

УДК 629.753.083.06:075.8

Ю.Н. ЧОХА, О.И. ЧУМАК

Национальный авиационный университет, Украина

## ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ГТД

Обосновывается концептуально новый подход к процессу диагностики ГТД с использованием комплексных диагностических показателей качества и надежности для принятия эксплуатационного решения.

**математическая модель, диагностика, управление качеством, надежность, техническое состояние, экспертные системы**

### Введение

В настоящее время к числу приоритетных научно-технических проблем, которые порождаются практикой проектирования, производства и использования по назначению технических изделий и сложных динамических систем, относятся проблемы поиска методов и разработки оптимальных технологий управления качеством технического состояния (ТС) и надежностью функционирования (НФ) этих изделий (систем) [1].

Под качеством ТС газотурбинного двигателя (ГТД) в соответствии с современными стандартами [2] следует понимать совокупность свойств газотурбинного двигателя, обуславливающих его пригодность к использованию по назначению.

Оценка качества ТС ГТД осуществляется по комплексному показателю качества ТС ( $W_S$ ), который представляет собой обобщенную безразмерную количественную характеристику свойств двигателя, входящих в состав его качества ТС, и рассматривается применительно к определенным условиям жизненного цикла (проектирования, производства или эксплуатации).

В соответствии с современными стандартами [3] под надежностью функционирования ГТД понимают его способность реализовывать заданные функции (т.е. создание заданной величины тяги при за-

данной величине расхода топлива) при сохранении по времени наработки значений эксплуатационных показателей в заданных пределах, которые соответствуют заданным режимам и условиям эксплуатации.

Оценка надежности функционирования ГТД осуществляется по комплексному показателю вероятности безотказной работы ( $P_S(t)$ ), который представляет собой обобщенную безразмерную количественную характеристику того, что в пределах заданного времени наработки двигателя он не потеряет работоспособности.

Учитывая бурное развитие интеллектуальных информационных технологий в виде экспертных систем, значительно выросла актуализация заинтересованности исследователей и инженеров к решению указанных проблем в промышленности, на транспорте, военном деле и других приложений наукоемких технологий ресурсосохранения [4].

**Формулирование проблемы.** Известные методы и результаты исследований указанных проблем имеют существенные недостатки, а именно:

- использование, как правило, скалярных диагностических признаков и чаще всего времени наработки изделий, которое значительно ограничивает возможности управления их текущим состоянием;
- недостоверный контроль и диагностирование качества ТС и надежности функционирования;

– неэффективное использование возможностей современных ЭВМ и интеллектуальных информационных технологий;

– негибкое использование ресурсов, оптимальных технологий эксплуатации изделий по техническому состоянию, при которых текущее ТС определяется не только по времени наработки, но и в многомерном пространстве диагностических параметров и признаков;

– применение математических моделей и методик, которые неадекватно или с низкой точностью описывают реальные процессы динамики изменения качества и надежности изделий в процессе их применения по назначению и др.

Преодоление этих недостатков приобрело значительную важность для изделий авиационной и космической техники. Особую актуальность проблема управления качеством ТС и НФ в процессе эксплуатации приобрела для таких функционально важных сложных динамических объектов, как авиационные ГТД, в которых деградационные процессы и отказы конструктивных составляющих создают опасные предпосылки к возникновению летных происшествий и в значительной мере влияют на безопасность, регулярность и социально-экономическую эффективность полетов [5, 6].

Именно в таком смысле надо понимать предложенную математическую модель текущей оценки динамики качества ТС и надежности функционирования авиадвигателей, которая позволяет использовать ее как базовую для принципиально новых интеллектуальных систем текущего контроля и диагностирования типа „диагноз – качество – надежность” („д-к-н”).

### Решение проблемы.

#### Базовая многомерная математическая модель оценки динамики технического состояния ГТД

Будем считать, что существует корреляционная связь между текущими значениями диагностических

признаков (параметров), которые измеряются (рассчитываются) по алгоритму комплексного контрольно-расчетного (ККР) метода системой контроля и диагностирования во время работы ГТД [7], и показателями качества ТС ( $W_s$ ) и надежности функционирования ( $P_s$ ). Причем эта связь осуществляется через текущие значения комплексного диагностического показателя (КДП) ( $K_{\Sigma}$ ) двигателя и время его наработки ( $t_i$ ) с начала эксплуатации (СНЭ) (или после последнего ремонта (ППР)). Если считать, что в начальный момент регулярной эксплуатации ГТД ( $t_0$ ), значение его КДП  $K_{\Sigma 0}(t_0) \approx 1,0$ , что свидетельствует о заранее определенном начальном („исправном”) ТС двигателя, то ему соответствуют начальные значения показателя качества ТС  $W_{s0}(K_{\Sigma 0}, t_0) \approx 1,0$  и показателя НФ  $P_{s0}(K_{\Sigma 0}, t_0) \approx 1,0$ .

В период регулярной эксплуатации ГТД значение  $K_{\Sigma i}$  изменяется, что характеризует деградацию его технического состояния в связи с появлением и развитием эксплуатационных неисправностей конструктивных узлов (элементов) проточной части. При этом изменение значений  $K_{\Sigma i}$  может происходить в разных направлениях от начальной величины  $K_{\Sigma 0}(t_0)$ , в зависимости от места появления неисправности (узлов „холодной” или „горячей” части ГТД) [7].

Итак, в общем случае при значениях

$$K_{\Sigma 1}(t_i) = K_{\Sigma 0}(t_0) \pm \Delta K_{\Sigma_{изм.}} = 1,0 \pm \Delta K_{\Sigma_{изм.}}, \quad (1)$$

где  $\Delta K_{\Sigma_{изм.}}$  – допуск на величину систематической погрешности измерений штатной системы контроля параметров ГТД, техническое состояние проточной части считается „исправным”, т.е. текущие значения диагностических параметров двигателя отвечают заданным техническим условиям.

При значениях

$$K_{\Sigma 2}(t_i) = K_{\Sigma 1}(t_i) \pm [\Delta K_{\Sigma i}(\Delta t_i)]_{дон.}, \quad (2)$$

где  $[\Delta K_{\Sigma i}(\Delta t_i)]_{дон.}$  – допуск на предельно допустимое отклонение диагностических параметров от ТУ в межремонтный период наработки ( $\Delta t_i$ ) ГТД, техни-

ческое состояние проточной части двигателя считается „неисправным”, но „работоспособным”, т.е. является предотказным ТС.

При значениях

$$K_{\Sigma 3}(t_i) > (K_{\Sigma 1}(t_i) + [\Delta K_{\Sigma i}(\Delta t_i)]_{don.})$$

или

$$K_{\Sigma 3}(t_i) < (K_{\Sigma 1}(t_i) - [\Delta K_{\Sigma i}(\Delta t_i)]_{don.}) \quad (3)$$

техническое состояние проточной части двигателя считается „неработоспособным”, что равнозначно его отказу.

Соответственно изменению значений КДП двигателя ( $K_{\Sigma i}(t_i)$ ) изменяются и текущие значения показателей качества ТС ( $W_{Si}$ ) и надежности функционирования ( $P_{Si}$ ) ГТД. Но это изменение имеет односторонний характер, т.е.

$$\begin{aligned} 0 \leq \{W_{Si}(K_{\Sigma i}, (t_i))\} \leq 1,0; \\ 0 \leq \{P_{Si}(K_{\Sigma i}, (t_i))\} \leq 1,0, \end{aligned} \quad (4)$$

что свидетельствует об ухудшении качества ТС и НФ авиадвигателя из-за наличия и развития эксплуатационных неисправностей узлов (элементов).

Таким образом, исходя из вышеприведенных соображений, получаем систему нелинейных дифференциальных уравнений, которые в общем виде описывают динамичную систему диагностирования ГТД типа «д-к-н»:

$$\begin{aligned} K_{\Sigma i}(t_i) = K_{\Sigma 0}(t_0) \pm \left( \Delta K_{\Sigma uzm} + \frac{dK_{\Sigma i}}{dt_i} \Delta t_i + \right. \\ \left. + \frac{d^2 K_{\Sigma i}}{dt_i^2} \Delta t_i^2 + \dots + \frac{d^n K_{\Sigma i}}{dt_i^n} \Delta t_i^n \right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} W_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i)) = W_{S0}(K_{\Sigma 0}(t_0)) - \\ - \left[ \Delta W_{S\text{ээкс.}}(\Delta K_{\Sigma uzm}) + \frac{dW_{Si}}{dK_{\Sigma i}} \cdot \frac{dW_{Si}}{dt_i} \Delta t_i + \right. \\ \left. + \frac{d^2 W_{Si}}{dK_{\Sigma i}^2} \cdot \frac{d^2 W_{Si}}{dt_i^2} \Delta t_i^2 + \dots + \right. \\ \left. + \frac{d^n W_{Si}}{dK_{\Sigma i}^n} \cdot \frac{d^n W_{Si}}{dt_i^n} \Delta t_i^n \right]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i)) = P_{S0}(K_{\Sigma 0}(t_0)) - \\ - \left[ \Delta P_{S\text{ээкс.}}(\Delta K_{\Sigma uzm}) + \frac{dP_{Si}}{dK_{\Sigma i}} \cdot \frac{dP_{Si}}{dt_i} \Delta t_i + \right. \\ \left. + \frac{d^2 P_{Si}}{dK_{\Sigma i}^2} \cdot \frac{d^2 P_{Si}}{dt_i^2} \Delta t_i^2 + \dots + \frac{d^n P_{Si}}{dK_{\Sigma i}^n} \cdot \frac{d^n P_{Si}}{dt_i^n} \Delta t_i^n \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Если в уравнениях (5), (6), (7) производные высших порядков считать несущественно малыми величинами, которыми можно пренебречь, а исходные величины показателей  $K_{\Sigma 0}(t_0)$ ,  $W_{S0}(K_{\Sigma 0}, t_0)$ ,  $P_{S0}(K_{\Sigma 0}, t_0)$  – определенными (или заданными), то вышеупомянутые уравнения принимают следующий упрощенный вид:

$$\begin{cases} K_{\Sigma i}(t_i) = 1 \pm \left( \Delta K_{\Sigma uzm} + \frac{dK_{\Sigma i}}{dt_i} \Delta t_i \right); \\ W_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i)) = 1 - \\ - \left[ \Delta W_{S\text{ээкс.}}(\Delta K_{\Sigma uzm}) + \frac{dW_{Si}}{dK_{\Sigma i}} \cdot \frac{dW_{Si}}{dt_i} \Delta t_i \right]; \\ P_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i)) = 1 - \\ - \left[ \Delta P_{S\text{ээкс.}}(\Delta K_{\Sigma uzm}) + \frac{dP_{Si}}{dK_{\Sigma i}} \cdot \frac{dP_{Si}}{dt_i} \Delta t_i \right]. \end{cases} \quad (8)$$

В этой системе уравнений (8) производные показателей диагноза, качества ТС и НФ оценивают динамику изменения текущего ТС авиадвигателя по времени его наработки СНЭ (или после последнего ремонта).

## Заключение

Итак, систему дифференциальных уравнений (8) можно считать математической моделью (ММ) оценки динамики ТС ГТД в многомерном пространстве (времени наработки ( $t_i$ ) – технического диагноза ( $K_{\Sigma i}$ ) – качества ТС ( $W_{Si}$ ) – надежности функционирования ( $P_{Si}$ )) любого отдельного экземпляра авиадвигателя, который диагностируется в процессе регулярной эксплуатации.

Графическая интерпретация предложенной ММ (8) представлена на рис. 1.

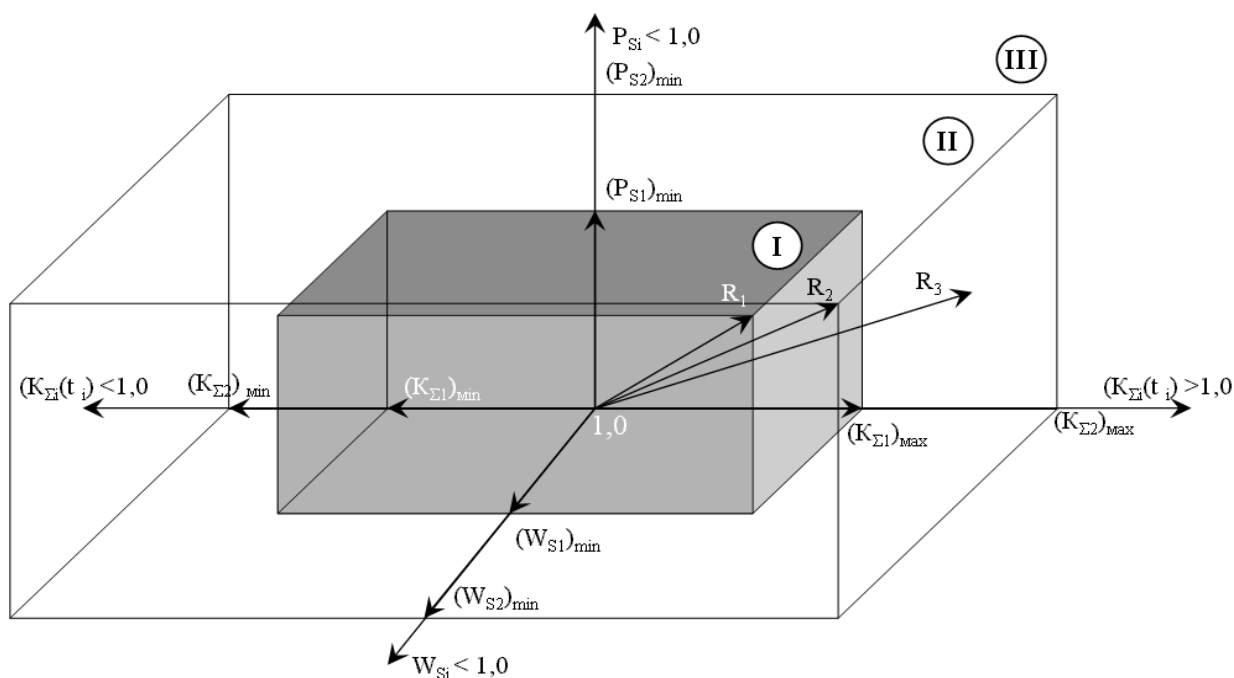


Рис. 1. Схема математической модели динамической системы диагностирования ГТД „диагноз – качество – надежность”:  
I, II, III – характерные эксплуатационные диапазоны изменения показателей качества ТС и надежности функционирования в зависимости от диапазона изменения текущего показателя диагноза по времени наработки двигателя;  
 $\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3$  – суммарные векторы текущих показателей диапазона, качества ТС и надежности функционирования в характерных диапазонах их изменения

В дальнейшем эта модель будет использована как базовая для обоснования принципиально новой концепции динамической системы текущего контроля и диагностирования авиационных ГТД типа „диагноз – качество – надежность”.

## Литература

1. Барзилович Э.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 231 с.
2. ДСТУ ISO 9001-2001. Системи управління якістю. Основні положення та словник. – К.: Держстандарт України, 2001. – 27 с.
3. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки, терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с.
4. Герасимов Б.М., Дивизинюк М.М., Сущач І.Ю. Системи підтримки прийняття рішень: проектування, застосування, оцінка ефективності.

– Севастополь: Государственный океанариум, 2004 – 320 с.

5. Безопасность авиации / В.П. Бабака, В.П. Харченко, В.О. Максимов и др.; Под ред. В.П. Бабака. – К.: Техника, 2004. – 584 с.
6. Игнатов А.А., Тараненко А.Г. Авиационные системы диагностирования. – К.: КИИГА, 1991. – 104 с.
7. Дмитриев С.А., Чоха Ю.Н. Применение комплексного контрольно-расчетного метода диагностирования конструктивных узлов типовых ТРДД для динамических ЭСД // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 1. – С. 27-29.

Поступила в редакцию 28.01.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Игнатов, Национальный авиационный университет, Киев.