

УДК 621.452.3:681.518.54

В.П. ГЕРАСИМЕНКО, С. КАЕМИАН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПОУЗЛОВОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГТД

Рассмотрены основные проблемы диагностирования газотурбинного двигателя при эксплуатации по техническому состоянию. Описаны главные причины ухудшения технического состояния проточной части компрессора и турбины. Установлено, что КПД является наиболее удобной характеристикой для оценивания технического состояния двигателя и его узлов. Предложено оценивать техническое состояние ГТД по относительному изменению КПД узлов. Этот критерий позволяет поузловое диагностирование. Представлены зависимости характеристик двигателя по статическим и полным параметрам.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, техническое состояние, диагностика, КПД.

Введение

Непрерывная тенденция увеличения параметров цикла авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и наземных газотурбинных установок (ГТУ) с целью повышения удельных параметров и экономичности сопровождается одновременным усложнением конструкции их узлов и систем охлаждения горячих деталей при росте нагрузок на ответственные несущие элементы. Естественно, что подобные изменения приводят к ужесточению требований по качеству эксплуатации. Вместе с тем эксплуатация по техническому состоянию (ТС) ГТД [1] является основной стратегией как прогрессивное направление снижения эксплуатационных расходов, в том числе за счёт более полного исчерпания ресурса. При этом такая стратегия не должна приводить к повышению риска создания аварийных ситуаций, что требует значительного увеличения количества контролируемых параметров, внедрения автоматизированных систем диагностирования неисправностей и создания средств прогнозирования возможных отказов [2].

1. Формулирование проблемы

Для оценки технического состояния ГТД в эксплуатации применяют различные диагностические признаки – критерии, значения которых разделяют на классы – уровни для принятия решения о возможностях дальнейшей эксплуатации двигателя. При поузловой классификации состояний ГТД число классов зависит от количества узлов. Учёт влияния неисправностей проводят по матрице состояний, число строк в которой равно количеству контролируемых параметров, а число столбцов – количеству возможных состояний двигателя [3]. Здесь

решающим критерием для оценки технического состояния используется величина среднего риска.

Выбор критериальных признаков и установление их пороговых значений при параметрическом диагностировании ГТД составляет одну из ключевых методических задач. Несмотря на существенные отличия условий эксплуатации двигателей в авиации в сравнении с наземными ГТУ общие подходы в оценивании их технического состояния могут совпадать ввиду одинакового характера изменений в проточной части, например, при её загрязнении или эрозионном износе деталей из-за наличия пыли в воздухе [4, 5]. В обоих случаях при наличии кварцевой пыли в воздухе происходит износ рабочих лопаток компрессора по передней кромке в периферийной части с эрозией концов лопаток, что приводит к увеличению радиального зазора в направлении задней кромки до трёхкратного значения [4], и как следствие – к линейному снижению КПД компрессора и сужению диапазона устойчивой работы двигателя. При наличии лессовой пыли происходит её спекание на горячих деталях при температуре более 900°С. Это приводит к загромождению межлопаточных каналов особенно первого соплового аппарата турбины и к изменению режима работы двигателя. В охлаждаемых лопатках турбин происходит засорение каналов и отверстия охлаждающего воздуха с ухудшением охлаждения. Визуальный контроль проточной части ГТД в сочетании с параметрическим диагностированием являются общепринятыми составляющими регламентных работ практически во всех отраслях применения ГТД. Поэтому новые предложения в данных направлениях способствуют повышению эффективности их эксплуатации. Ограничения в количестве измеряемых параметров штатной системой контроля ГТД могут быть преодолены применением специальных методик [6, 7].

Компрессор и турбина ГТД являются основными узлами, техническое состояние которых больше всего изменяется в подобных условиях. При этом их КПД – одни из информативных характеристик об этих изменениях. Особую значимость, как диагностические признаки, они приобретают в ГТД с высокими параметрами цикла. Поэтому для оценивания технического состояния ГТД по параметрам потока в проточной части в качестве критерия ТС все чаще используют КПД его узлов [6]:

$$\eta_k = \frac{\pi_k^{\kappa-1}}{T_k^*/T_B^*-1},$$

где $\pi_k = P_k/P_B$ – степень повышения статического давления в компрессоре; T_B^* , T_k^* – полные температуры воздуха на входе и выходе из компрессора, соответственно; κ – показатель адиабаты воздуха;

$$\eta_{тк} = \frac{L_{тк}}{C_{пг} T_{г}^* (1 - 1/\pi_{тк}^{\kappa_{г}-1})},$$

где $L_{тк}$ – работа турбины компрессора; $C_{пг}$, $\kappa_{г}$ – теплоёмкость и показатель адиабаты газа; $T_{г}^*$ – полная температура газа перед турбиной; $\pi_{тк}$ – степень понижения статического давления в турбине.

Применение КПД, как наиболее чувствительной характеристики, при поузловом оценивании технического состояния наземных ГТУ является оправданным согласно многим прикладным публикациям и отраслевым стандартам.

2. Результаты исследования

Целью данной статьи является распространение относительного изменения КПД узлов ГТД для оценивания их технического состояния [6]

$$K_{\eta} = \frac{\eta_{н}}{\eta_{нб}}, \quad (1)$$

где $\eta_{н}$, $\eta_{нб}$ – фактическое и исходное-базовое значения КПД, соответственно, на номинальном режиме работы ГТД. Применение точечного квадратичного аппроксимирования зависимостей КПД от режимного параметра $\eta = f(X)$ позволяет исключить влияние последнего преобразовав формулу (1) к виду:

$$K_{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{\eta}_1^i \bar{\eta}_{нб}^i}{\sum_{i=1}^m (\bar{\eta}_{нб}^i)^2}, \quad (2)$$

где $\bar{\eta}_1^i = \eta^i/\eta_{нб}$ – фактическое относительное значение КПД узла на i -м контрольном режиме;

$\bar{\eta}_{нб}^i = \eta_{нб}^i/\eta_{нб} = f_{нб}(\bar{X}^i)$ – относительное значение КПД на базовой-исходной характеристике узла для i -го режима; $\bar{X}^i = X^i/X_{н}$ – относительное значение режимного параметра на i -ом режиме; m – количество контрольных режимов.

Предложенный приём аппроксимирования, таким образом позволяет выделить эффект изменения КПД только из-за ухудшения технического состояния. Следуя алгоритмам [6,7] можно распространить методики оценивания технического состояния узлов на авиационные двигатели. При этом в качестве базовой характеристики узла $\bar{\eta}_{нб} = f_{нб}(\bar{X})$ используют зависимость по линии совместных режимов работы узлов в системе двигателя при соответствующей программе или законе регулирования.

Необходимо отметить, что ввиду использования штатных систем контроля параметров в проточной части двигателя по измерениям статических давлений и полных температур в характерных сечениях, то целесообразно изложить алгоритмы связи таких параметров с общепринятыми в практике проектирования ГТД по параметром торможения:

$$\pi_k^* = \pi_k \frac{\Pi(\lambda_B)}{\Pi(\lambda_K)}, \quad (3)$$

где отношение $\Pi(\lambda_B)/\Pi(\lambda_K)$ легко определить из равенства расхода воздуха на входе и выходе из компрессора в форме Христиановича:

$$F_B \frac{P_B}{\sqrt{T_B^*}} \frac{q(\lambda_B)}{\Pi(\lambda_B)} = F_K \frac{P_K}{\sqrt{T_K^*}} \frac{q(\lambda_K)}{\Pi(\lambda_K)}. \quad (4)$$

Из этого выражения получим соотношение:

$$\frac{\Pi(\lambda_B)}{\Pi(\lambda_K)} = \frac{1}{\pi_K} \frac{F_B}{F_K} \sqrt{\frac{T_K^*}{T_B^*}} \frac{q(\lambda_B)}{q(\lambda_K)}, \quad (5)$$

где газодинамические функции $q(\lambda_i)$ и $\Pi(\lambda_i)$ между собой однозначно связаны - $y(\lambda_i) = q(\lambda_i)/\Pi(\lambda_i)$.

Отсюда имеем:

$$\frac{y(\lambda_K)}{y(\lambda_B)} = \frac{1}{\pi_K} \frac{F_B}{F_K} \sqrt{\frac{T_K^*}{T_B^*}}. \quad (6)$$

Определив $y(\lambda_B)$ из уравнения $y(\lambda_B) = \frac{G_B}{m_B F_B} \sqrt{\frac{T_B^*}{P_B}}$

и используя уравнение (6), находим $y(\lambda_K)$. Зная $y(\lambda_K)$, находим с помощью этой газодинамической функции значения λ_K . Аналогично можно определить и значения λ_B , которые позволяют определить величины $\Pi(\lambda_B)$ и $\Pi(\lambda_K)$, а в конечном итоге – π_K^* по формуле (3). Несмотря на наличие такой связи параметров, позволяющей пересчет изменения технического состояния ГТД по параметрам торможения, точность оценок технического состояния узлов по статическим измеряемым давлением не снижается вви-

ду использования относительного КПД узлов (1) в качестве критериального признака. Добавим, что от технического состояния ГТД в значительной мере зависят также его экологические характеристики [8].

Вывод

Таким образом, изложен один из возможных подходов поузлового оценивания технического состояния ГТД по измеряемым параметрам паточка в проточной части штатными системами контроля в эксплуатационных условиях. Такой подход может быть применен как для наземных установок, так и для авиационных двигателей.

Литература

1. Шереметьев А.В. Анализ опыта эксплуатации зарубежных газотурбинных двигателей по техническому состоянию / А.В.Шереметьев // *Авиац.-косм. техника і технологія*. – Х.: ХАИ, 2003. – Вип. 40/5. – С. 5-9.
2. Полунатурное моделирование отказов ГТД для испытаний систем контроля и диагностики двигателей / В.Ю. Арьков, Г.Г. Куликов, С.В. Елифанов, И.Ч. Минаев // *Авиац.-косм. техника и технология*. – Х.: ХАИ, 2004. – № 7 (15). – С. 167-173.
3. Дмитриев С.А. Классификация состояния ГТД с глубиной диагностирования до узла / С.А. Дмитриев, Дж. К. Агарвал, Е.В. Путьтин //

Авиац.-косм. техника и технология: сб. науч. тр. – Х.: ХАИ, 2000. – Вып. 19. *Тепловые двигатели и энергоустановки*. – С. 358-364.

4. Ухудшение характеристик турбовентильторного и турбореактивного двигателя при работе в запылённой атмосфере / Данн, Падова, Моллер, Адамс // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*. – 1988. – № 2. – С. 80-89.

5. Исследование поведения ГТД при наличии пыли в воздухе / Бачо, Моллер, Падова, Данн // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*. – 1988. – № 2. – С. 90-100.

6. Герасименко В.П. Диагностика газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / В.П. Герасименко, С. Каемиян, Р.Р. Рузибаев // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»*: сб. науч. тр. – Х.: НТУ «ХПИ». 2010. – № 2. – С. 92-97.

7. Алгоритмы определения основных параметров газотурбинных газоперекачивающих агрегатов в эксплуатации / В.П. Герасименко, Н.В. Кучерук, А.С. Мандра, Т.М. Нурмухаматов // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»*: сб. науч. тр. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – № 3. – С. 116-121.

8. Доновэн. Влияние окружающих условий на содержание загрязняющих веществ в выбросах газовых турбин. Обобщённые поправочные коэффициенты / Доновэн, Кэкетт // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*. – 1988. – № 4. – С. 173-182.

Поступила в редакцию 28.05 2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

ПОУЗЛОВЕ ДІАГНОТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГТД

В.П. Герасименко, С. Каеміан

Розглянуті основні проблеми діагностування газотурбінного двигуна в експлуатаційних умовах за технічним станом. Описано головні причини погіршення технічного стану проточної частини компресора та турбіни. З'ясовано, що ККД є найбільш придатною характеристикою для оцінювання технічного стану двигуна та його вузлів. Запропоновано оцінювати ТС ГТД за відносним зміненням ККД вузлів. Цей критерій дозволяє поузлове діагностування двигуна. Наведені залежності характеристик двигуна за статичними та повними параметрами.

Ключові слова: газотурбінний двигун, технічний стан, діагностика, ККД.

THE DIAGNOSTIC OF GTE UNITS BY TECHNICAL CONDITION

V.P. Gerasimenko, S. Ghaemian

Fundamental problems of Gas engine diagnostic by technical condition in exploitation have been considered. The main reasous change for the worse of compressor and turbine channels technical condition have been written. At has been find out that units efficiency is best convenient characteristic for diagnostic of GTE units by technical condition. The technical condition GTE has been proposed estimate by change of the relative efficiency. The dependences of characteristics engine by rial flow parameters and stagnant flow parameters have been presented.

Key words: gasturbine engine, technical condition , diagnostic, efficiency.

Герасименко Владимир Петрович – д-р техн. наук, проф., проф. Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина.

Каемиян Сайед – магистр Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина.