

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ВГТД В УСЛОВИЯХ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАССЕЙЯНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Гишваров А.С., Приб И.В., Гатин Р.М.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Идентификация состояния авиационных ГТД, проводимая с применением термогазодинамических моделей [1, 2], как правило, проводится в условиях наличия статистического рассеяния, обусловленного погрешностями:

- используемых приборов контроля;
- термогазодинамической модели, включая погрешности приближений, рабочих характеристик узлов двигателя и т.д.;
- используемого метода идентификации модели и др.

Естественно, что перечисленные погрешности снижают вероятность принятия правильного решения о состоянии элементов и узлов двигателя. При этом очевидно, что степень влияния погрешности на эффективность используемых методов идентификации может быть различной.

Ранее авторами данной работы была исследована эффективность методов идентификации состояния ГТД при условии отсутствия погрешности контролируемых параметров [3,4,5]. Целью данной работы является проведение сравнения эффективности методов идентификации в условиях наличия рассеяния контролируемых параметров.

Исследование проводилось имитационным математическим моделированием на термогазодинамической модели вспомогательного газотурбинного двигателя (ВГТД) ТА-6А.

Исследовались следующие методы идентификации [1, 2, 3]:

- А – метод диагностических матриц;
- Б – метод, основанный на решении системы нормальных уравнений;
- В – метод, основанный на нелинейной оптимизации параметров состояния двигателя;
- Г – метод уравнивания с квадратичной целевой функцией;
- Д – метод уравнивания с модульной целевой функцией;
- Е – модифицированный метод диагностических матриц.

Контролируемыми параметрами являлись:

- расход топлива G_T ;
- температура воздуха за компрессором T_K^* ;
- температура газа за турбиной T_T^* .

При моделировании погрешности контролируемых параметров соответствовали метрологическим характеристикам их измерительных каналов.

Идентифицировалось 100 дефектных состояний двигателя, характеризующихся отклонениями следующих параметров состояния узлов газозапускающего тракта (δx_i ($i = \overline{1,5}$)):

- коэффициента восстановления полного давления во входном устройстве $\sigma_{вх}$;
- КПД компрессора $\eta_{кв}^*$;
- коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания $\sigma_{кс}$;
- КПД турбины $\eta_{т}^*$;
- коэффициента изменения массового расхода в сопле μ_c .

Глубина развития дефектов варьировалась от 1 до 10%.

Эффективность идентификации состояния оценивалась вероятностью распознавания дефекта; при одиночном дефекте ($n = 1$) оценка проводилась по формуле

$$P(\alpha \leq x_i \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2} dx = \frac{1}{2} \Phi(u_2) - \frac{1}{2} \Phi(u_1), \quad (1)$$

где α и β – пределы интегрирования, характеризующие граничные значения рассеяния параметров состояния x_i , обусловленные погрешностью термодинамической модели двигателя; $\Phi(u)$ – функция Лапласа;

$$u_1 = \frac{\alpha - \bar{x}}{\sigma(x_i)}, \quad u_2 = \frac{\beta - \bar{x}}{\sigma(x_i)}; \quad \bar{x} \text{ и } \sigma(x_i) - \text{математическое ожидание и среднее}$$

квадратичное отклонение параметра состояния.

При парных и более высокого уровня дефектах ($n > 1$) эффективность идентификации оценивалась обобщенным показателем в виде произведения n вероятностей распознавания

$$P(\alpha \leq x_1 \leq \beta; \dots; \alpha_n \leq x_n \leq \beta_n) = \prod_{i=1}^n P(\alpha_i \leq x_i \leq \beta_i). \quad (2)$$

Предварительными исследованиями было установлено, что при нормальном законе рассеяния погрешности контролируемых параметров идентифицируемые параметры состояния также распределены по нормальному закону, а их граничные значения соответствуют граничным значениям рассеяния контролируемых параметров. Поэтому математическое ожидание \bar{x} и среднее квадратичное отклонение $\sigma(x_i)$ идентифицируемых параметров определялось по формуле

$$\bar{x} = \frac{x^+ + x^-}{2}; \quad \sigma(x_i) = \frac{x^+ - x^-}{\sqrt{6}},$$

где x^+ , x^- – верхнее и нижнее граничные значения параметра состояния.

Результаты исследования эффективности методов идентификации

состояния ВГТД ТА-6А приведены в табл. 1, где дана сравнительная оценка эффективности методов по двум критериям: вероятности распознавания состояния двигателя $P_{\Sigma} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n P_i$ и бальной оценки Э (при Э = 1 – эффективность наивысшая, при Э = 4 – эффективность наименьшая).

Таблица 1
Эффективности методов идентификации состояния ВГТД ТА-6А

Метод	Вероятность распознавания состояния при числе идентифицируемых параметров, равном n					P_{Σ}	Э
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5		
А	0	0	0	0	0	0	4
Б	0.43	0.12	0	0	0	0.11	2
В	0.41	0.13	0	0	0	0.11	2
Г	0	0	0	0	0	0	4
Д	0.21	0.03	0	0	0	0.05	3
Е	0.51	0.12	0	0	0	0.13	1

В целом, проведенное исследование показало следующее:

1. При одинарных дефектах ($n = 1, m \leq 3$) наиболее эффективным является модифицированный метод диагностических матриц ($P = 0.51$), при котором идентификация проводится по одному наиболее информативному контролируемому параметру ($n = m = 1$). Уменьшение числа контролируемых параметров, используемых для идентификации состояния, путем исключения менее информативных позволяет повысить вероятность распознавания дефекта. Вторым по эффективности является метод, основанный на решении системы нормальных уравнений ($P = 0.43$), третьим – метод, основанный на нелинейной оптимизации параметров состояния двигателя ($P = 0.41$).

2. При наличии двух дефектов ($n = 2, m \leq 3$) эффективность методов резко падает. При этом практически одинаковую эффективность имеют методы Б, В и Е. Несколько большая эффективность метода В ($P = 0.13$) объясняется более высокой, по сравнению с другими методами, устойчивостью оценок параметров состояния.

3. Нулевая эффективность метода диагностических матриц (метод А) при $n = 1$ и $n = 2$ объясняется большой погрешностью оценки коэффициентов влияния, проводимой по линейной математической модели двигателя и не учитывающей изменение состояния двигателя. Применение численной линеаризации однофакторным экспериментом и метода последовательных приближений (что реализовано в методе Е) позволяет

повысить эффективность данного метода.

4. При наличии трех и более дефектов ($n \geq 3, m = 3$) все методы идентификации имеют нулевую вероятность распознавания дефектов.

5. Низкая эффективность методов уравнивания обусловлена видом используемой целевой функции, минимизирующей “невязку”, в первую очередь, по параметрам с большими значениями коэффициентов влияния, что не позволяет распознавать парные дефекты, а также дефекты с незначительными отклонениями контролируемых параметров. При этом по мере развития дефекта эффективность методов уравнивания снижается.

6. Увеличение погрешности контролируемых параметров снижает вероятность распознавания состояния двигателя, например, при идентификации состояния турбины увеличение погрешности в 3 раза (с $\sigma(P)=0.8\%$ до $\sigma(P)=2.5\%$) ведет к снижению вероятности распознавания состояния в 1.5...2.3 раза (рис.1). Это объясняется тем, что увеличение погрешности контролируемых параметров ведет при идентификации к росту дополнительных “невязок” по контролируемым параметрам $\delta P^{погр}$ и δP^{TC} , не связанных друг с другом (в отличие от “невязок”, характеризующих отклонение от истинного состояния двигателя и связанных друг с другом через математическую модель двигателя).

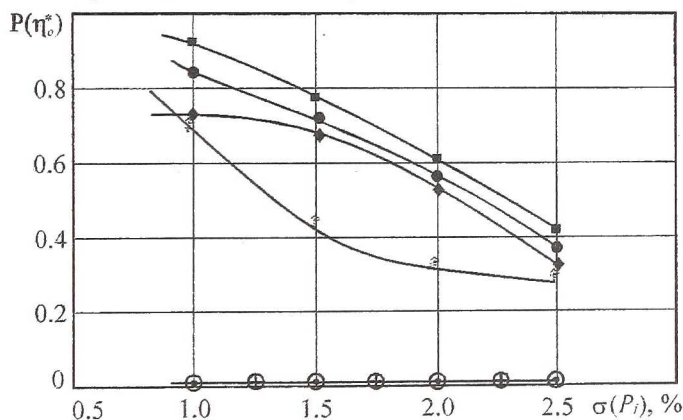


Рис. 1. Зависимость вероятности распознавания КПД турбины ВГТД ТА-6А от погрешности контроля параметров $\sigma(P)$ ($P=[G_T^*, T_K^*, T_T^*]^T$) при различных методах идентификации состояния:

—○— метод А; —◆— метод Б; —●— метод В;
—⊕— метод Г; —⊖— метод Д; —■— метод Е

При $n = 1$ “невязки” по контролируемым параметрам обратно пропорциональны коэффициентам влияния (табл. 2)

$$[\delta x_i^{TC} + \delta x_i^{погр.}] \cdot \frac{\partial P_j}{\partial x_i} = \delta P^{TC} + \delta P^{погр.},$$

т.е. чем больше значение коэффициента влияния $\partial P_j / \partial x_i$, тем выше вероятность правильного распознавания дефекта. Поэтому важно правильно определить перечень контролируемых параметров, используемых для идентификации, а также режим работы двигателя, от которого зависят значения коэффициентов влияния.

Таблица 2

Значения коэффициентов влияния

Параметр	Коэффициенты влияния $\frac{\partial P_j}{\partial x_i}$					$\sum_{j=1}^n \left \frac{\partial P_j}{\partial x_i} \right $
	$x_1 = \sigma_{вх}$	$x_2 = \eta_k^*$	$x_3 = \sigma_{кв}$	$x_4 = \eta_T^*$	$x_5 = \mu_c$	
T_T^*	-0.89	-1.79	-0.96	-1.6	-0.61	5.85
G_T	-0.18	-2.85	-1.20	-2.32	-0.90	7.45
T_k^*	-0.01	-0.88	-0.38	-0.17	-0.07	1.51
$\sum_{j=1}^m \left \frac{\partial P_j}{\partial x_i} \right $	1.08	5.52	2.54	4.09	1.58	

Количество и номенклатура контролируемых параметров, а также режим, на котором проводится контроль состояния, непосредственно влияют на обусловленность системы нормальных уравнений, решением которой проводится оценка идентифицируемых параметров состояния.

7. Для повышения вероятности распознавания состояния двигателя можно рекомендовать следующее:

- уменьшать количество учитываемых при идентификации контролируемых параметров путем исключения малоинформативных параметров до $m = n$ для метода Б и до $m < n$ – для метода, использующего нелинейную оптимизацию. При этом снижение не должно приводить к ухудшению обусловленности матрицы нормальных уравнений;
- идентификацию состояния проводить на оптимальном режиме работы двигателя.

Список литературы

1. Адгамов Р.И., Боровик В.О., Дмитриев С.В. и др. Обработка и анализ информации при автоматизированных испытаниях ГТД. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 216.
2. Ахмедзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состоя-

- ния ВРД по термогазодинамическим параметрам – М.: Машиностроение, 1983. – С. 206.
3. Гишваров А.С., Приб И.В. Эффективность методов параметрической диагностики состояния газотурбинных двигателей. // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей. Уфа, УГАТУ, 2002. № 20 – С. 157–169.
 4. Приб И.В. Повышение достоверности оценки технического состояния двигателей в условиях ограниченной исходной информации. // Сб. науч. трудов “Вестник УГАТУ”, Уфа, УГАТУ, 2002. – С. 208–211.
 5. Гишваров А.С., Приб И.В. Оценка технического состояния двигателей в условиях ограниченной информации по термогазодинамическим параметрам. // Сб. трудов ЦАГИ, Москва, 2001 г.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ РАЗБАВЛЕНИЯ НА ВЫХОДНОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ С ПОВОРОТОМ ПОТОКА ПЕРЕД ТУРБИНОЙ

Кузнецов С.Ю., Харитонов В.Ф.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Анализ развития газотурбинных двигателей показывает, что параметры воздуха перед камерой сгорания непрерывно возрастают. В настоящее время величина полного давления за компрессором достигает 3,5...4,0 МПа, а температура 800...900 К. С уменьшением коэффициента избытка воздуха сокращается длина камеры сгорания. Несмотря на рост температуры газа и уменьшение длины камеры, неравномерность поля температур на выходе из камеры сгорания должна сохраняться на том же уровне, что и ранее. Таким образом, обеспечение приемлемой температурной неравномерности газа перед сопловым аппаратом турбины усложняется и остается по-прежнему одной из главных и трудоемких задач при доводке камер сгорания.

Форма поля температуры газа на выходе из камеры является результатом взаимодействия сложных пространственных течений в жаровой трубе, что трудно поддается аналитическому описанию. В связи с этим одним из возможных путей решения задачи доводки является выявление влияния основных геометрических и режимных параметров камеры на поля температур. Исследования можно проводить либо на моделях камер сгорания в упрощенных условиях без горения топлива, либо на отсеках, либо на полноразмерных камерах сгорания. Наряду с экспериментальными методами возможно применение численных методов моделирования газодинамиче-