

Чоха Ю. Н., канд. техн. наук,
Чумак О. И.,
Федорчук А. П.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ РЕАЛИЗАЦИИ НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ СИСТЕМЫ ТЕКУЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ ГТД В СРЕДЕ ДИНАМИЧНОЙ ЭСД

Аэрокосмический институт Национального авиационного университета

Предлагается принципиально новый подход к процессу диагностики современных авиационных ГТД с использованием комплексных диагностических показателей качества технического состояния, надежности функционирования двигателя и возможности его реализации в среде автоматизированной (экспертной) системы диагностирования.

Вступление

К числу приоритетных научно-технических проблем, которые возникают в процессе проектирования, производства и использования по назначению технических объектов и сложных динамических систем, относятся проблемы поиска методов и разработки оптимальных технологий управления качеством технического состояния (ТС) и надежностью функционирования (НФ) этих объектов (систем) [1].

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 практических применениях наукоемких технологий ресурсосбережения [2].

Особой актуальности проблема управления качеством ТС и НФ в процессе эксплуатации приобрела для таких функционально важных сложных динамических объектов как современные ГТД, в которых деградационные процессы, повреждения и отказы функциональных составляющих создают опасные предпосылки к возникновению летных происшествий, в значительной мере влияют на безопасность, регулярность и эффективность полетов воздушных судов [3].

Переведение авиационных ГТД на новые более прогрессивные формы и технологии эксплуатации нуждается в реше-

нии ряда задач, связанных с текущей оценкой и прогнозированием ТС отдельных экземпляров двигателей, которые диагностируются. Рядом с задачами технической диагностики авиадвигателей (по критериям изменения газодинамических параметров, уровня вибрации, кинетики накопления закоксованности топливных форсунок, продуктов износа пар трения в смазочном масле и т.д.) большое значение приобретают задачи, связанные с оценкой изменения качества ТС и НФ конструктивных узлов (элементов) ГТД в условиях регулярной эксплуатации.

Учитывая тот безоговорочный факт, что качество ТС и НФ конструктивных узлов современных ГТД взаимно коррелированы, их можно считать критериально определяющими характеристиками при контроле и диагностировании авиадвигателей в процессе эксплуатации. Тем не менее, если решение прямой задачи диагностики ГТД относительно оценки изменения их качества и надежности функционирования связано со значительной трудностью, то возможен более простой и эффективный подход – решение обратной задачи диагностики, то есть по определенным изменениям диагностических параметров ГТД контролировать и оценивать изменение качества ТС и НФ ГТД в целом и конструктивных узлов (элементов) в частности сравнительно с зафиксированным ТС в начале эксплуатации (или после последнего ремонта).

Под качеством технического состояния ГТД, в соответствии с действующими стандартами качества, понимают совокупность свойств ГТД, которые обуславливают его пригодность к использованию по назначению. Оценка качества ТС ГТД осуществляется по комплексному диагностическому показателю качества ТС (W_S), представляющему собой обобщенную количественную характеристику свойств двигателя, которые входят в состав его качества ТС и рассматриваются применительно к определенным условиям жизненного цикла (проектирование, производство или эксплуатация).

Под надежностью функционирования ГТД, в соответствии с действующими стандартами, понимают способность двигателя использовать заданные функции (а именно, создание заданной величины тяги при заданной величине расхода топлива) при сохранении за время наработки значений эксплуатационных показателей в заданных границах, которые отвечают заданным режимам и условиям эксплуатации. Оценка надежности функционирования ГТД осуществляется по комплексному диагностическому показателю надежности функционирования (P_S), представляющему собой обобщенную количественную характеристику того, что в пределах заданного времени наработки двигателя он не утратит работоспособности.

Исходя из таких соображений предлагается концепция принципиально новой динамичной системы текущего контроля и диагностирования авиационных ГТД типа «диагноз – качество – надежность».

Базовая многомерная динамическая математическая модель системы контроля и диагностирования ГТД

За базовую математическую модель (ММ) принята система нелинейных дифференциальных уравнений [4], которые в общем виде описывают и оценивают динамику изменения ТС ГТД в процессе эксплуатации в многомерном критериаль-

ном пространстве «время – диагноз – качество – надежность»:

$$\begin{cases} K_{\Sigma_i}(t_i) = K_{\Sigma_0}(t_0) \pm (\Delta K_{\Sigma_{изм}} + \frac{dK_{\Sigma_i}}{dt_i} \Delta t_i), \\ W_{S_i}(K_{\Sigma_i}(t_i)) = W_{S_0}(K_{\Sigma_0}(t_0)) - \frac{dW_{S_i}}{dK_{\Sigma_i}} \cdot \frac{dW_{S_i}}{dt_i} \Delta t_i, \\ P_{S_i}(K_{\Sigma_i}(t_i)) = P_{S_0}(K_{\Sigma_0}(t_0)) - \frac{dP_{S_i}}{dK_{\Sigma_i}} \cdot \frac{dP_{S_i}}{dt_i} \Delta t_i, \end{cases} \quad (1)$$

где $K_{\Sigma_i}(t_i)$, $W_{S_i}(K_{\Sigma_i}(t_i))$, $P_{S_i}(K_{\Sigma_i}(t_i))$ – текущие комплексные диагностические показатели (КДП) соответственно технического диагноза, качества ТС, надежности функционирования ГТД, которые характеризуют текущее ТС авиадвигателя в любой момент (t_i) его диагностирования в условиях регулярной эксплуатации;

$K_{\Sigma_0}(t_0)$, $W_{S_0}(K_{\Sigma_0}(t_0))$, $P_{S_0}(K_{\Sigma_0}(t_0))$ – начальные КДП соответственно технического диагноза, качества ТС, НФ ГТД, которые имеет априорно исправный двигатель в начале (t_0) эксплуатации (или после последнего ремонта); $\Delta K_{\Sigma_{изм}}$ – допуск на величину систематической погрешности измерений штатной системы контроля параметров типового ГТД; $\Delta t_i = t_i - t_0$ – абсолютное значение текущей наработки ГТД.

Производные КДП в уравнениях системы (1) характеризуют динамику их изменения по времени наработки ГТД.

Определение технического диагноза ГТД осуществляется по алгоритмами комплексного контрольно-расчетного метода диагностирования и комбинированного функционально-тестового метода идентификации неисправностей [5, 6] по значениям КДП двигателя в целом (K_{Σ}) или его конструктивных узлов (K_i). При этом текущие значения КДП $K_{\Sigma_i}(t_i)$ могут изменяться в двух направлениях от начального $K_{\Sigma_0}(t_0)$ по соотношению:

$$K_{\Sigma_i}(t_i) = K_{\Sigma_0}(t_0) \pm \Delta K_{\Sigma_i}(\Delta t_i), \quad (2)$$

где $K_{\Sigma_0}(t_0) = 1,0$; $\Delta K_{\Sigma_i}(\Delta t_i) = \Delta K_{\Sigma_{изм}} + \frac{dK_{\Sigma_i}}{dt_i} \cdot \Delta t_i$ – абсолютное приращение значения КДП в момент диагностирования ГТД, которое характеризует место возникновения неисправности среди уз-

лов «холодной» ($-\Delta K_{\Sigma i}(\Delta t_i)$) или «горячей» ($+\Delta K_{\Sigma i}(\Delta t_i)$) частей ГТД.

В то же время КДП качества ТС $W_{Si}(t_i)$ и надежности функционирования $P_{Si}(t_i)$ могут изменяться только однонаправленно в направлении уменьшения от их начальных значений $W_{S0}(t_0)$ и $P_{S0}(t_0)$ по соотношениям:

$$W_{Si}(t_i) = W_{S0}(K_{\Sigma 0}(t_0)) - \Delta W_{Si}(\Delta K_{\Sigma i}(\Delta t_i)) \quad (3)$$

$$P_{Si}(t_i) = P_{S0}(K_{\Sigma 0}(t_0)) - \Delta P_{Si}(\Delta K_{\Sigma i}(\Delta t_i)), \quad (4)$$

где $W_{S0}(K_{\Sigma 0}(t_0)) = 1,0 - \Delta W_{S_{\text{эксп}}}(\Delta K_{\Sigma \text{изм}})$, $P_{S0}(K_{\Sigma 0}(t_0)) = 1,0 - \Delta P_{S_{\text{эксп}}}(\Delta K_{\Sigma \text{изм}})$ – начальные значения КДП соответственно качества ТС и НФ ГТД в момент начала эксплуатации (или после последнего ремонта); $\Delta W_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i))$, $\Delta P_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i))$ – абсолютные значения величины изменения КДП качества ТС и НФ ГТД в момент проведения его диагностирования.

Итак, показатели качества ТС и НФ являются монотонно убывающими функциями КДП ГТД (K_{Σ}) и времени наработки двигателя (Δt_i) с начала эксплуатации (или после последнего ремонта) на момент проведения диагностирования, то есть величины КДП качества ТС и НФ всегда меньше единицы. Графическая интерпретация рассмотренной ММ представлена на рис. 1.

Методика определения текущего ТС ГТД по значениям комплексных диагностических показателей

В соответствии с рис. 1 отметим характерные эксплуатационные диапазоны возможных значений КДП ГТД $\{K_{\Sigma i}(t_i)\}$, $\{W_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i))\}$, $\{P_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i))\}$, которые оценивают и характеризуют текущее ТС двигателя в процессе его регулярной эксплуатации.

Так при значениях $K_{\Sigma i}(t_i)$ в пределах 1-го уровня:

$$(1,0 - \Delta K_{\Sigma \text{изм}}) \leq K_{\Sigma i}(t_i) \leq (1,0 + \Delta K_{\Sigma \text{изм}}), \quad (5)$$

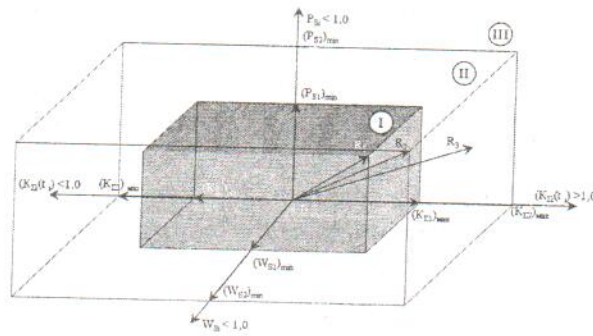


Рис. 1. Графическое представление ММ системы текущего контроля и диагностирования ГТД „диагноз – качество – надежность”: I, II, III – характерные эксплуатационные диапазоны изменения показателей качества ТС и надежности функционирования в зависимости от диапазона изменения показателя диагноза по времени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

которые характеризуют «исправное» ТС ГТД, значение величины показателя качества ТС $W_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i))$ находится в пределах диапазона 1-го уровня:

$$(1,0 - \Delta W_{S_{\text{эксп}}}(\Delta K_{\Sigma \text{изм}})) \leq W_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i)) \leq 1,0, \quad (6)$$

которые характеризуют «хорошую» степень качества ТС ГТД, а величина показателя надежности функционирования $P_{Si}(t_i)$ также находится в пределах диапазона 1-го уровня

$$(1,0 - \Delta P_{S_{\text{эксп}}}(\Delta K_{\Sigma \text{изм}})) \leq P_{Si}(K_{\Sigma i}(t_i)) \leq 1,0, \quad (7)$$

которые характеризуют надежность функционирования ГТД в пределах «заданного» («докритического») уровня.

При таких показателях диагноза, качества ТС и надежности функционирования ГТД может эксплуатироваться на всех определенных нормативной документацией штатных режимах без проведения профилактических мероприятий, предусмотренных регламентом ТО.

Если текущие значения КДП находятся в пределах 2-го диапазона

$$\begin{cases} (1,0 + \Delta K_{\Sigma_{изм}}) < K_{\Sigma 2}(t_i) \leq \\ \leq (1,0 + \Delta K_{\Sigma_{изм}} + [\Delta K_{\Sigma}]_{доп}); \\ (1,0 - \Delta K_{\Sigma_{изм}} - [\Delta K_{\Sigma}]_{доп}) \leq \\ \leq K_{\Sigma 2}(t_i) < (1,0 - \Delta K_{\Sigma_{изм}}), \end{cases} \quad (8)$$

где $[\Delta K_{\Sigma}]_{доп}$ – предельный допуск на отклонение диагностических параметров от ТУ, то это характеризует «неисправное», но «работоспособное» ТС ГТД, то есть это предотказное состояние двигателя, при котором значение показателя качества ТС находится в пределах диапазона 2-го уровня:

$$(1,0 - \Delta W_{Сэкср}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}) - W_{Sдоп}([\Delta K_{\Sigma}]_{доп})) \leq (9) \\ \leq W_{S2}(K_{\Sigma 2}(t_i)) \leq (1,0 - \Delta W_{Сэкср}(\Delta K_{\Sigma_{изм}})),$$

где $\Delta W_{Sдоп}([\Delta K_{\Sigma}]_{доп})$ – предельный эксплуатационный допуск на качество ТС ГТД, то есть степень качества ТС считается «удовлетворительной», а значение показателя надежности функционирования находится в пределах диапазона 2-го уровня:

$$(1,0 - \Delta P_{Сэкср}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}) - P_{Sдоп}([\Delta K_{\Sigma}]_{доп})) \leq (10) \\ \leq P_{S2}(K_{\Sigma 2}(t_i)) \leq (1,0 - \Delta P_{Сэкср}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}))$$

где $\Delta P_{Sдоп}([\Delta K_{\Sigma}]_{доп})$ – предельный эксплуатационный допуск на надежность функционирования ГТД, то есть надежность функционирования находится в пределах «допустимого» («критического») уровня.

При таких показателях диагноза, качества ТС и НФ ГТД может эксплуатироваться с определенными ограничениями или особым контролем с прогнозированием динамики ухудшения ТС.

В случае, если текущие значения КДП $K_{\Sigma i}(t_i)$ приобретают величины 3-го диапазона

$$\begin{cases} K_{\Sigma 3}(t_i) > (1,0 + \Delta K_{\Sigma_{изм}} + [\Delta K_{\Sigma}]_{доп}); \\ K_{\Sigma 3}(t_i) < (1,0 - \Delta K_{\Sigma_{изм}} - [\Delta K_{\Sigma}]_{доп}), \end{cases} \quad (11)$$

это означает, что ТС ГТД «неработоспособное», которому отвечают значения показателя качества ТС $W_{Si}(t_i)$ диапазона 3-го уровня:

$$W_{S3}(t_i) < (1,0 - \Delta W_{Сэкср}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}) - \Delta W_{Sдоп}([\Delta K_{\Sigma}]_{доп})), \quad (12)$$

что характеризует текущее качество ТС ГТД как «неудовлетворительное», а значения показателя НФ ГТД $P_{Si}(t_i)$ также достигают диапазона 3-го уровня:

$$P_{S3}(t_i) < (1,0 - \Delta P_{Сэкср}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}) - \Delta P_{Sдоп}([\Delta K_{\Sigma}]_{доп})), \quad (13)$$

а это означает, что надежность функционирования ГТД находится на «недопустимом» («закритическом») уровне.

При таких показателях диагноза, качества ТС и НФ дальнейшая эксплуатация данного экземпляра ГТД должна быть прекращена для выполнения специальных профилактико-восстановительных или ремонтных работ, которые позволяют повысить значения диагностических показателей до пределов диапазона 2-го или 1-го уровня.

Графическая интерпретация предложенной методики определения текущих показателей качества ТС и надежности функционирования ГТД представлена на рис. 2, 3.

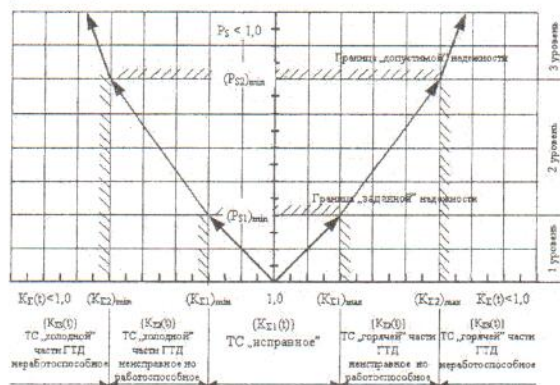


Рис. 2. Графическое определение степеней и диапазонов величин показателя качества технического состояния ГТД (W_S) по диапазонам величин комплексного диагностического показателя ($K_{\Sigma}(t)$) диагностируемого двигателя

Обобщенные данные по ранжированию эксплуатационных диапазонов изменения комплексных диагностических показателей в соответствии с разработанной концепцией системы текущего контроля и диагностирования ГТД типа «диагноз – качество – надежность» представлены в табл. 1.

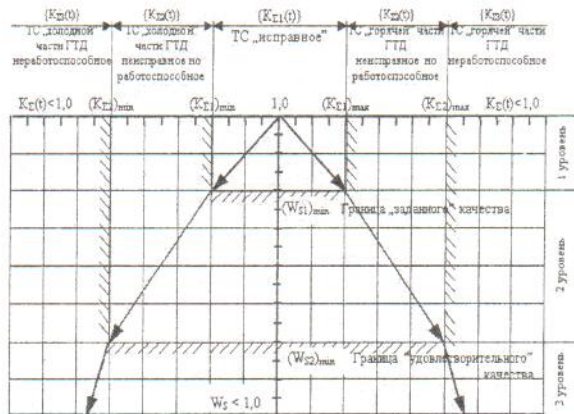


Рис. 3. Графическое определение уровней и диапазонов величин показателя надежности функционирования ГТД (P_S) по диапазонам величин комплексного диагностического показателя ($K_{\Sigma}(t)$) диагностируемого двигателя.

Таблица 1

Ранжирование и характеристика эксплуатационных диапазонов изменения КДП технического диагноза качества ТС и надежности функционирования проточной части ГТД в системе диагностирования «диагноз – качество – надежность»

Ранги диапазонов диагностирования	Диапазон значений показателей			Характеристика ТС по диапазону диагностирования
	технического диагноза ($K_{\Sigma i}$)	качества технического состояния (W_{Si})	надежности функционирования (P_{Si})	
1. Докритический	$(1,0 - \Delta K_{\Sigma_{изм}}) \leq K_{\Sigma 1}(t_i) \leq (1,0 + \Delta K_{\Sigma_{изм}})$ «ИСПРАВНЫЙ»	$(1,0 - \Delta W_{S_{эксп}}(\Delta K_{\Sigma_{изм}})) \leq W_{S1}(K_{\Sigma 1}(t_i)) \leq 1,0$ «ХОРОШИЙ»	$(1,0 - \Delta P_{S_{эксп}}(\Delta K_{\Sigma_{изм}})) \leq P_{S1}(K_{\Sigma 1}(t_i)) \leq 1,0$ «ЗАДАННЫЙ»	ТС ГТД исправное, хорошей степени качества и заданного уровня НФ
2. Критический	$(1,0 + \Delta K_{\Sigma_{изм}}) < K_{\Sigma 2}(t_i) \leq (1,0 + \Delta K_{\Sigma_{изм}} + [\Delta K_{\Sigma}]_{дон})$ $(1,0 - \Delta K_{\Sigma_{изм}} - [\Delta K_{\Sigma}]_{дон}) \leq K_{\Sigma 2}(t_i) < (1,0 - \Delta K_{\Sigma_{изм}})$ «неисправный, но работоспособный»	$(1,0 - \Delta W_{S_{эксп}}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}) - W_{S_{дон}}([\Delta K_{\Sigma}]_{дон})) \leq W_{S2}(K_{\Sigma 2}(t_i)) \leq (1,0 - \Delta W_{S_{эксп}}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}))$ «удовлетворительный»	$(1,0 - \Delta P_{S_{эксп}}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}) - P_{S_{дон}}([\Delta K_{\Sigma}]_{дон})) \leq P_{S2}(K_{\Sigma 2}(t_i)) \leq (1,0 - \Delta P_{S_{эксп}}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}))$ «допустимый»	ТС ГТД работоспособное, удовлетворительной степени качества и допустимого уровня НФ
3. Закрытый	$K_{\Sigma 3}(t_i) > (1,0 + \Delta K_{\Sigma_{изм}} + [\Delta K_{\Sigma}]_{дон});$ $K_{\Sigma 3}(t_i) < (1,0 - \Delta K_{\Sigma_{изм}} - [\Delta K_{\Sigma}]_{дон})$ «неработоспособный»	$W_{S3}(t_i) < (1,0 - \Delta W_{S_{эксп}}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}) - \Delta W_{S_{дон}}([\Delta K_{\Sigma}]_{дон}))$ «неудовлетворительный»	$P_{S3}(t_i) < (1,0 - \Delta P_{S_{эксп}}(\Delta K_{\Sigma_{изм}}) - \Delta P_{S_{дон}}([\Delta K_{\Sigma}]_{дон}))$ «недопустимый»	ТС ГТД неработоспособное, не удовлетворительного качества и недопустимого уровня НФ

Выводы

Основной особенностью указанной системы диагностирования является объединение определенного по ККР методу текущего диагноза ГТД как объекта в целом, так и на уровне конструктивных узлов (элементов) с новыми критериями – качества технического состояния и надежности функционирования двигателя (узла, элемента), что позволяет расширить пространственную оценку технического состояния ГТД с двухмерной («время наработки – диагноз») до четырехмерной («время наработки – диагноз – качество ТС – надежность функционирования»). Такой подход дает возможность значительно глубже оценивать текущее ТС ГТД как с технологической точки зрения (по степени качества ТС), так и с точки зрения безопасности эксплуатации (по уровню надежности функционирования).

Предложенное ранжирование возможных эксплуатационных значений комплексного диагностического показателя ($K_{\Sigma}(t)$) позволяет определить характерные степени, уровни и диапазоны изменения показателей качества ТС и надежности функционирования ГТД, которое, в свою очередь, дает возможность представлять пространственную характеристику текущего ТС конкретного экземпляра диагностируемого двигателя (табл. 1).

Разработанная математическая модель системы диагностирования «диагноз – качество – надежность» и алгоритмы определения его текущих показателей позволяют довольно просто адаптировать

их в автоматизированные и экспертные системы диагностирования ГТД. Концепцию системы текущего контроля и диагностирования «диагноз – качество – надежность» можно считать базовой для разработки новой стратегии эксплуатации авиатехники, в частности ГТД, по техническому состоянию с контролем уровня летной годности.

Список литературы

1. Барзилович Э. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая математика, 1982. – 231 с.
2. Дубровин В. И., Субботин С. А., Богуслаев А. В. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей. – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2003. – 279 с.
3. Безпека авіації / В. П. Бабак, В. П. Харченко, В. О. Максимов и др.; За ред. В. П. Бабака. – К.: Техніка, 2004. – 584 с.
4. Чоха Ю. М. Математична модель динамічної системи діагностики ГТД „діагноз – якість – надійність” / Вісник НАУ. – К.: НАУ, 2006. – №1. – С. 76-79.
5. Дмитриев С. О., Чоха Ю. М. Застосування комплексного контрольно-розрахункового методу діагностування конструктивних вузлів типових ТРДД для динамічних ЕСД // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 1. – С. 27-29.
6. Дмитриев С. А., Чоха Ю. Н. Методика применения функционально-тестового метода идентификации неисправностей ТРДД в среде динамической ЕСД. // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 2. – С. 173-176.