

Указанных условиях рекомендуется применять для индивидуальной настройки двигателей на заданную величину запаса устойчивости с целью существенного увеличения мощности и снижения расхода топлива.

#### Библиографический список

1. Ахмедзянов А.М., Дубровский И.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термстатодинамическим параметрам. - М.: Машиностроение, 1983. - 206 с.
2. Арьков Ю.Г., Ахмедзянов А.М. Анализ способов оценки запаса устойчивости компрессора серийного ТРД. - В кн.: Испытания авиационных двигателей. Уфа: УАИ, 1972, с.131-137.

УДК 62-75.001.2/045/

В.Д.Каганов

#### ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Резервирование как один из основных приемов обеспечения надежной работы неремонтируемых изделий исследовано весьма детально /1,2/. Существующие методы проектирования предусматривают оптимизацию резервирования. При этом рассматриваются вопросы оптимизации уровня резервирования (элемент, блок, система) и количества резервируемых участников схемы, а также его кратности и логика. Решаются задачи оптимизации с учетом ограничивающих факторов (стоимости, массы, габаритов и т.п.), любой из которых рассматривается в этом случае как затраты. В процессе решения этих задач исследуются экстремумы функции, устанавливающей взаимосвязь между количеством резервируемых элементов системы, ее надежностью и затратами на ее создание и эксплуатацию /3/.

Исследуемые уравнения получаются на основе существующих методов расчета резервирования и известной разработчику изделия информации о зависимости затрат от уровня, кратности и логики резервирования.

Информация о зависимости затрат от технических характеристик резервирования отражает реальные стоимостные или физические (конструктивные) соотношения и, как правило, является достоверной. Расчет надежности сложных систем (изделий) проводится с применением структурных

или структурно-функциональных схем надежности (логических схем) /3/, позволяющих оценить вероятность безотказной работы системы по данным о вероятности безотказной работы ее элементов.

Существующие методы расчета резервирования основываются на известной математической модели надежности и используют математический аппарат, разработанный в предположении о показательном распределении времени безотказной работы равнонадежных элементов системы. Эти методы эффективны, когда фактические количественные показатели надежности элементов системы соответствуют принятым в расчете. Однако в связи с недостаточной достоверностью исходных данных, используемых в расчетах (несоответствие распределения времени безотказной работы принятому закону, отсутствие точных зависимостей интенсивности отказов от режимов работы и внешних нагрузок), эффективность этих методов существенно снижается.

В отдельных случаях указанные недостатки приводят к тому, что резервирование оказывается неэффективным и не обеспечивает надежной работы изделия, однако в большинстве случаев они проявляются как энергетическая и количественная избыточность резервирования, существующая в реальных изделиях сверх необходимого уровня. Энергетическая избыточность характеризуется тем, что элементы системы эксплуатируются на режимах существенно более низких, чем номинальные, так как допустимый для элементов уровень нагрузок с точки зрения обеспечения заданных требований к надежности системы в подавляющем большинстве случаев неизвестен. Количественная избыточность характеризуется тем, что из множества резервированных элементов системы, как правило, резерв реализуется лишь на одном-двух элементах за весь период эксплуатации. Если рассматривать количественную и энергетическую избыточность как затраты, то следует признать, что существующие методы расчета резервирования могут приводить к созданию изделий с уровнем затрат, очень далеким от оптимума.

Отмеченные недостатки наиболее остро проявляются при создании различных неремонтируемых изделий разового применения. Обеспечение их надежности путем резервирования, многократно повышающего технический ресурс изделий, приводит к тому, что после выполнения целевой задачи прекращают функционировать технически исправные и работоспособные изделия, в то время как с точки зрения минимизации затрат наилучшим следует считать изделие, вырабатывающее полностью свой технический ресурс в течение заданного времени.

Стремление предотвратить последствия указанных недостатков находит свое выражение в виде предостережений от необоснованного резервирования /4/, однако практических рекомендаций, которые исключали

бы возможность принятия неправильных решений, в методической и нормативно-технической литературе нет.

Очевидно, что необходимым условием оптимизации резервирования является максимально возможное снижение его избыточности — обеспечение заданной вероятности безотказной работы изделия при минимальном превышении его технического ресурса над назначенным. Традиционные методы расчета резервирования не могут решить эту задачу, так как используемый ими математический аппарат однозначно связывает рост вероятности безотказной работы изделия с увеличением его ресурса.

Рассмотрим возможность использования для решения поставленной задачи при расчете резервирования аппарата обобщенной модели надежности  $\{B\}$ , в соответствии с которой

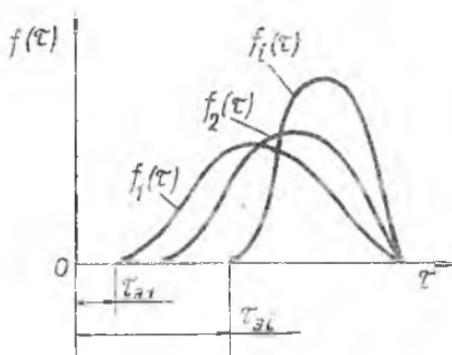
$$f(\tau) = \frac{dz}{d\tau},$$

где  $f(\tau)$  — плотность распределения времени безотказной работы (ресурсная характеристика) элемента конструкции изделия;  $z = \text{Вер}\{Q > R\}$  — риск отказа (вероятность превышения нагрузки  $Q$  над прочностью  $R$ ) элемента в произвольный момент времени.

Ресурсная характеристика элемента конструкции, имеющего начальную характеристику  $f(R)_{\tau_0}$ , усеченную испытательной нагрузкой на уровне  $Q_n$ , формируется в результате ее "дрейфа" и взаимодействия с эксплуатационной нагрузкой  $Q_3$ . Вследствие этого элемент конструкции с начальной прочностной характеристикой  $f(R)_{\tau_0}$  может обладать множеством различных ресурсных характеристик  $f_1(\tau), f_2(\tau), \dots, f_i(\tau)$ , каждая из которых соответствует определенным условиям изготовления ( $Q_n$ ) и эксплуатации ( $Q_3$ ). В случае  $Q_3 < Q_n$ , характерном для создания неремонтируемых изделий, каждая ресурсная характеристика обладает некоторым периодом безотказной работы элемента  $\tau_3$ , в течение которого риск отказа элемента в любой момент времени  $Z_{\tau_3} = 0$  (рис. I). Очевидно, что при использовании такой ресурсной характеристики в расчетах резервирования необходимо учитывать и вид функции  $f_i(\tau)$ , и наличие в ее составе периода безотказной работы элемента конструкции. Надежность сложной системы, состоящей из большого числа последовательно и параллельно соединенных элементов, в этом случае должна также описываться ее ресурсной характеристикой.

Для расчета ресурсной характеристики системы воспользуемся алгоритмом объединения распределений, позволяющим определять параметры последовательно или параллельно соединенных элементов, имеющих ресурсные характеристики  $f_A(\tau)$  и  $f_B(\tau)$  произвольного вида;

разбиваем ресурсные характеристики единичных элементов на  $u$



Р и с.1. Ресурсные характеристики элемента конструкции  $Q_n > Q_0$ ,  $Q_0 = \text{const}$  и  $Q_{1n} < Q_{2n} < \dots < Q_{in}$

различное в зависимости от типа соединения элементов: при последовательном соединении  $T_{ABJ}$  равно меньшему значению среднего времени безотказной работы перемножаемых долей единичных элементов, при постоянном резервировании  $T_{ABJ}$  равно большему значению среднего времени безотказной работы перемножаемых долей, при резервировании замещением  $T_{ABJ}$  равно сумме значений средних времен безотказной работы перемножаемых долей;

суммируем полученные доли попарно соединенных элементов, характеризующихся одинаковыми  $T_{ABJ}$ ; каждая сумма будет определять долю пар элементов  $\Delta T_{ABJ}$ , имеющих соответствующее среднее время безотказной работы  $T_{ABJ}$ ; совокупность долей  $\Delta T_{ABJ}$  образует ресурсную характеристику пар элементов  $f_{AB}(\tau)$ .

На графиках рис. 2 и 3 приведены исходные ресурсные характеристики единичных элементов и соответствующие им ресурсные характеристики попарно соединенных элементов при последовательном соединении, постоянном резервировании и резервировании замещением. Многократно используя алгоритм объединения распределений, можно получить на базе ресурсных характеристик единичных элементов ресурсные характеристики сложной системы с любой кратностью резервирования ее элементов.

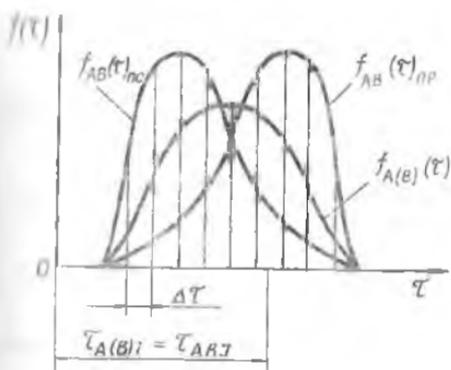
При проведении расчета резервирования сложной системы решаются две традиционные частные задачи:

1) определение необходимости резервирования конкретных элементов системы;

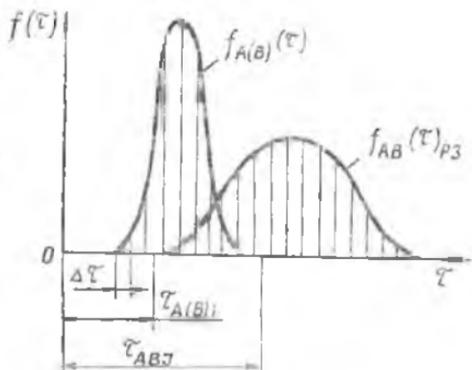
2) определение приемлемой логики и кратности резервирования элементов (участков) системы.

временных интервалов  $\Delta \tau$ , каждый из которых характеризуется долей элементов  $\Delta T_{ABJ}, 1, 2, \dots, n$ , имеющих среднее время безотказной работы  $T_{ABJ}, 1, 2, \dots, n$ ;

перемножаем каждое из значений  $\Delta T_{ABJ}, 1, 2, \dots, n$  на все значения  $\Delta T_{ABJ}, 1, 2, \dots, n$ ; каждое произведение будет характеризовать долю попарно соединенных элементов (пар элементов), полученных путем случайного объединения единичных элементов, имеющих свое время безотказной работы  $T_{ABJ}$ ;



Г и с. 2. Логика формирования ресурсной характеристики пары последовательно соединенных элементов  $f_{AB}(t)_{nc}$  и пары параллельно соединенных элементов (постоянно резервирование)  $f_{AB}(t)_{pp}$



г и с. 3. Логика формирования ресурсной характеристики  $f_{AB}(t)_{pз}$  пары параллельно соединенных элементов (резервирование замещением)

Используемые в настоящее время методы определения логики и кратности резервирования элементов системы детально разработаны [1,3] и в конечном счете направлены на обеспечение  $P_{зр} \geq P_H$ , где  $P_{зр}$  - вероятность безотказной работы резервированного элемента в течение заданного (нормативного) времени  $\tau_H$ ;  $P_H$  - нормативная величина вероятности безотказной работы элемента. При определении необходимости резервирования элемента системы существующими методами, использующими математическую модель надежности, решение принимается на основании сравнения величины  $P_H$  с расчетной величиной вероятности безотказной работы  $P_3 = \exp[-\int_0^{\tau_H} \lambda(\tau) d\tau]$ , где  $\lambda(\tau)$  - интенсивность отказов элемента. В случае  $P_H > P_3$  принимается решение о резервировании элемента системы с целью обеспечения  $1 - q_3^m = P_{зр} \geq P_H$ , где  $q_3 = 1 - P_3$  - вероятность отказа элемента за время  $\tau_H$ ;  $m$  - кратность резервирования.

В случае использования для определения логики и кратности резервирования элементов системы методов, основывающихся на анализе ресурсных характеристик, получаемых на базе обобщенной модели надежности и предложенного алгоритма объединения распределений, решения принимаются с учетом возможностей обеспечения  $P_3 = 1$  (для  $\tau_3 > \tau_H$ ) и

$$P_3 = 1 - \int_{\tau_3}^{\tau_H} f_{A(AB)}(\tau) d\tau \quad (\text{для } \tau_H > \tau_3).$$

Очевидно, что решения, принимаемые на базе предлагаемых методов,

не могут быть адекватными решениям, принимаемым на базе существующих методов. Это объективно связано со специфическим видом ресурсных характеристик элементов (наличие  $\tau_3$ ) вследствие  $Q_H > Q_3$  и с использованием в процессе принятия решений точной информации о виде ресурсных характеристик элементов системы, учитывающих влияния условий изготовления ( $Q_H$ ) и эксплуатации ( $Q_3$ ).

Рассмотрим в качестве примера процедуру принятия решения о необходимости резервирования элемента системы:

в первом случае  $P_3 = \exp\left[-\int_0^{\tau_H} \lambda(\alpha) d\tau\right]$  и при  $P_3 < \mu_H$  принимается решение о резервировании;

во втором случае  $P_3 = 1$  при  $\tau_3 > \tau_H$  и резервирование не имеет смысла при  $Z_{QH} \leq 0,5$ , что эквивалентно  $P_3 = \exp\left[-\int_0^{\tau_H} \lambda(\tau) d\tau\right] \approx 0,5$ ,

где  $Z_{QH}$  - доля отбраковываемых при испытаниях элементов.

Как видно из примера, уже на стадии принятия этого решения количественная и энергетическая избыточности резервирования могут быть снижены до минимально допустимого уровня.

Аналогичным образом будут отличаться от традиционных результаты оптимизации резервирования элементов сложной системы в случае расчета ее ресурсной характеристики на основе ресурсных характеристик элементов, полученных методами обобщенной модели надежности с использованием алгоритма объединения распределений. Практические методики оптимизации резервирования будут отличаться от существующих в настоящее время только математическим аппаратом, описывающим зависимость надежности системы от параметров ее структурной схемы; однако это позволит избежать необоснованного резервирования и свести к минимуму такой вид затрат, как энергетическая и количественная избыточность резервирования.

#### Библиографический список

1. Елифанов А.Д. Надежность автоматических систем. - М.: Машиностроение 1964. - 336 с.
2. Дружинин Г.В. Надежность устройств автоматики. - М.; Л.: Энергия, 1964. - 320 с.
3. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах: Учеб. пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов/ Под ред. Г.В. Дружинина. - М.: Энергия, 1976. - 448 с.

1. Справочник по надежности: В 3-х т./Пер. с англ.; Под ред. Б.Е.Бердичевского.-М.:Мир, 1969-1970. Т.1.- 339 с.; Т.2. - 304 с.; Т.3.- 376 с.
2. Каганов В.Л., Капитонов В.Л. Обобщенная модель надежности и отработочные испытания.- В сб.:Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев:КуАИ, 1984, с. 83-90.

УДК 534.63(088.8)

М.А.Караблин, В.А.Медников

#### ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИСКРЕТНО-ФАЗОВОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ ГТД

Геометрическая неоднородность лопаточной решетки турбомшины в рабочих условиях приводит к появлению дополнительной аэродинамической и массовой неуравновешенности лопаточного венца, которая может вызвать существенное повышение вибрации ГТД на частоте вращения ротора /1/.

Для разработки эффективных методов подавления возникающей дополнительной неуравновешенности лопаточного венца необходимо определить взаимное положение лопаток и изменения этого положения в венце для различных режимов работы турбомшины. Если о положении лопаток судить по периферийному зазору, шагу лопаток, изгибу, раскрутке, перемещению кромок лопаток относительно их корня, то дополнительную неуравновешенность лопаточного венца можно характеризовать величинами первых членов разложения в ряд Фурье распределения по лопаткам вентилятора измеренных значений зазора, шага, изгиба и т.д.

Одним из эффективных способов определения положения лопаток является метод дискретно-фазового анализа. Для получения усредненных за много оборотов ротора значений взаимного расположения кромок лопаток и амплитуды их колебаний может быть использована известная аппаратура ЭДУРА /2/. Однако дополнительная неуравновешенность обусловлена не столько средним положением лопаток, сколько их взаимным относительным положением на каждом обороте ротора. Кроме того, указанная аппара-