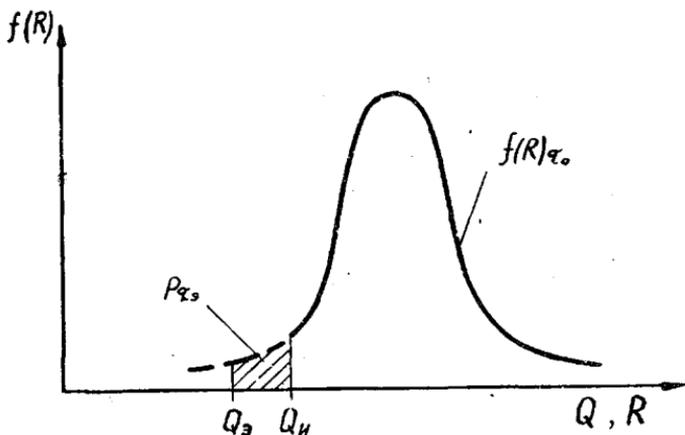
$$r_{\tau_0} = 0$$

(9)

и возможен период безотказной эксплуатации  $\tau_3$ , соответствующий



Р и с. 2. Логика формирования параметров надежности изделия в случае  $Q_3 > Q_{II}$



Р и с. 3. Логика формирования параметров надежности изделия в случае  $Q_3 < Q_{II}$

запасу работоспособности  $p_{\tau_3}$  в пределах "дрейфа" прочностной характеристики от  $Q_{II}$  до  $Q_3$  (при  $r_{\tau_0} = 0$ )

$$p_{\tau_3} = \text{Вер}\{Q_{II} > R_{\tau_0}\} - \text{Вер}\{Q_3 > R_{\tau_0}\},$$

(10)

после чего вероятность отказа изделия за время работы  $\tau_i - \tau_0$ , составит

$$q_{\tau_i} = \text{Вер} \{ Q_3 > R_{\tau_i} \} - \text{Вер} \{ Q_{II} > R_{\tau_0} \} \quad (II)$$

Первый вариант эксплуатации  $Q_3 > Q_{II}$  приемлем для ремонтируемых изделий и изделий с относительно низкими требованиями надежности. Второй вариант эксплуатации  $Q_3 < Q_{II}$  должен распространяться на высоконадежные неремонтируемые изделия.

Как видно из уравнений (7) - (II), знание закономерностей "дрейфа" прочностной характеристики во времени позволяет определить ресурсную характеристику изделия и решить основные задачи обеспечения его надежности.

Рассмотрим высоконадежное неремонтируемое изделие, для которого задано:

время хранения  $\tau_{xp}$  ;  
 время штатной работы  $\tau_{бр}$  ;  
 вероятность безотказной работы  $P(\tau_{бр}) = 1 - q_{норм}$  ,

где  $q_{норм}$  - допустимая (нормативная) вероятность отказа.

В соответствии с рассмотренной выше методической схемой для решения задач обеспечения надежности изделия следует экспериментально определить начальную прочностную характеристику  $f(R)_{\tau_0}$  и серию прочностных характеристик изделия в интервале времени  $\tau_0 \dots \tau_i$  для нахождения зависимости  $V_R = dr/d\tau = f(\tau)$  в интересующий нас период времени. Кроме того, необходимо исследовать зависимость скорости "дрейфа" от нагрузки, так как это может привести к различным  $V_R(\tau)$  для периодов хранения и работы изделия. Затем определим  $Q_3$  и  $Q_{II}$ , обеспечивающие

$$r_{\tau_0} = 0 \quad , \quad (I2)$$

$$P_{\tau_{xp}} = \text{Вер} \{ Q_{II} > R_{\tau_0} \} - \text{Вер} \{ Q_3 > R_{\tau_{xp}} \} \geq 0 \quad , \quad (I3)$$

$$q_{\tau_i} = q(\tau_{бр}) = \text{Вер} \{ Q_3 > R_{\tau_i} \} - \text{Вер} \{ Q_{II} > R_{\tau_0} \} \leq q_{норм} \quad (I4)$$

С точки зрения практического применения рассматриваемого метода решения задач обеспечения надежности необходимо отметить, что проведение ооьшого объема испытаний по определению прочностных характеристик сложных и дорогостоящих изделий не может быть рентабельным.

Поэтому указанный метод должен быть ориентирован в основном на испытание элементной базы создаваемых изделий (элементы конструкции, комплектующие изделия межотраслевого применения, ЭРИ и др.), далее по тексту — элемент конструкции.

Можно считать, что для выполнения условий (I2)–(I4), гарантирующих надежную работу изделия, необходимо практическое решение следующих конкретных задач в процессе отработки изделия:

определение для каждого элемента конструкции физического смысла понятия "нагрузка" как воздействия, приводящего к его отказу в процессе эксплуатации;

экспериментальное определение для каждого элемента конструкции параметров начальной прочностной характеристики;

определение уровня испытательной нагрузки  $Q_{И}$  и уровня эксплуатационной нагрузки  $Q_{Э}$ , обеспечивающих необходимый запас работоспособности каждого элемента конструкции по начальной прочностной характеристике и имеющимся исходным данным (в качестве исходных данных на этом этапе могут использоваться  $\lambda$  — характеристики);

обоснование моделей суммирования показателей надежности элементов конструкции для оценки по ним надежности изделия в целом;

проведение длительных испытаний элементов конструкции с целью определения фактической зависимости  $f(\tau) = dr/d\tau$  для уточнения ресурсных характеристик или режимов  $Q_{Э}$  и  $Q_{И}$ ;

введение для всех элементов конструкции контрольно-технологических испытаний (технологической тренировки) под нагрузкой  $Q_{И}$ ;

корректировка схем и конструкции изделия с целью обеспечения нужных уровней  $Q_{Э}$ ;

проведение отработочных испытаний изделия при повышенных или предельных нагрузках для подтверждения фактического наличия необходимых запасов работоспособности элементов конструкции.

Оценивая эффективность рассмотренной схемы проведения отработочных испытаний, можно предполагать:

1. Отработочные испытания изделий, основанные на обобщенной модели надежности, снизят (в пределах наших технических возможностей и знания физики рабочих процессов изделия) возможность создания нестробатанных изделий.

2. Проведение отработочных испытаний при повышенных и предельных нагрузках может обеспечить количественный контроль запасов работоспособности изделия, соответствующих заданным требованиям к его надежности и ресурсу по отношению к реальным условиям эксплуатации.

3. Методология отработки, основанная на обобщенной модели надежности изделия, должна быть эффективной как в части уровня отработанности изделий, так и в части ускорения отработки; при этом требуется интенсификация инженерных методических работ для планирования отработочных испытаний и проведение таких испытаний в обоснованных объемах.

### Л и т е р а т у р а

1. Белоусов А.И., Биргер И.А. Прочностная надежность деталей турбомашин: Учебное пособие. - Кушбышев: КуАИ, 1983. - 72 с.
2. Дружинин Г.В. Надежность устройства автоматики. - М.:Д.:Энергия, 1964. - 320 с.
3. Закигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.М. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. - М.:Атомиздат, 1978. - 230 с.
4. Хевилэнд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность: Пер. с англ. - М.:Д.:Энергия, 1966. - 231 с.
5. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. - М.:Советское радио, 1966. - 167 с.
6. Базовский И. Надежность. Теория и практика: Пер. с англ. - М.: Мир, 1965. - 375 с.

УДК 681.518.5

Н.А. Камынин, Н.Р.Крупец

#### МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВИБРАЦИИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При решении задач вибрационной диагностики и контроля ГТД широко используется метод спектрального анализа, позволяющий получать оценки параметров периодических и шумовых составляющих вибропроцессов. Применение цифровой техники обеспечивает возможность достижения высоких метрологических характеристик анализа. Однако некоторые особенности цифровой обработки периодических составляющих [1] создают ряд методических ограничений по точности измерения их частот и интенсивностей.