

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 натурных 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-

вует 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:  $K_{G_m}^{nd}$  – коэффициент усиления ротора низкого давления (РНД) по расходу топлива;  $K_{n_{nd}}^{nd}$  – коэффициент усиления РНД по частоте вращения ротора высокого давления (РВД);  $K_{G_m}^{ed}$  – коэффициент усиления РВД по расходу топлива (рис. 1);  $K_{n_{nd}}^{ed}$  – коэффициент усиления РВД по частоте вращения РНД;  $T_{G_m}^{nd}$  – постоянная времени РНД;  $T_{G_m}^{ed}$  – 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.

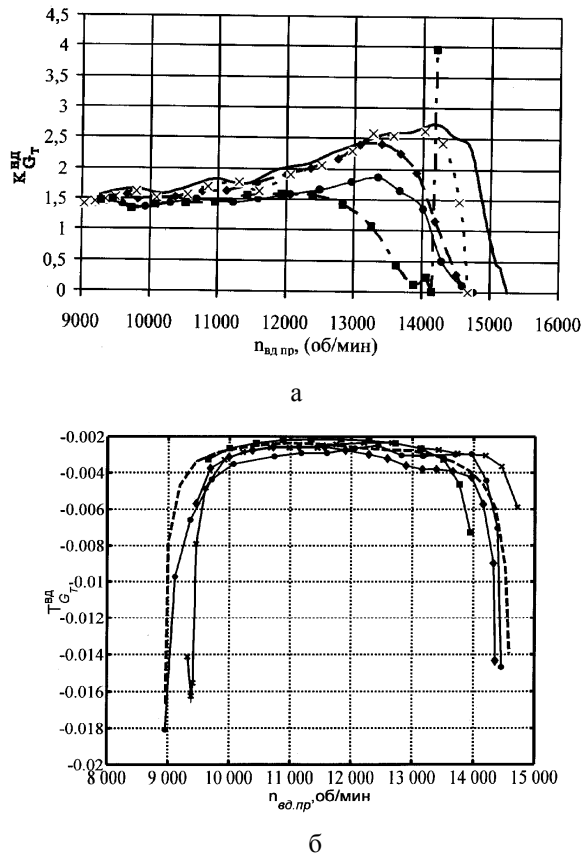


Рис. 1. Зависимость динамических характеристик при изменении ТС ПЧ в процессе приемистости: а – коэффициент  $K_{G_m}^{ed}$ ; б – постоянная времени  $T_{G_m}^{ed}$ ;

- ◆ – 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).

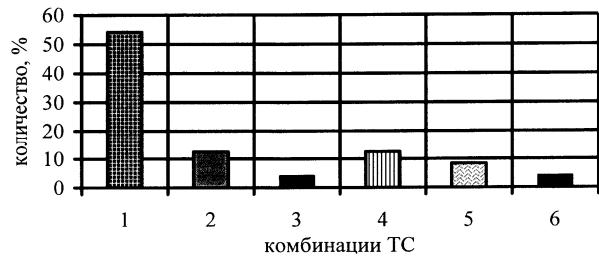


Рис. 2. Распределение комбинаций повреждений конструктивных элементов ПЧ ТРДД Д-30КП:

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

В общем 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).

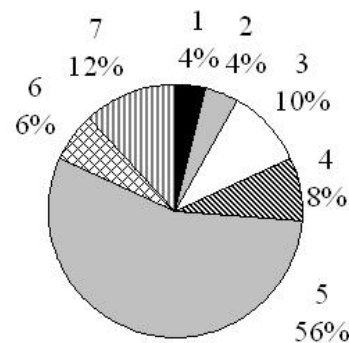


Рис. 3. Распределение комбинаций повреждений конструктивных элементов ПЧ ТРДД Д-36:

- 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).

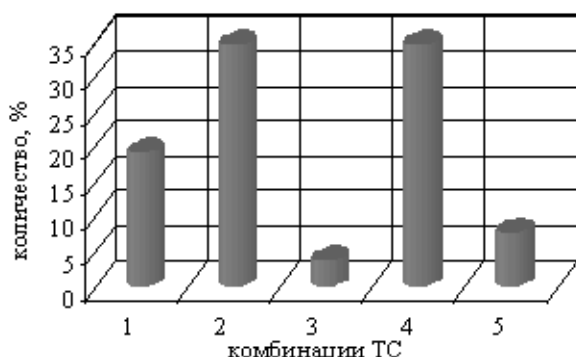


Рис. 4. Распределение комбинаций повреждений конструктивных элементов ПЧ ГТД Д-18Т:

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

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

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

где  $n_{\omega\delta np.баз}$  – 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]:  $n_{\omega\delta np.баз} = 16640$  об/мин;  $n_{нд np.баз} = 10750$  об/мин;  $G_{m np.баз} = 855$  кг/час; момент инерции  $J_i$  роторов ВД, НД равен  $4,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  и  $5,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  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:

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

Величину постоянной времени для ротора ВД определяем следующим образом:

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

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;  $\eta_i$  – к.п.д. КНД, КВД, ТНД, ТВД;  $\pi_i^*$  – 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 |
| $\delta K_{n_{\omega\delta}}^{нд}$ | -2,304                            | -12,13 | -10,25 | -9,997 | -8,134 |
| $\delta K_{n_{нд}}^{\omega\delta}$ | 2,3603                            | 13,805 | 11,428 | 11,107 | 8,8579 |
| $\delta K_{G_m}^{\omega\delta}$    | 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 |
| $\delta T_{G_m}^{\omega\delta}$    | 38,264                            | 41,384 | 375,19 | 65,671 | 68,792 |
| $\delta S$                         | -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 |
| $\delta \eta_{\epsilon}^*$         | -5,655                            | -6,608 | -19,73 | -11,42 | -10,12 |

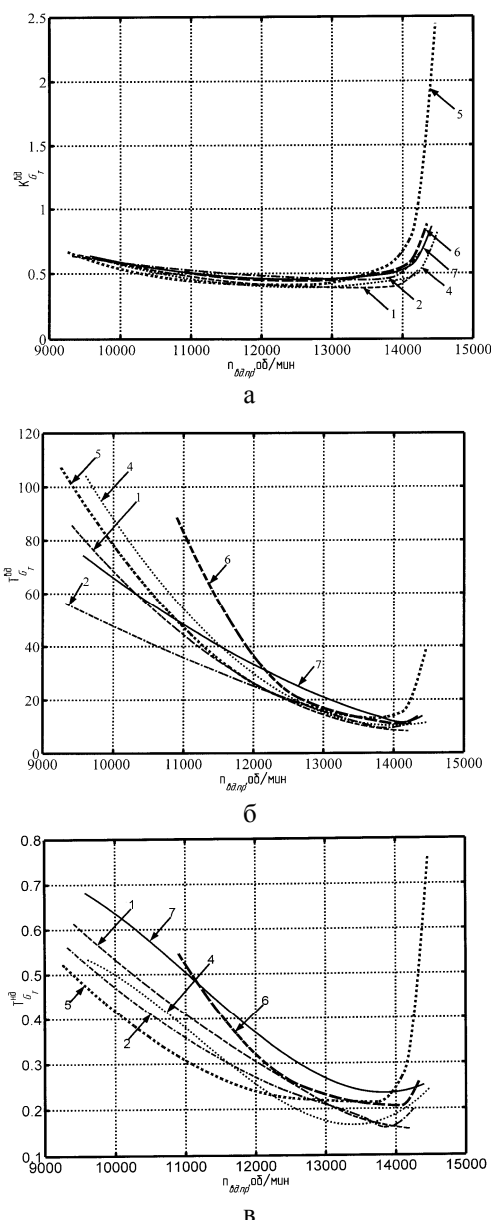


Рис. 5. Изменение динамических характеристик ГТД АИ-25 с учетом ТС ПЧ:

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

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

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

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 заглущена топливная форсунка

### Заключение

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

го ГТД можно сделать вывод, что представленные ДП, такие, как  $K_{G_m}^{вд}$ ,  $T_{G_m}^{вд}$ ,  $T_{G_m}^{нд}$ ,  $K_{G_m}^{нд}$ ,  $K_{n_{вд}}^{вд}$ ,  $K_{n_{нд}}^{вд}$  наиболее чувствительны к изменению ТС ПЧ по сравнению со статическими ДП. Из всего комплекса представленных ДП наибольшее отклонение имеют коэффициенты  $K_{G_m}^{вд}$ ,  $T_{G_m}^{вд}$ ,  $T_{G_m}^{нд}$ ,  $K_{G_m}^{нд}$ . 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 неустановившихся 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.