

ВЫБОР АЛГОРИТМОВ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕТАЛЕЙ НА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ ДЛЯ УЧЕТА ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.В. Олейник, канд. техн. наук, доцент, Н.А. Шимановская, аспирант,

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

В настоящее время системы диагностики авиационных газотурбинных двигателей оснащаются системами учета выработки ресурса основных деталей. В состав таких систем входят алгоритмы мониторинга (непрерывного расчета по штатно регистрируемым параметрам двигателя) температуры в критических точках деталей на установившихся и не установившихся режимах работы двигателя.

В работе [1] предложено для мониторинга температурного состояния деталей создавать специальные алгоритмы, названные там диагностическими моделями, которые упрощенно описывают влияние на тепловое состояние деталей наиболее значимых факторов. Для достижения необходимой точности предложено предварительно проводить идентификацию таких моделей по конечно-элементным моделям верхнего уровня, учитывающим с предельной точностью, достижимой при проведении проектно-конструкторских работ, влияние максимального числа влияющих факторов. Обоснованию допустимого уровня погрешностей алгоритмов посвящена работа [2]. Данные о погрешностях некоторых моделей приведены в [3, 4]. В данной работе рассматривается более широкий круг моделей.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ погрешности различных алгоритмов мониторинга температуры в критических точках основных деталей трехвального ТРДД, в частности, диска турбины высокого давления (ТВД) и находящегося с ним в тепловом контакте вала компрессора высокого давления (КВД).

На первом этапе математические модели температурного состояния, входящие в состав алгоритмов мониторинга, идентифицировались по ограниченному

числу расчетов температуры на описываемых далее моделях верхнего уровня. На втором этапе находилось максимальное значение погрешности алгоритмов мониторинга относительно модели верхнего уровня на всех возможных режимах работы двигателя.

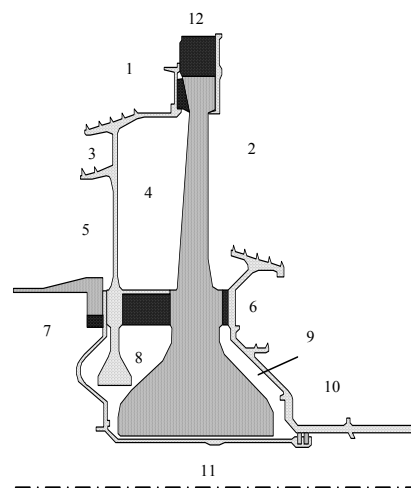


Рис. 1. Турбина высокого давления:
1...12 – участки задания граничных условий;
■ – сплошные ■ – несплошные участки

Модель верхнего уровня представляла собой осесимметричную конечно-элементную модель, состоящую из модели диска ТВД, вала КВД, покрывного диска и других деталей ротора (рис. 1). Использовались четырехугольные параболические элементы. Для 12 участков поверхности по методике, изложенной в [5], были рассчитаны граничные условия теплообмена – местные значения температуры охлаждающего воздуха и коэффициентов теплоотдачи на «базовом» установившемся режиме¹.

Для других режимов и условий работы двигателя

¹ Модель и данные предоставлены ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко.

местные значения температуры воздуха T_i рассчитывались по формуле

$$T_i = T_1 + \left(\frac{T_i - T_1}{T_2 - T_1} \right)_{\text{б}} \cdot (T_2 - T_1), \quad (1)$$

где T_1 и T_2 – температура на входе в двигатель и температура за компрессором высокого давления; индекс «б» отмечает значения величин на базовом режиме.

Местные значения коэффициентов теплоотдачи α_i на другие режимы пересчитывались по пропорциональной зависимости

$$\alpha_i = K_\alpha \cdot \alpha_{i\text{б}}, \quad (2)$$

$$\text{где } K_\alpha = \left(\frac{n}{n_{\text{б}}} \frac{P}{P_{\text{б}}} \right)^{0.8} \left(\frac{T_2}{T_{2\text{б}}} \right)^{-0.567};$$

n – частота вращения;

P – давление воздуха.

Были рассмотрены алгоритмы мониторинга, рассчитывающие температуру t в критической точке детали по формуле

$$t = T_1 + \Theta(p)(T_2 - T_1), \quad (3)$$

где $\Theta(p)$ — относительная температура, в общем случае неизвестная функция параметра, зависящего от режима работы двигателя.

Исследовалась точность пяти алгоритмов мониторинга, отличающихся подходом к заданию $\Theta(p)$.

Алгоритм Т1. Значение Θ считалось постоянным для всех режимов работы двигателя:

$$\Theta = \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right) = \text{const}. \quad (4)$$

Удобство этого алгоритма заключается в том, что для идентификации Θ достаточно с помощью модели верхнего уровня выполнить всего один расчет температурного поля, например на базовом режиме.

Алгоритм Т2.1. предполагает существование зависимости Θ от режима работы двигателя:

$$\Theta = f_I(K_\alpha). \quad (5)$$

Идентификация зависимости (5) заключалась в нахождении степени и коэффициентов полинома, описывающих регрессию результатов расчетов Θ по мо-

делям верхнего уровня при изменении K_α в диапазоне от 0 до 1.1. При этом значения температуры среды соответствовали условиям базового режима: $T_1 = T_{1\text{б}}$, $T_2 = T_{2\text{б}}$.

Алгоритм Т2.2. Аналогичная предыдущей зависимости

$$\Theta = f_{II}(K_\alpha) \quad (6)$$

находилась как уравнение регрессии результатов расчетов Θ по модели верхнего уровня при значениях T_1 , T_2 и K_α , соответствующих основным режимам и условиям работы двигателя. При идентификации зависимости (6) возникает необходимость в использовании газодинамической модели двигателя, определяющей n , P , T_2 и другие параметры на различных режимах.

Алгоритм Т3.1. Предполагается существование зависимости

$$\Theta = f_{III}(K_\alpha / K_\lambda), \quad (7)$$

где $K_\lambda = \frac{\lambda(\tilde{t})}{\lambda(\tilde{t}_{\text{б}})}$ – параметр, характеризующий отличие коэффициента теплопроводности материала детали

λ от его значения на базовом режиме;

$\tilde{t} = T_1 + \tilde{\Theta}(T_2 - T_1)$ – характерная (для учета изменения теплопроводности) температура детали;

$$\tilde{\Theta} = \frac{\tilde{t}_{\text{б}} - T_{1\text{б}}}{T_{2\text{б}} - T_{1\text{б}}} - \text{постоянное для всех режимов}$$

относительное значение характерной температуры;

$\tilde{t}_{\text{б}}$ – характерная температура на базовом режиме, определяемая либо как осредненная по теплоотдаче температура воздуха

$$\tilde{t}_{\text{б}} = \frac{\sum \alpha_i T_i \Delta F_i}{\sum \alpha_i \Delta F_i}, \quad (8)$$

где ΔF_i – площадь i -го участка поверхности, либо как предел

$$\tilde{t}_{\text{б}} = \lim_{K_\alpha \rightarrow 0} t \text{ при } T_1 = T_{1\text{б}}; T_2 = T_{2\text{б}}. \quad (9)$$

Конкретный вид зависимости (7) находился как уравнение регрессии результатов расчетов Θ по модели верхнего уровня для условий: K_α варьируется от 0 до 1.3 при $T_1 = T_{1\text{б}}$, $T_2 = T_{2\text{б}}$. Подобно алгоритму Т2.1,

для идентификации достаточно сведений о базовом режиме двигателя.

Применение параметра K_α/K_λ в алгоритмах мониторинга температурного состояния предложено в работе [4]. Там же показано, что при выполнении условий (1) и (2) величина Θ не зависит от режима и условий работы двигателя и использование для ее нахождения формул (8) и (9) дает одинаковые значения.

Алгоритм Т3.2. Аналогичная предыдущей зависимости

$$\Theta = f_{IV}(K_\alpha / K_\lambda) \quad (10)$$

находится как регрессия результатов расчетов Θ по модели верхнего уровня при значениях T_1 , T_2 и K_α , соответствующих различным режимам и различным условиям работы двигателя. Подобно алгоритму **Т2.2** для проведения таких расчетов необходима многорежимная газодинамическая модель двигателя.

Для определения погрешности рассматриваемых алгоритмов по ним и по моделям верхнего уровня были рассчитаны температуры деталей на 17 установленных режимах, отличавшихся положением ручки управления двигателем и условиями полета по высоте, скорости, температуре и давлению воздуха. Погрешность определялась как максимальное значение разности температур, полученных по алгоритму мониторинга и по модели верхнего уровня. Значения погрешностей приведены в таблице.

Результаты расчетов по модели верхнего уровня,

построенные в зависимости от K_α , расслаиваются в соответствии с температурой на входе в двигатель (рис. 2). Эти же результаты, построенные в зависимости от K_α/K_λ , образуют монотонную однозначную зависимость. Последнее вызвано тем, что параметр K_α/K_λ при постоянстве формы, материала и выполнении условий (1) и (2) является критерием подобия.

Алгоритм Т1 $\Theta = \text{const}$ характеризуется погрешностью порядка 2% в значениях Θ и $\sim 5^\circ\text{C}$ в значениях температуры.

Погрешность уменьшается при использовании алгоритмов **Т2.1** и **Т2.2** типа $\Theta = f(K_\alpha)$. Результаты по алгоритму **Т2.1** оказываются смещенными в сторону меньших значений Θ для диска и в сторону больших значений - для вала. Погрешность вызвана учетом зависимости теплопроводности от температуры, так как идентификация модели $\Theta = f_1(K_\alpha)$ проводилась при неизменных температурных условиях: $T_1 = T_{1б}$ и $T_2 = T_{2б}$.

Результаты расчетов по алгоритму **Т2.2** пересекают область результатов верхнего уровня и характеризуются меньшей погрешностью, так как используемая модель $\Theta = f_{II}(K_\alpha)$ идентифицирована при переменных по температуре граничных условиях.

Использование алгоритмов **Т3.1** и **Т3.2** с моделями $\Theta = f(K_\alpha/K_\lambda)$ в форме полинома 3-й степени уменьшает погрешность на один – два порядка, до уровня пренебрежимо малых значений – 0.04 % и 0.2°C . При

Таблица 1

Погрешность алгоритмов мониторинга температурного состояния

Алгоритм мониторинга		Исходные данные				Степень полинома аппроксимации	Погрешность	
		T_1	T_2	K_α	Кол-во МКЭ расчетов		$\Delta\Theta$, %	Δt , $^\circ\text{C}$
Т1	$\Theta = \text{const}$	базовые			1	0	2	5
Т2.1	$\Theta = f_I(K_\gamma)$	базовые	режимные		8	6	1	3
Т2.2	$\Theta = f_{II}(K_\gamma)$	режимные			17	2	0.5	1.5
Т3.1	$\Theta = f_{III}(K_\gamma, K_\gamma)$	базовые	режимные		9 (5)	3	0.04	0.2
Т3.2	$\Theta = f_{IV}(K_\gamma, K_\gamma)$	режимные			17 (5)	3	0.04	0.2

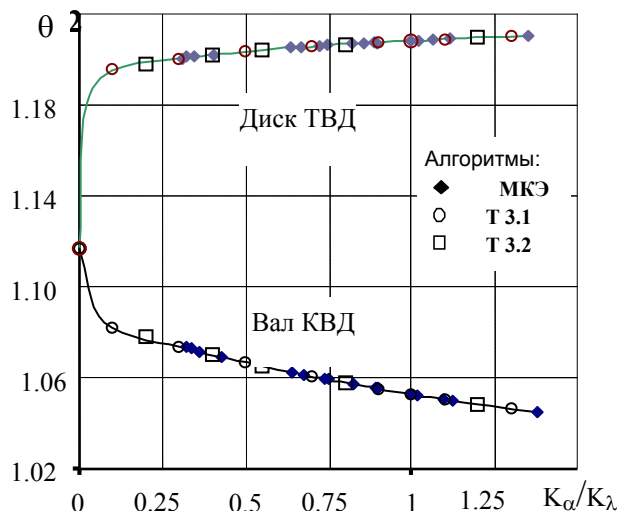
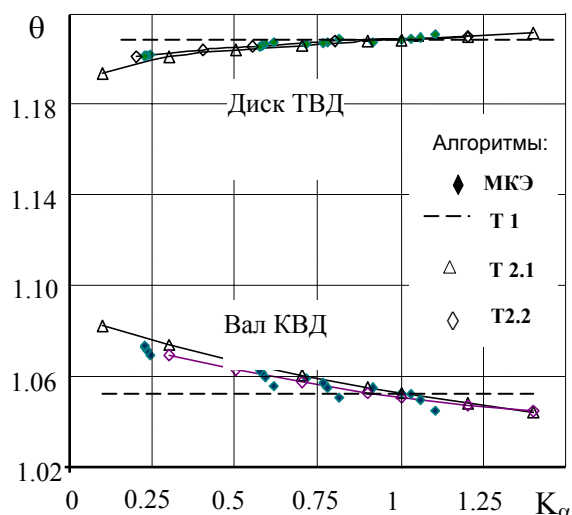


Рис. 2. Результаты расчета относительной температуры по различным алгоритмам

этом не играет роли, каким образом изменяли граничные условия при идентификации моделей, за счет варьирования значений T_1 , T_2 и K_α , как в алгоритме ТЗ.2 или за счет варьирования только K_α при постоянных T_1 и T_2 , как в алгоритме ТЗ.1. Последнее реализуется более просто. Для идентификации такой модели достаточно 4-х значений температуры в критической точке деали, полученных по модели верхнего уровня при различных K_α . (Для определения значения $\tilde{\Theta}$, используемого в алгоритмах ТЗ.1 и ТЗ.2, на модели верхнего уровня необходимо также выполнить расчет \tilde{t}_6 при предельно малом значении K_α).

Полученные результаты позволили рекомендовать алгоритм ТЗ.1 $\Theta = f(K_\alpha / K_\lambda)$ как достаточно точный и наименее трудоемкий по объему предварительных расчетов для мониторинга температуры диска ТВД и вала КВД на установившихся режимах.

Литература

1. Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.- Харьков: ХАИ, 1998.- Вып. 5 (тематический).- С. 271-276, 276-280, 343-347.
2. Симбирский Д.Ф., Филяев В.А., Шереметьев А.В. Требования к точности мониторинга температурного и напряженного состояний деталей ГТД в системах учета выработки ресурса / Авиационно-космическая техника і технологія: Зб. наук. праць.- Хар-

ків: ХАИ, 2002.- Вип. 34.- С. 130-132.

3. Олейник А.В., Симбирский Д.Ф., Филяев В.А. Алгоритмы мониторинга температурного напряженного состояний деталей авиационных ГТД в системах учета выработки их ресурсов // Авиационно-космическая техника і технологія: Зб. наук. праць.- Харьков: ХАИ, 2002.- Вип. 30.- С. 75-79.

4. Модели температурного состояния деталей на установившихся режимах для систем учета выработки ресурса газотурбинных двигателей / А.В. Олейник, Д.В. Крикунов, Н.А. Шимановская, С.Б. Резник, Е.А. Бандурко // Авиационно-космическая техника і технологія: Зб. наук. праць.- Харьков: ХАИ, 2002.- Вип. 34.- С. 133-135.

5. Копелев С.З., Слитенко А.Ф. Конструкции и расчет систем охлаждения ГТД.- Харьков: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1994.- 240 с.

Поступила в редакцию 5.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Ю.С. Воробьев, ИПМАШ НАНУ, г. Харьков; д-р техн. наук, профессор Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.