

УДК 629.735.083.06:075.8

А.В. ПОПОВ

Национальный авиационный университет, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРДД С ПЕРЕМЕЖАЮЩИМИСЯ НЕИСПРАВНОСТЯМИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ ЕГО РАБОТЫ

Рассмотрены результаты обработки статистических данных эксплуатации некоторого парка турбореактивных двухконтурных двигателей. Рассчитаны динамические характеристики двухконтурного турбореактивного двигателя с учетом множественных повреждений конструктивных элементов его проточной части на основе проведенных натуральных экспериментов с измерением параметров рабочего процесса двигателя на установившихся эксплуатационных режимах его работы.

двухконтурный турбореактивный двигатель, диагностика, установившийся режим, перемежающаяся неисправность, динамическая характеристика, проточная часть

Введение

В последнее время все большее внимание уделяется проблеме совершенствования методов и средств автоматизированного диагностирования по параметрам рабочего процесса с последующим прогнозированием технического состояния (ТС) газотурбинных двигателей (ГТД). Решение ее, и последующее внедрение в условия реальной эксплуатации, в значительной мере зависит от степени достоверности диагностической информации.

Постановка проблемы. В настоящее время существует множество различных автоматизированных систем идентификации (АСИ) ТС ГТД. Реализация процесса диагностирования с использованием АСИ главным образом зависит от решения следующих задач: разработка и построение математической модели (ММ) рабочего процесса турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД), диагностической модели (ДМ), выбора диагностических признаков (ДП) и диагностического режима (ДР), количества априорных или, иными словами, регистрируемых термогазодинамических параметров (ТГДП) рабочего процесса. Наибольшую ценность представляет результат идентификации ТС двигателя с глубиной диагностирования до узла. Однако при этом существ-

ует ряд трудностей с точки зрения достоверности диагноза. Оценка ТС проводится, главным образом, по отклонениям значений ДП от исправного, а значение ДП зависит от вида и степени повреждения или неисправности. Поэтому качественные и количественные показатели ТС ГТД носят вероятностно-статистический характер. По причине наложения классов состояния в диагностируемом пространстве подобный характер наносит отпечаток именно на достоверность диагноза – это объясняется возникновением ошибок первого и второго рода [1]. Известно, что наиболее информативным является переходной режим работы, например, приемистость [1]. При этом в качестве ДП используют такие параметры, как: $K_{G_m}^{нд}$ – коэффициент усиления ротора низкого давления (РНД) по расходу топлива; $K_{n_{нд}}^{нд}$ – коэффициент усиления РНД по частоте вращения ротора высокого давления (РВД); $K_{G_m}^{ед}$ – коэффициент усиления РВД по расходу топлива (рис. 1); $K_{n_{нд}}^{ед}$ – коэффициент усиления РВД по частоте вращения РНД; $T_{G_m}^{нд}$ – постоянная времени РНД; $T_{G_m}^{ед}$ – постоянная времени РВД и т.д. Проводимые ранее

исследования [1, 2] были направлены на изучение изменения значения ДП при индивидуальном моделировании повреждения узла проточной части ГТД. При проведении стендовых испытаний [1] имитировалось повреждение компрессора низкого давления (КНД), компрессора высокого давления (КВД), турбины, в частности, низкого давления (ТНД) и камеры сгорания (КС) в отдельности.

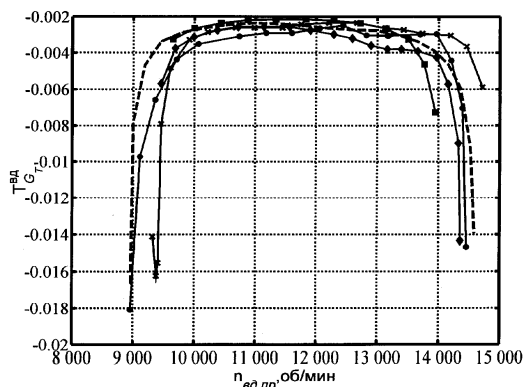
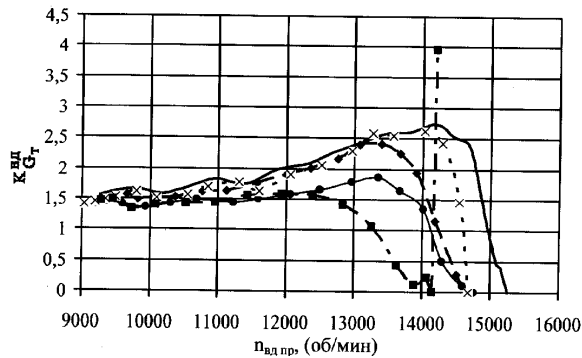


Рис. 1. Зависимость динамических характеристик при изменении ТС ПЧ в процессе приемистости:
 а – коэффициент $K_{G_m}^{ed}$; б – постоянная времени $T_{G_m}^{ed}$;

- ◆ – закоксованность форсунки,
- – исправное состояние,
- – шероховатость КВД,
- × – шероховатость КНД,
- — шероховатость ТНД

Полученные результаты анализа данных эксплуатации таких ТРДД, как: Д-30, Д-36, Д-18Т и некоторых их модификаций свидетельствуют о том, что причина досрочного съема двигателя (ДСД) носит комплексный характер, с точки зрения возникновения неисправности или отказа в целом, в том или ином конструктивном элементе проточной час-

ти (ПЧ), т.е. речь идет о перемежающихся неисправностях (множественных неисправностях) (ПН) (рис. 2).

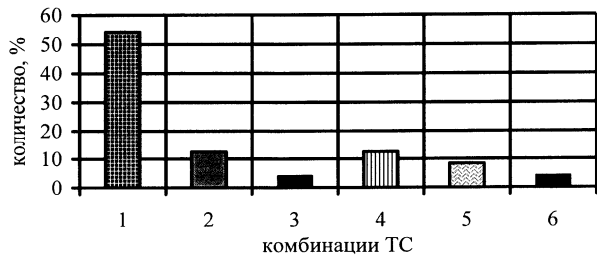


Рис. 2. Распределение комбинаций повреждений конструктивных элементов ПЧ ТРДД Д-30КП:

- 1 – КС-Турбина,
- 2 – Компрессор-КС,
- 3 – Компрессор-Турбина,
- 4 – Компрессор-Турбина-КС,
- 5 – Компрессор,
- 6 – Турбина

В обще сложности, анализу было подвергнуто порядка 140 двигателей Д-30КП и его модификаций. В результате чего доля ПН составила приблизительно 17,65% от общего количества имевших место случаев ДСД, отработки ресурса с неисправностью (ОРН) или при устранении соответствия нормам ТУ либо отказа в условиях эксплуатации (ОУЭ). По иному обстоит картина с двигателем семейства Д-36 (рис. 3).

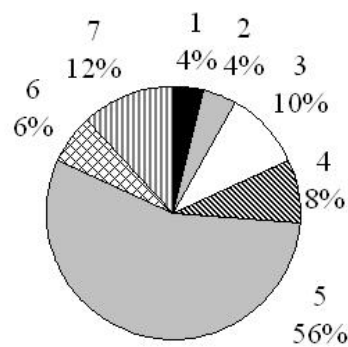


Рис. 3. Распределение комбинаций повреждений конструктивных элементов ПЧ ТРДД Д-36:

- 1 – Компрессор-КС,
- 2 – КС-Турбина,
- 3 – Компрессор-Турбина,
- 4 – Компрессор-Турбина-КС,
- 5 – Компрессор,
- 6 – КС,
- 7 – Турбина

В случае с Д-36 выборка составила порядка 445 двигателей. Количество ПН от общего количества

составило около 11,46%. Для ТРДД Д-18Т количество ПН в процентном соотношении примерно одинаковое (9,5%) с его предшественником Д-36, однако выборка составила 278 двигателей (рис. 4).

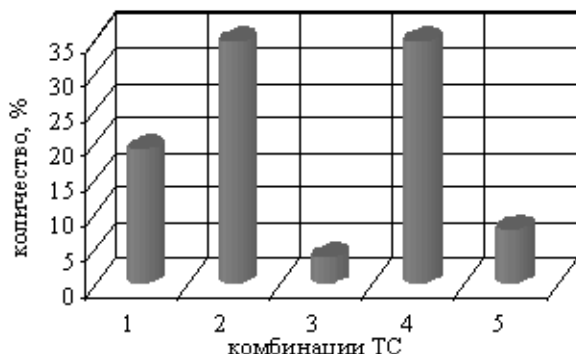


Рис. 4. Распределение комбинаций повреждений конструктивных элементов ПЧ ГТД Д-18Т:

- 1 – Компрессор,
- 2 – Компрессор-Турбина,
- 3 – Компрессор-Турбина-КС,
- 4 – КС-Турбина,
- 5 – Турбина

Итак, подводя итоги проведенного анализа данных эксплуатации, можно сделать следующий вывод:

- вероятность возникновения той или иной комбинации ПН как между отдельными узлами, так и в самих узлах носит индивидуальный характер для каждого типа ГТД;
- необходимо проводить исследования для получения более четкого с точки зрения диагностики портрета состояния ПЧ ГТД.

Постановка задачи исследования. Увеличение количества ДП приводит к более объективному диагностированию [1 – 4]. С этой целью были проведены стендовые испытания для получения количественных и качественных значений ДП при ПН с натурным моделированием множественных повреждений конструктивных элементов ПЧ на газодинамическом стенде ГТД АИ-25. При этом имитировалось нарушение качества обтекания рабочим телом лопаток входного направляющего аппарата (ВНА), КНД, ТНД путем нанесения корунда на клеевой основе. Для моделирования эффекта закок-

сованности рабочей топливной форсунки и нарушения поля температуры перед ТВД на топливный коллектор устанавливалась заглушка.

Этот вариант был отнесен к неисправности КС. Для получения полной картины влияния изменения ТС ПЧ при возникновении ПН было проведено исследование изменения ТГДП рабочего процесса при шестнадцати состояниях ПЧ.

Проведение эксперимента

Эксперимент проводился при различных значениях атмосферного давления и температуры. Изменение таких параметров рабочего процесса как давление, температура, а также расход топлива, тяга – проводились на пяти установившихся эксплуатационных режимах работы ГТД: "малый газ", 0,4, 0,6, 0,7, 0,85 номинального. Регистрация параметров проводилась после выдержки двигателя на каждом режиме в течение 3 мин для уменьшения разброса значений измеряемых величин от эффекта теплообмена.

Обработка результатов измерений. Согласно рекомендациям [1, 5] диагностическим режимом принят режим, при котором $n_{вд}$ находится вблизи расчетной точки 0,85 номинального и соответствует $n_{вд_{пр}} = 14250$ об/мин.

Обработка результатов измерений проводилась по методике, приведенной в работе [1]. При проведении расчетов таких ДП как коэффициент полезного действия, степени повышения или понижения давления отдельных узлов использовались дроссельные характеристики среднестатистического АИ-25 и характеристики соответствующих лопаточных машин.

Расчет характеристик. Коэффициенты усиления $K_{G_m}^{вд}$, $K_{G_m}^{нд}$, $K_{n_{вд}}^{нд}$, $K_{n_{нд}}^{вд}$ определялись согласно математических зависимостей, приведенных в работе [6]. Например, значение коэффициента усиления

(КУ) ротора ВД по подаче топлива определяем из выражения:

$$K_{G_m}^{в\delta} = \frac{(n_{в\delta np.баз} - n_{в\delta np}) \cdot G_{m np.баз}}{(G_{m np.баз} - G_{m np}) \cdot n_{в\delta np.баз}}, \quad (1)$$

где $n_{в\delta np.баз}$ – базовая частота вращения РВД;

$G_{m np.баз}$ – базовый часовой расход топлива.

За базовые значения приведенных величин – частот вращения роторов ВД, НД, часового расхода топлива – принимали их соответствующие значения согласно дроссельной характеристике на максимальном режиме [4, 7]: $n_{в\delta np.баз} = 16640$ об/мин; $n_{нд np.баз} = 10750$ об/мин; $G_{m np.баз} = 855$ кг/час; момент инерции J_i роторов ВД, НД равен $4,8$ кг·м² и $5,4$ кг·м² соответственно; низшая теплотворность топлива $H_u = 42845 \cdot 10^3$ Дж/кг. Согласно методике, приведенной в работе [4], определяем значение постоянной времени для РВД и РНД. Таким образом, выражение для определения $T_{G_m}^{нд}$ имеет вид:

$$T_{G_m}^{нд} = \frac{39,438 J_{нд} n_{нд np.баз}}{T_{г}^* \eta_{г} H_u} \times \left[\frac{T_{тв\delta}^* \eta_{кн}^* n_{нд np} K_{G_m}^{нд}}{G_{г1 np} G_{m np} \left(\pi_{кн}^* \frac{\kappa-1}{\kappa} - 1 \right)} \right]. \quad (2)$$

Величину постоянной времени для ротора ВД определяем следующим образом:

$$T_{G_m}^{в\delta} = \frac{39,438 J_{в\delta} n_{в\delta np.баз}}{\eta_{г} H_u} \times \left[\frac{T_{г}^* \eta_{кв}^* n_{в\delta np} K_{G_m}^{в\delta}}{T_{кн}^* G_{m np} \left(\pi_{кв}^* \frac{\kappa-1}{\kappa} - 1 \right)} \right]. \quad (3)$$

Основная задача эксперимента заключается в определении комплекса ДП, т.е. исследование статических и динамических характеристик данного

ТРДД. Поэтому в роли статических характеристик выступают известные ДП, такие как: S – скольжение роторов ВД и НД; η_i – к.п.д. КНД, КВД, ТНД, ТВД; π_i^* – степень повышения (понижения) давления i -го каскада компрессора или турбины. С учетом множества комбинаций (вариантов) ТС конструктивных элементов ПЧ для удобства восприятия выполнено кодирование ТС ПЧ, например: 1 – исправное состояние, 2 – шероховатость лопаток ВНА и КНД, 3 – шероховатость лопаток ВНА, КНД и заглушена форсунка, 4 – шероховатость лопаток КНД, 5 – шероховатость лопаток КНД и ТНД, 6 – шероховатость лопаток КНД, ТНД и ВНА, 7 – шероховатость лопаток КНД, ТНД, ВНА и заглушена форсунка.

В таблице приведены результаты расчета.

Таблица

Отклонения ДП в процентах с учетом технического состояния проточной части АИ-25

ДП	Код технического состояния ПЧ ГТД				
	2	4	5	6	7
$\delta K_{G_m}^{нд}$	24,782	39,792	322,53	52,691	52,736
$\delta K_{n_{в\delta}}^{нд}$	-2,304	-12,13	-10,25	-9,997	-8,134
$\delta K_{n_{нд}}^{в\delta}$	2,3603	13,805	11,428	11,107	8,8579
$\delta K_{G_m}^{в\delta}$	27,726	59,089	370,8	69,652	66,265
$\delta T_{G_m}^{нд}$	27,286	61,94	384,68	68,311	68,349
$\delta T_{G_m}^{в\delta}$	38,264	41,384	375,19	65,671	68,792
δS	-0,392	-1,534	-1,302	-1,737	-1,075
$\delta \eta_{кн}^*$	-1,181	4,4811	5,2115	-2,968	1,5167
$\delta \eta_{кв}^*$	8,8285	-5,280	8,5186	8,7296	10,076
$\delta \eta_{тв}^*$	-0,149	0,0742	-0,105	-0,124	-0,136
$\delta \eta_{тн}^*$	-1,83	-4,104	-3,103	1,209	-2,233
$\delta \pi_{кн}^*$	-0,820	1,478	1,403	1,1865	0,7458
$\delta \pi_{кв}^*$	0,6665	0,644	0,752	1,7352	0,7188
$\delta \pi_{тв}^*$	-8,875	0,3542	-7,023	-7,797	-8,614
$\delta \pi_{тн}^*$	-0,019	-0,016	-0,007	0,036	-0,001
$\delta \eta_{г}^*$	-5,655	-6,608	-19,73	-11,42	-10,12

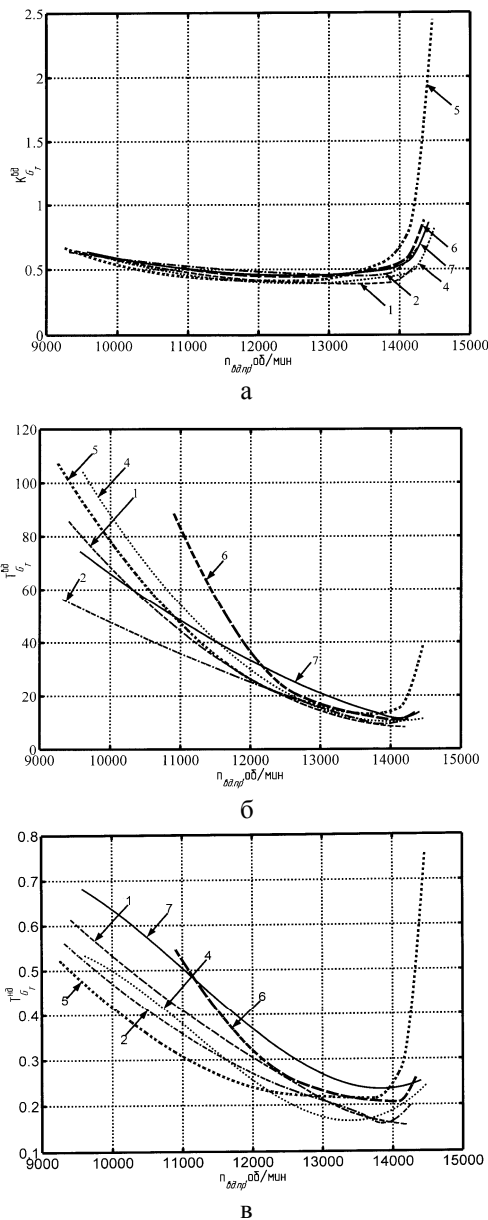


Рис. 5. Изменение динамических характеристик ГТД АИ-25 с учетом ТС ПЧ:

а – КУ ротора ВД по подаче топлива $K_{G_m}^{6d}$;

б – постоянная времени ротора ВД $T_{G_m}^{6d}$;

в – постоянная времени ротора НД $T_{G_m}^{nd}$;

- 1 – исправное состояние,
- 2 – шероховатость лопаток ВНА и КНД,
- 4 – шероховатость лопаток КНД,
- 5 – шероховатость лопаток ВНА и КНД,
- 6 – шероховатость лопаток ВНА, КНД и ТНД,
- 7 – шероховатость лопаток ВНА, КНД, ТНД и заглушена топливная форсунка

Заключение

Исходя из результатов проведенных испытаний и анализируя значение отклонения ДП исследуемо-

го ГТД можно сделать вывод, что представленные ДП, такие, как $K_{G_m}^{6d}$, $T_{G_m}^{6d}$, $T_{G_m}^{nd}$, $K_{G_m}^{nd}$, $K_{n_{6d}}^{nd}$, $K_{n_{nd}}^{6d}$ наиболее чувствительны к изменению ТС ПЧ по сравнению со статическими ДП. Из всего комплекса представленных ДП наибольшее отклонение имеют коэффициенты $K_{G_m}^{6d}$, $T_{G_m}^{6d}$, $T_{G_m}^{nd}$, $K_{G_m}^{nd}$. Таким образом, данные диагностические признаки могут быть использованы при построении диагностических моделей для идентификации ТС ТРДД.

Литература

1. Дмитриев С.А. Диагностирование проточной части ГТД на установившихся и неустойчивых режимах работы. Дисс.... докт. техн. наук. – К.: КИИГА, 1996. – 358 с.
2. Попов А.В. Исследование влияния эксплуатационных факторов на динамические характеристики ТРДД при приемистости // Вестник двигателестроения. – 2006. – №1. – С. 59-61.
3. Дмитриев С.А., Литвиненко А.Е., Степушкина Е.П., Попов А.В. Экспертные модели определения множественных отказов в авиационных двигателях // Вестник двигателестроения. – 2005. – №1. – С. 12-17.
4. Карпов О.Є. Математична модель турбореактивного двоконтурного двигуна для дослідження його статичних і динамічних характеристик // Вісник НАУ. – 2004. – №1. – С. 113-117.
5. Ахмедзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.
6. Добрянский Г.В., Мартынова Т.С. Динамика авиационных ГТД. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

Поступила в редакцию 27.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. Панин, Аэрокосмический институт Национального авиационного университета, Киев.