

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gishvarov A., Kondratieva N. Technical and economic assessment of aircraft engines fatigue testing on base of simulation modeling // AIAA Paper 2001-3817. July 2001.
2. Гишваров А. С. Оптимизация ускоренных испытаний на надежность и ресурс авиационных двигателей и агрегатов // Вестник УГАТУ. 2001. № 1. С. 77–90.
3. Гишваров А. С., Кондратьева Н. В., Жернаков В. С. Оптимизация ресурсных испытаний силовой установки с применением имитационного моделирования жизненного цикла // Технологические проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. тр. Уфа: Гилем, 2001. С. 136–147.

ОБ АВТОРЕ



Кондратьева Наталья Владимировна, аспирантка каф. авиационных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 1998). Готовит диссертацию в области испытаний, надежности и эффективности технических систем.

УДК 629.7.036

И. В. ПРИБ

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматриваются проблемы параметрической диагностики технического состояния двигателей летательных аппаратов с применением математических моделей рабочих процессов. Основное внимание уделено повышению достоверности оценки состояния в условиях неопределенности, возникающей вследствие ограниченности исходной информации. Приведены результаты сравнительного анализа эффективности существующих методов диагностики. *Диагностика технического состояния; математическая модель рабочих процессов; идентификация; оптимизация; неустановившиеся режимы работы*

Оценка технического состояния (ТС) двигателей в условиях эксплуатации проводится, как правило, по ограниченному объему информации, обусловленному малым количеством штатных контролируемых параметров. Это существенно ограничивает эффективность параметрических методов диагностики, основанных на идентификации термогазодинамических моделей двигателей [1]. Поэтому актуальным является проведение исследований по повышению эффективности данных методов диагностики.

В настоящее время известны несколько методов [1, 2], условно разделенных на методы А, Б, В, Г и Д.

1. Метод диагностических матриц (метод А), в котором матрицы отражают связь параметров состояния двигателя (КПД компрессора и турбины, площади характерных проходных сечений, коэффициенты потерь давления и т. п.) с признаками состояния (расход топлива, температура газов и т. д.) [4]:

$$[C] = [A]^{-1} \cdot [B],$$

где $[C]$ — диагностическая матрица; $[A]$ — матрица коэффициентов влияния параметров на признаки состояния, оцениваемых по математической модели двигателя; $[B]$ — матрица коэффициентов признаков состояния.

Оценка состояния двигателя в виде отклонений параметров δx_i от бездефектных значений проводится по формуле

$$\delta x_i = \sum_{j=1}^m c_{ij} \delta b_j; \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где δb_j — отклонение j -го контролируемого параметра; c_{ij} — коэффициент диагностической матрицы.

2. Идентификация состояния решением системы нормальных уравнений (метод Б). Оценка состояния двигателя проводится идентификацией его математической модели по целевой функции [1]

$$\Phi = \min \sum_{j=1}^m B_j \frac{1}{p_j^3(X)} [p_j^p(X) - p_j^3(X)]^2, \quad (2)$$

где B_j — коэффициент, учитывающий точность контроля P_j ($B_j = T/\sigma$; T — константа; σ — среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра p_j^p); p_j^p — значение j -го параметра, рассчитанное по модели; p_j^3 — значение j -го контролируемого параметра; $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ — вектор параметров состояния; m — число контролируемых параметров.

Идентификация проводится решением системы n нормальных уравнений

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{j=1}^m \frac{[p_j^p(\mathbf{X}) - p_j^3(\mathbf{X})]^2}{p_j^3(\mathbf{X})} = 0.$$

3. Идентификация состояния нелинейной оптимизацией критерия, характеризующего техническое состояние двигателя (метод В). В данном методе экстремум функционала определяется методом нелинейной оптимизации в области параметров состояния, задаваемой системой двусторонних ограничений:

$$\min x_i \leq x_i \leq \max x_i; \quad i = \overline{1, n},$$

где $\min x_i$, $\max x_i$ — соответственно нижняя и верхняя границы параметров состояния.

4. Идентификация модели методом уравнивания. Оценка проводится с учетом детерминированной связи между контролируемыми параметрами, задаваемой в виде уравнений рабочих процессов. Известны два способа реализации метода Г и Д.

Метод Г основан на применении квадратичной целевой функции (УМНК) [2]

$$\Phi = \min \left\{ \sum_{j=1}^m \gamma_j \frac{1}{p_j^3} (\hat{p}_j^p(\hat{\mathbf{X}}) - p_j^3(\mathbf{X}))^2 + \sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{1}{x_i^0} (\hat{x}_i - x_i^0)^2 \right\}; \quad (3)$$

$$\hat{p}_j^p(\hat{\mathbf{X}}) + \Delta_{jp} = p_j^3(\mathbf{X}) + \Delta_{jз},$$

где $\hat{p}_j^p(\hat{\mathbf{X}})$ — оценка j -го параметра рассчитанная по модели; $p_j^3(\mathbf{X})$ — значение j -го контролируемого параметра; $\hat{\mathbf{X}}$ — оценка вектора параметров состояния; \hat{x}_i — оценка i -го параметра состояния; x_i^0 — исходное значение i -го параметра состояния; γ_j, γ_i — соответственно статистические веса величин p_j^3 и x_i ; $\Delta_{jp}, \Delta_{jз}$ — соответственно суммарные ошибки определения $\hat{p}_j^p(\hat{\mathbf{X}})$ и $p_j^3(\mathbf{X})$.

Метод Д основан на применении модульной целевой функции (УМНМ):

$$\Phi = \min \left\{ \sum_{j=1}^m \gamma_j \frac{1}{p_j^3(\mathbf{X})} |\hat{p}_j^p(\hat{\mathbf{X}}) - p_j^3(\mathbf{X})| + \sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{1}{x_i^0} |\hat{x}_i - x_i^0| \right\}. \quad (4)$$

Сравнение эффективности методов А, Б, ..., Д проводилось на примере вспомогательного газотурбинного двигателя ТА-6А моделированием 48 дефектов, включая различные комбинации параметров состояния и уровни развития дефектов.

Достоверность диагноза оценивалась критерием δ , характеризующим «невязку» между фактическими и идентифицированными значениями параметров состояния двигателя:

$$\delta_i = \left[\frac{x_i^H - x_i^0}{x_i^0} \right] \times 100\%; \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где x_i^H — оценка, а x_i^0 — фактическое значение i -го параметра состояния.

При $\delta_i \leq 0,2\%$ оценка состояния принималась как удовлетворительная. Значение $\delta_i = 0,2\%$ обусловлено погрешностью модели, а также используемого способа реализации целевой функции. Полученные при проведении исследования ошибочные оценки состояния двигателя, соответствующие значениям критерия $\delta_i > 0,2\%$, являются следствием имеющейся неопределенности.

В качестве контролируемых были приняты следующие параметры: расход топлива G_T , температура газа за турбиной T_T^* и температура воздуха за компрессором T_K^* , а параметрами состояния являлись: коэффициент восстановления полного давления во входном устройстве $\sigma_{вх}$, КПД компрессора η_K^* , коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания $\sigma_{к/с}$, КПД турбины η_T^* , коэффициент изменения массового расхода в сопле μ_c .

Устойчивость оценки состояния, характеризующая обусловленность системы нормальных уравнений, оценивалась числом Тьюринга [1]

$$N_T = \frac{1}{n} N(A) N(A)^{-1}, \quad (6)$$

где n — порядок, а $N(A)$ — норма матрицы A :

$$N(A) = \sqrt{\sum_i^n \sum_j^m a_{ij}^2}.$$

Исследование показало, что [4]:

— наиболее эффективным по достоверности оценки состояния является метод идентификации, основанный на нелинейной оптимизации критерия оценки технического состояния (табл.). Данный метод, в отличие от методов А, Б, Г и Д, позволяет получать однозначное решение даже при критических значениях числа Тьюринга;

— низкая эффективность методов уравнивания обусловлена видом используемой целевой функции, минимизирующей «невязку», в первую очередь, по параметрам с большими значениями коэффициентов влияния. Это исключает возможность достоверной оценки состояния при парных и более дефектах, а также дефектах, при которых влияние параметров состояния на контролируемые параметры незначимо. Метод Д более эффективен по сравнению с методом Г. Установлено, что эффективность методов уравнивания снижается по мере развития дефекта (рис. 1);

— эффективность метода диагностических матриц и метода идентификации, основанного на решении системы нормальных уравнений, резко снижается при критических значениях N_T (рис. 2).

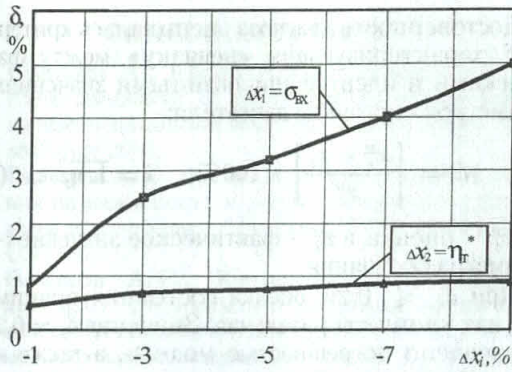


Рис. 1. Зависимость эффективности метода уравнивания (УМНМ) от вида и уровня развития дефекта

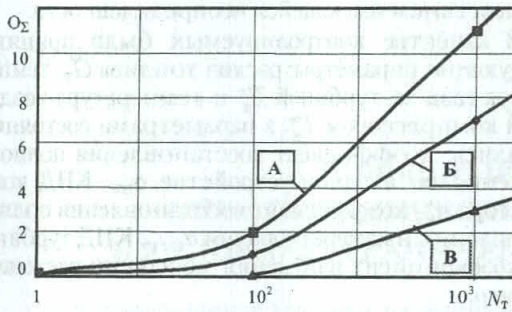


Рис. 2. Зависимость эффективности методов оценки состояния А, Б и В от числа Тьюринга

Таблица

Эффективность методов оценки технического состояния двигателя

Метод	Число идентифицируемых параметров состояния						ΠΣ	OΣ	Э
	1		2		3				
	Π	O	Π	O	Π	O			
А	15	0	19	11	1	2	35	13	3
Б	15	0	23	7	2	1	40	8	2
В	15	0	27	3	3	0	45	3	1
Г	0	15	0	30	0	3	0	48	5
Д	8	7	6	23	1	2	15	32	4

Примечание: Π_i, O_i (i = 1, 3) – число правильных и ошибочных оценок ТС; ΠΣ = Σ₁³ Π_i; OΣ = Σ₁³ O_i; Э – балльная оценка эффективности метода (Э = 1 – эффективность наивысшая, Э = 5 – эффективность наименьшая)

Повышение достоверности оценки технического состояния двигателей в условиях неопределенности возможно за счет увеличения количества контролируемых при эксплуатации (испытаниях) параметров и, в частности, данных по переходным режимам работы двигателя.

Идентификация математической модели переходных режимов работы двигателя позволяет разрешить имеющуюся на стационарных режимах неопределенность также за счет изменения значений коэффициентов влияния идентифицируемых параметров на контролируемые, а следовательно, изменения обусловленности матрицы системы нормальных уравнений.

В общем виде целевая функция, используемая для идентификации состояния объекта в переходном режиме, имеет вид [5]

$$\Phi = \text{ext} \int_{z_{A1}}^{z_{Ap}} \int_{z_{B1}}^{z_{Bk}} \dots \int_{z_{Z1}}^{z_{Zf}} f(Z_1) \dots f(Z_n) \times dz_{A1} \dots dz_{Ap} \dots dz_{Z1} \dots dz_{Zf}; \quad (7)$$

$$Z_1 = [z_{A1}, z_{A2}, \dots, z_{Ap}]^T;$$

$$Z_2 = [z_{B1}, z_{B2}, \dots, z_{Bk}]^T;$$

$$Z_n = [z_{C1}, z_{C2}, \dots, z_{Cf}]^T;$$

где z_A, z_B, z_C – компоненты векторов Z_i (i = 1, n), характеризующих состояние изделия в переходных режимах работы.

Применительно к авиационным газотурбинным двигателям функционал (7) может быть конкретизирован в виде [5]:

$$\Phi = \min \left\{ \alpha \sum_{j=1}^m B_j \left[\int_0^{\tau_1} P_j^k(\tau) \right]^{-1} \times \left[\int_0^{\tau_1} P_j^k(\tau) - \int_0^{\tau_2} P_j^p(\tau) \right]^2 + \beta \sum_{i=1}^k B_i \frac{1}{Z_i^k} (Z_i^k - Z_i^p)^2 + \gamma \sum_{j=1}^m B_j \left[\frac{\partial^2 P_j^k}{\partial \tau^2} \right]^{-1} \left[\frac{\partial^2 P_j^k}{\partial \tau^2} - \frac{\partial^2 P_j^p}{\partial \tau^2} \right]^2 + \dots \right\}, \quad (8)$$

где α, β, γ – коэффициенты, характеризующие значимость составляющих функционала (8); τ₁, τ₂ – длительность фактического и моделируемого переходного процесса; Z_i – i-й диагностический признак; ∂²P_j/∂τ² – ускорение изменения P_j-го параметра в переходном процессе. В качестве диагностических признаков в переходных процессах могут быть приняты: заброс параметра, длительность переходного процесса и т. д.

Исследования, проведенные на математической модели одновального ГТД на примере дефектов компрессора и турбины, показали, что применение такого диагностического параметра, как «время приемистости по частоте вращения ротора», позволяет полностью снять неопределенность в оценке состояния компрессора и турбины, возникающую при диагностике состояния на стационарном режиме работы двигателя. Однозначность решения в данном случае достигается путем оценки состояния двигателя в переходном режиме работы двигателя, при котором коэффициенты влияния идентифицируемых параметров на время приемистости различаются по знаку. Поиск указанного переходного режима работы для каждого

конкретного двигателя осуществляется с применением математической модели путем реализации целевой функции вида

$$\Phi(n_o, \Delta G_T) = \max \{(\tau_o - \tau_{\eta_k}) + (\tau_{\eta_T} - \tau_o)\};$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \eta_k^*} > 0; \quad \frac{\partial \tau}{\partial \eta_T^*} < 0, \quad (9)$$

где τ_o — значение времени приемистости, соответствующее исправному состоянию; $\tau_{\eta_k}, \tau_{\eta_T}$ — соответственно значения времени приемистости при дефектах компрессора и турбины. Варьируемыми параметрами являются: начальное значение частоты вращения ротора двигателя n_o и количество подаваемого топлива ΔG_T . Результаты исследований показали, что информативность диагностического параметра τ максимальна при законе подачи топлива, близком к скачкообразному и являющемся только функцией времени, т. е. $G_T = f(t)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термодинамическим параметрам. М.: Машиностроение, 1983. 206 с.
2. Адгамов Р. И., Боровик В. О., Дмитриев С. В. и др. Обработка и анализ информации при автома-

тизированных испытаниях ГТД. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.

3. Черкасов Б. А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1988. 360 с.
4. Гишваров А. С., Приб И. В. Оценка технического состояния двигателей в условиях ограниченной информации по термодинамическим параметрам // Сб. науч. тр. ЦАГИ. М., 2001.
5. Гишваров А. С., Приб И. В. Оценка технического состояния энергетических установок по параметрам переходных процессов // Технологические проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. науч. тр. АН РБ. Уфа: Гилем, 2001. С. 162–163.

ОБ АВТОРЕ



Приб Игорь Викторович, аспирант каф. авиационных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 2001). Готовит диссертацию в области надежности и диагностики технических систем.

УДК 621.793

Н. А. СУХОВА

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТВЕРДЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕТАЛЛОГРАФИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Рассматривается разработка вакуумной ионно-плазменной технологии синтеза высокотвердых поверхностных слоев методом осаждения потоков углеродной плазмы, генерируемой вакуумно-дуговым источником с графито-кремниевым катодом. Фуллерены; алмазоподобные пленки; ионно-плазменные технологии

ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой машиностроения (в частности, авиационного) является повышение надежности и долговечности узлов и механизмов. Решение этой задачи тесно связано с созданием новых конструкционных материалов со специфическими физико-механическими свойствами, обеспечивающими повышение эксплуатационных характеристик изделий. Учитывая, что в большинстве случаев разрушение деталей начинается с поверхности, как, например, при трении, коррозионных процессах и др., одним из путей повышения срока службы изделий является модификация свойств поверхности уже существующих конструкционных материалов. Из множества методов упрочняющих технологий наибольшее распространение получили технологии вакуумно-плазменного физического (PVD) и химического (CVD) нанесения износостойких по-

крытий. Наибольшее внимание уделяется вакуумным ионно-плазменным технологиям, вследствие практически полной универсальности технологического процесса, высокой скорости нанесения покрытий, высокой воспроизводимости параметров на каждой операции и практически полного отсутствия экологических проблем, а также возможности получения поверхностных слоев со специальными физико-механическими свойствами.

1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТВЕРДЫХ ПОКРЫТИЙ

Уникальные свойства покрытий на основе углерода в различных модификациях от графитоподобных до алмазоподобных и алмазных представляют интерес в процессе решения задач современного машиностроения. Применение термина «алмазоподобные пленки» не связано с образованием монокристаллов алмаза, но отражает тот