

УДК 621.452.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ГТД

А. С. Гишваров<sup>1</sup>, А. Г. Алгушаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ad@mail.rb.ru, <sup>2</sup>b\_1\_4@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 20 марта 2014 г.

**Аннотация.** Проведен анализ эффективности методов параметрической диагностики и состояния ГТД. Исследовано влияние на эффективность диагностики состояния ГТД используемого метода идентификации состояния двигателя, числа, номенклатуры и рассеяния контролируемых параметров, а также режима работы двигателя, на котором проводится диагностика его состояния [1].

**Ключевые слова:** математическая модель, газотурбинный двигатель, параметрическая диагностика; достоверность оценки.

Известно, что основателем параметрической диагностики состояния ГТД, проводимой с применением математических моделей рабочих процессов, является Л. Урбан [1]. При этом для локализации неисправностей и выбора диагностических параметров используются таблицы коэффициентов влияния линейных математических моделей двигателей. В дальнейшем данный метод диагностирования получил развитие в работах многих авторов [2, 3]. Наиболее исследованными из методов являются:

- метод диагностических матриц (метод А);
- метод идентификации состояния двигателя, основанный на решении системы нормальных уравнений (метод Б);
- метод идентификации, основанный на нелинейной оптимизации критерия, характеризующего состояние двигателя (метод В);
- метод идентификации состояния двигателя, основанный на уравнивании методом наименьших квадратов (метод Г);
- метод идентификации состояние двигателя, основанный на уравнивании методом наименьших модулей (метод Д).

Очевидно, что ввиду того, что системы диагностирования обладают методическими и инструментальными погрешностями, результаты диагностики состояния могут не совпадать с реальным состоянием двигателя. Это делает актуальной задачу исследования эффективности данных методов.

Как правило, в качестве критериев эффективности диагностики состояния принимаются:

- величина  $\delta$ , характеризующая фактический уровень средней суммарной «невязки» по контролируемым параметрам двигателя (при-

знакам состояния) и определяемая по формуле [2]:

$$\delta = \frac{1}{m \cdot z} \cdot \sum_{ij}^{mz} (P_{ij}^M - P_{ij}^3)^2, \quad (1)$$

где  $P_{ij}^M, P_{ij}^3$  – соответственно рассчитанное по модели и измеренное значение контролируемого параметра;  $z$  – число замеров;  $m$  – количество контролируемых параметров.

- величина  $\delta_x$ , характеризующая среднюю остаточную «невязку» по параметрам состояния узлов двигателя, определяемая по формуле:

$$\delta_x = \frac{1}{n \cdot z} \cdot \sum_{ij}^{nz} (x_{ij} - x_{ij}^n)^2, \quad (2)$$

где  $x_{ij}, x_{ij}^n$  – соответственно идентифицированное определение по модели и действительное значение параметра состояния узлов двигателя;  $n$  – количество идентифицируемых параметров состояния узлов двигателя.

Следует отметить, что показатель (1), в соответствии с видом реализуемой при идентификации состояния целевой функции, для методов Б и В является решающим правилом при выборе окончательных значений поправок к параметрам состояния и не может выступать критерием эффективности методов, поскольку минимизация величины  $\delta$  не гарантирует достоверную оценку состояния двигателя.

Из формулы (2) видно, что показатель эффективности  $\delta_x$  является осредненной величиной по всем идентифицируемым (диагностируемым) параметрам состояния узлов двигателя и не позволяет оценивать их точность определения.

В условиях статистического рассеяния контролируемых параметров двигателя, обусловленного погрешностями их измерений, задача идентификации состояния двигателя носит вероятностный характер. Поэтому основным критерием качества диагностирования является вероятность достоверной оценки состояния  $P$ , т. е. полная вероятность того, что система диагностирования определяет то техническое состояние, в котором действительно находится двигатель. Оценка значения вероятности  $P$  проводится с учетом числа диагностических параметров и вида их распределения, точностных характеристик, возможности наличия скрытых отказов и надежности средств диагностики состояния.

При оценке эффективности методов диагностики состояния, основанных на идентификации математической модели рабочих процессов двигателя, вероятность достоверной оценки состояния определяется по формуле:

$$P(\alpha \leq x_i \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2} dx, \quad (3)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – пределы интегрирования, определяемые рассеянием параметров состояния  $x_i$ , обусловленным ошибкой оценки по модели;  $\sigma(x_i)$  – среднеквадратичное отклонение значения идентифицируемого параметра, обусловленное погрешностью контролируемых параметров и точностью применяемого метода диагностирования.

Как правило, к перечисленным показателям достоверности диагностики состояния могут добавляться еще ряд показателей, определяющих, например, продолжительность, стоимость, трудоемкость диагностики и глубину поиска дефекта и др.

На качество параметрической диагностики состояния также влияют такие факторы как [4]:

- уровень сложности математической модели двигателя;
- используемый метод идентификации;
- уровень контролепригодности двигателя;
- конструктивные особенности двигателя;
- состояние двигателя;
- условия проведения контроля, (режима работы двигателя и др);
- соотношение числа контролируемых  $m$  и идентифицируемых  $n$  параметров состояния двигателя  $K = m/n$ ;
- значение критерия обусловленности Тюринга  $N_T$ , характеризующего устойчивость решений системы уравнений, с помощью которых определяется состояние двигателя.

Ввиду особенностей конкретного метода диагностики состояния (исходные предпосылки, вид реализуемой целевой функции, применяемый метод поиска оптимального решения) указанные факторы оказывают различное влияние на эффективность каждого метода [4, 5].

Определение оптимальной области реализации для каждого метода идентификации проводится путем исследования их эффективности в одинаковых условиях:

- по виду математической модели ГТД;
- по перечню и точности контролируемых параметров;
- по перечню варьируемых (идентифицируемых) параметров состояния;
- по виду и глубине дефектов и др.

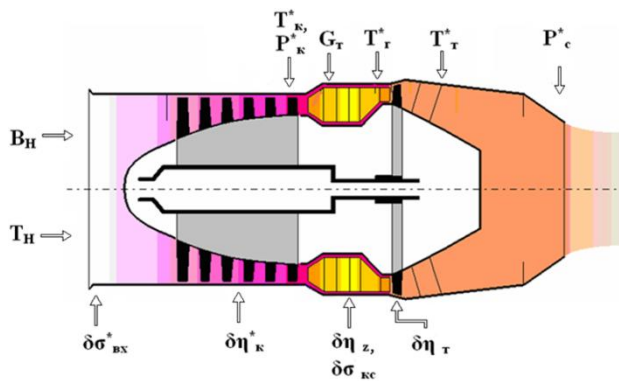
По результатам исследования формируется правило выбора метода диагностики состояния, применение которого в каждом конкретном случае позволяет получить наиболее точный результат в плане оценки состояния двигателя.

#### **ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА И НОМЕНКЛАТУРЫ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЕГО СОСТОЯНИЯ**

Существующие методы идентификации математических моделей ГТД основываются на решении систем линейных алгебраических или трансцендентных уравнений, которые находятся с применением матричных или численных методов [1–3].

Зачастую такие системы уравнений являются плохо обусловленными, что не позволяет получить однозначное решение. В нашем случае при решении задач параметрической диагностики плохая обусловленность решаемых систем уравнений является следствием ограниченности объема исходной информации, которая может выражаться в малом количестве контролируемых параметров или их низкой информативности. Поэтому влияние числа и номенклатуры контролируемых параметров определяется обусловленностью решаемой системы уравнений и степенью влияния идентифицируемых параметров состояния на контролируемые параметры двигателя.

Рассмотрим влияние числа и информативности контролируемых параметров на примере газотурбинной силовой установки (СУ) ТА-6А.



**Рис. 1.** Контролируемые параметры и параметры состояния узлов СУ ТА-6А:  
 контролируемые параметры  $G_T; T_k^*; P_k^*; T_T^*; P_c^;$   
 параметры состояния  $\delta\eta_k^*; \delta\eta_T^*; \delta\sigma_{vx}^*; \delta\eta_z^*; \delta\sigma_{kc}^;$

В качестве контролируемых рассматривались параметры (рис. 1):

$G_T$  – расход топлива;

$T_k^*$  – температура воздуха за компрессором;

$P_k^*$  – давление воздуха за компрессором;

$T_T^*$  – температура газа за камерой сгорания;

$P_c^*$  – давление газа на срезе сопла.

Штатными параметрами контроля для данной СУ являются параметры  $G_T; T_k^*; T_T^*$ .

В качестве параметров состояния узлов СУ рассматривались (рис. 1):

$\sigma_{vx}^*$  – коэффициент восстановления давления на входе в двигатель;

$\eta_k^*$  – КПД компрессора;

$\eta_z^*$  – коэффициент полноты сгорания топлива в камере сгорания;

$\sigma_{kc}^*$  – коэффициент восстановления давления в камере сгорания;

$\eta_T^*$  – КПД турбины.

В табл. 1 приведена матрица коэффициентов влияния СУ для стандартных атмосферных условий и режима работы, соответствующего отбираемому воздуху  $G_{отб.}$  в количестве 1,35 кг/с (КП – контролируемый параметр).

Из табл. 1 видно, что для рассматриваемого перечня варьируемых параметров и режима работы СУ наиболее информативными контролируемыми параметрами являются расход топлива  $G_T$  и температура газа за турбиной  $T_T^*$ . Температура воздуха за компрессором  $T_k^*$  имеет низкую информативность и поэтому её необходимо исключить из списка учитываемых при идентификации состояния СУ. Параметр  $G_T$  также является малоинформативным параметром при диагностировании состояния входного устройства силовой установки.

Параметр  $G_T$  также является малоинформативным параметром при диагностировании состояния входного устройства силовой установки.

Таблица 1

КП	Коэффициент влияния для параметра состояния					$\sum_{i=1}^n \left  \frac{\partial P_j}{\partial x_i} \right $
	$\sigma_{vx}^*$	$\eta_k^*$	$\sigma_{kc}^*$	$\eta_T^*$	$\mu_c$	
$T_T^*$	-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	

Таким образом, исключение малоинформативных параметров из списка учитываемых при диагностике состояния позволяет повысить вероятность распознавания дефектов. Рассмотрим это на примере диагностики состояния входного устройства СУ методом, основанным на решении системы нормальных уравнений (метод Б). Погрешности контроля параметров  $G_T, T_T^*, T_k^*$  приняты равными  $\pm 3\sigma = \pm 1,5\%$ .

Результаты диагностики состояния приведены в табл. 2, откуда видно, что максимальная вероятность распознавания состояния входного устройства СУ соответствует идентификации состояния по контролируемому параметру  $T_T^*$ , а учет при диагностике состояния менее информативных параметров  $G_T$  и  $T_k^*$  снижает достоверность диагностики состояния на 13 %.

Таблица 2

№	Контролируемый параметр	Вероятность распознавания состояния входного устройства $P(\sigma_{ex})$
1	$G_T$	0,08
2	$T_T^*$	0,30
3	$T_k^*$	0,07
4	$G_T, T_T^*$	0,26
5	$G_T, T_k^*$	0,07
6	$T_T^*, T_k^*$	0,30
7	$G_T, T_T^*, T_k^*$	0,26

Очевидно, что из двух одинаковых по информативности контролируемых параметров наиболее ценным является тот, который имеет меньшую погрешность контроля.

Рассмотрим влияние информативности контролируемых параметров на вероятность распознавания состояния входного устройства и турбины СУ (табл. 3). Диагностика состояния

проводилась с применением метода нелинейной оптимизации (метод В).

Из табл. 3 видно, что для входного устройства наиболее информативным контролируемым параметром является температура газа за турбиной ( $T_T^*$ ), а для турбины – параметры  $G_T$  и  $T_T^*$  ( $P = 1,0$ ).

При этом максимальное значение вероятности распознавания состояния входного устройства СУ достигается при наиболее точном контроле наиболее информативного параметра  $T_T^*$  ( $P = 0,95$ ), а повышение точности контроля параметров  $G_T$  и  $T_k^*$  не дает такого эффекта. Аналогичная ситуация наблюдается и при диагностике состояния турбины двигателя ( $\eta_T^*$ ), что объясняется тем, что при идентификации, в первую очередь, минимизируются «невязки» по наиболее информативным контролируемым параметрам СУ.

Таблица 3

№	Погрешность контроля параметра $\pm 3\sigma$ , %			Вероятность распознавания состояния двигателя	
	$G_T$	$T_T^*$	$T_k^*$	$P(\sigma_{ex})$	$P(\eta_T^*)$
1	0	0	0	1,0	1,0
2	1,5	0	0	0,95	0,95
3	0	1,5	0	0,29	0,98
4	0	0	1,5	1,0	1,0
5	0	1,5	1,5	0,29	0,95
6	1,5	0	1,5	0,95	0,95
7	1,5	1,5	0	0,26	0,68
8	1,5	1,5	1,5	0,26	0,68

Оптимизируемая целевая функция при диагностике состояния методом нелинейной оптимизации представляет собой сумму критериев оптимальности («невязок» по контролируемым параметрам), которые являются неравнозначными. При этом наиболее значимым является критерий, на который параметры состояния оказывают наибольшее влияние, следовательно, такой параметр является наиболее информативным для оценки состояния СУ. Поэтому повышение достоверности диагностики состояния за счет повышения точности контролируемых параметров оправдано только в том случае, если обеспечивается более точный контроль наиболее информативных параметров. Из табл. 3 (строки под номерами 4, 7, 8) видно, что в данном случае повышение точности контроля малоинформативного параметра  $T_k^*$  не целесообразно, поскольку он не влияет на достоверность диагностики состояния.

Таким образом, повышение вероятности распознавания состояния узлов СУ в условиях статистического рассеяния контролируемых параметров возможно за счет:

- снижения числа контролируемых параметров (до  $m = n$  для метода Б или до  $m < n$  для метода В) путем исключения из рассмотрения при диагностике состояния малоинформативных параметров (рис. 2, а, б).
- увеличения числа более информативных контролируемых параметров (рис. 2, в).

Очевидно, что снижение числа контролируемых параметров оправдано только в том случае, если это не приводит к ухудшению показателя обусловленности матрицы коэффициентов влияния. Поэтому при формировании перечня контролируемых параметров необходимо также учитывать значение числа Тюринга  $N_T$ .

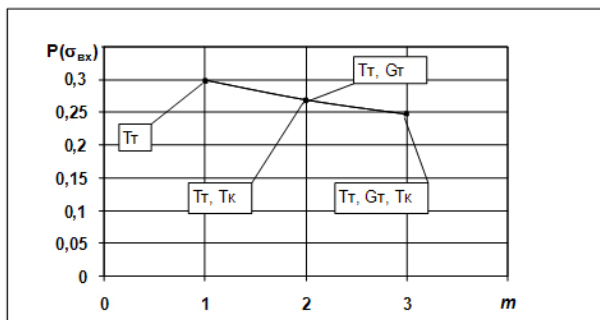
### ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЕГО СОСТОЯНИЯ

Выбор оптимальных для диагностики состояния режимных параметров, также как и контролируемых, позволяет повысить вероятность распознавания состояния СУ.

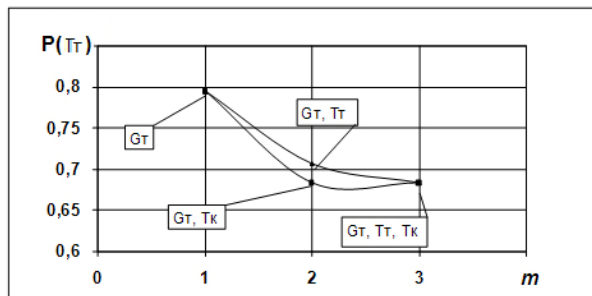
При этом следует учитывать, что для каждого параметра состояния и контролируемого параметра существует свой наиболее информативный режим работы, на котором неисправности проявляются на более ранней стадии их развития.

Рассмотрим влияние режима работы СУ на информативность контролируемых параметров. Данная СУ является однорежимной по частоте вращения ротора, а изменение режима работы определяется изменением расхода воздуха  $G_{omb}$ , отбираемого за компрессором. Зависимость информативности контролируемых параметров от режима работы СУ при диагностике состояния входного устройства и турбины приведена в табл. 4. В качестве контролируемых параметров рассматривались:  $G_T$ ,  $T_T^*$  и  $T_k^*$  с погрешностью контроля параметров  $\pm 3\sigma = \pm 1,5\%$ .

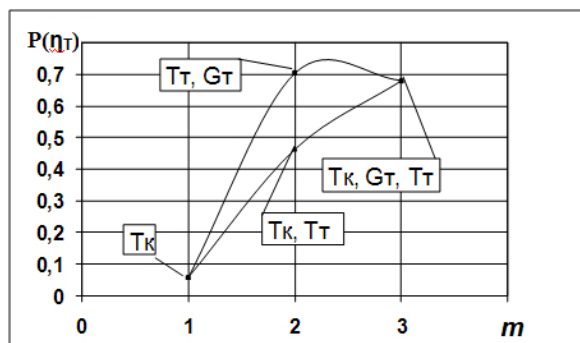
Из табл. 4 видно, что при диагностике состояния входного устройства уменьшение  $G_{omb}$  позволяет в 7 раз повысить информативность параметра  $G_T$ , а при диагностике состояния турбины СУ – в 1,4 раза повысить информативность параметра  $T_T^*$  и в 1,2 раза повысить информативность параметра  $G_T$ .



а



б



в

**Рис. 2.** Влияние числа и номенклатуры контролируемых параметров на вероятность распознавания состояния СУ

Результаты диагностики состояния входного устройства СУ на режиме, соответствующем  $G_{отб.}=0,8$  кг/с, приведены в табл. 5, откуда видно, что уменьшение  $G_{отб.}$  с 1,35 кг/с до 0,8 кг/с позволяет в 2 раза повысить вероятность распознавания состояния входного устройства СУ.

Таблица 4

Контролируемый параметр	Коэффициент влияния для параметра состояния $\partial P_j / \partial x_i$			
	$G_{отб.}=0,8$ кг/с		$G_{отб.}=1,35$ кг/с	
	$\sigma_{вх}$	$\eta_T^*$	$\sigma_{вх}$	$\eta_T^*$
$T_T^*$	0,11	-2,29	-0,89	-1,60
$G_T$	1,22	-2,75	-0,18	-2,32
$T_k^*$	0,05	-0,20	-0,01	-0,17

Таблица 5

Контролируемые параметры	Вероятность распознавания состояния входного устройства двигателя $P(\sigma_{вх})$	
	$G_{отб.}=0,8$ кг/с	$G_{отб.}=1,35$ кг/с
$G_T, T_T^*, T_k^*$	0,52	0,26

Выбор оптимального режима диагностики состояния с учетом значения числа Тьюринга  $N_T$  позволяет корректировать показатель обусловленности решаемой системы уравнений и получать однозначное решение при неизменном перечне варьируемых и контролируемых параметров СУ. В табл. 6 приведены результаты диагностики состояния входного устройства и турбины СУ на различных режимах с применением метода Б, откуда видно, что изменение режима позволяет получить однозначное решение о состоянии СУ.

Рассмотрим влияние режима работы на информативность контролируемых параметров ТРДД Д-30КУ, устанавливаемого на самолете Ту-154М.

Таблица 6

КП	Режим работы двигателя							
	$G_{отб.}=0,8$ кг/с				$G_{отб.}=1,35$ кг/с			
$T_T^*$	$\Delta\sigma_{вх}, \%$	$\Delta\eta_T^*, \%$	$N_T$	$K_{D_i}^m$	$\Delta\sigma_{вх}, \%$	$\Delta\eta_T^*, \%$	$N_T$	$K_{D_i}^m$
$T_k^*$	5	3	1250	0,8	0,08	0,06	480	2,1

*Примечание:*  $\Delta\sigma_{вх}, \Delta\eta_T^*$  – погрешность оценки параметров состояния; КП – контролируемый параметр.

Расчет коэффициентов влияния, с целью выявления наиболее информативного для диагностики состояния двигателя режима работы, проводился для различных режимов работы по модели рабочих процессов двигателя при  $H=10600$  м,  $M=0,81$ ,  $t_{н}^*=-30^\circ$  С и включенном отборе воздуха в систему кондиционирования, что соответствовало применяемой в настоящее время методике регистрации параметров двигателей воздушных судов гражданской авиации России.

Результаты определения наиболее информативного режима работы для диагностики состояния  $n$  узлов двигателя (компрессоров и турбин высокого и низкого давления, камеры сгорания) по  $m$  контролируемым параметрам приведены в табл. 7.

Таблица 7

Режим работы двигателя	Значение $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n abs[\partial P_j / \partial x_i]$ для параметра двигателя, %									$\sum_{j=1}^m \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n abs \left[ \frac{\partial P_j}{\partial x_i} \right] \right\}$
	$P_{кнд}^*$	$P_{квд}^*$	$G_T$	$T_{г}^*$	$T_{т}^*$	$n_{нд}$	$T_{см}^*$	$G_{в\Sigma}$	$R$	
«0,6 ном.»	0,24	0,13	0,75	0,45	0,60	0,22	0,30	0,25	0,73	3,67
«0,8 ном.»	0,30	0,18	0,80	0,47	0,62	0,23	0,35	0,28	0,76	3,99
«взлетный»	0,38	0,22	0,82	0,46	0,62	0,26	0,41	0,32	0,73	4,22

Примечание: «ном.» – номинальный режим работы двигателя. Коэффициенты влияния приведены в процентах от исходных значений контролируемых параметров. Режим «0.6 ном» соответствует режиму начала автоматического регулирования (НАР)

Таблица 8

Контролируемый параметр	Коэффициент влияния параметра состояния на контролируемый параметр					$\sum_{i=1}^n \left  \frac{\partial P_j}{\partial x_i} \right $
	$\sigma_{ex}$	$\eta_k^*$	$\sigma_{kc}$	$\eta_T^*$	$\mu_c$	
$T_T^*$	-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	

Из табл. 7 видно, что для рассматриваемого перечня параметров наиболее информативными для диагностики состояния двигателя являются: расход топлива  $G_T$ , тяга двигателя  $R$ , температура газа за турбиной низкого давления  $T_{т}^*$ , температура газа перед турбиной высокого давления  $T_{г}^*$  и температура рабочего тела в камере смешения  $T_{см}^*$ .

Информативность данных параметров максимальна на «взлетном» режиме работы двигателя за исключением параметров  $R$  и  $T_{г}^*$ , для которых информативность выше на режиме «0.8 ном.». По мере усиления режима работы двигателя в значительной степени (на 60 %) повышается информативность давления воздуха за компрессором  $P_{кнд}^*$ .

Высокая информативность взлетного режима подтверждается и статистическими данными по дефектам и отказам двигателя в эксплуатирующей авиакомпании (рис. 3). При этом параметрические отказы, выявляемые на режиме «малый газ» и режиме, соответствующем началу автоматического регулирования, сводятся в основном к несоответствию частоты вращения роторов и определяются отклонениями в работе топливо-регулирующей аппаратуры.

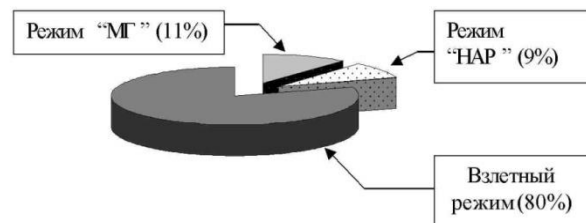


Рис. 3. Распределение параметрических отказов двигателя Д-30КУ, выявляемых на различных режимах его работы

### ВЛИЯНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СУ

Статистическое рассеивание контролируемых параметров СУ, являющееся следствием погрешностей измерения в ряде случаев может привести к ошибочным выводам о состоянии узлов двигателя. В ходе исследований моделирование погрешностей контролируемых параметров проводилось наложением рассеяния на контролируемые параметры двигателя.

В качестве контролируемых рассматривались: расход топлива  $G_T$ , температура воздуха за компрессором  $T_k^*$  и температура газа за турбиной  $T_{г}^*$ . Рассеяние контролируемых парамет-



ров соответствовало нормальному закону распределения.

Принятые погрешности контролируемых параметров соответствовали метрологическим характеристикам измерительных каналов, применяемых в настоящее время бортовых систем регистрации параметров двигателей  $\pm 3\sigma(P_j) = 1,5\%$ .

Точность оценки состояния оценивалась вероятностью распознавания дефекта, определяемой по формуле (3).

Сочетания (комбинации) параметров состояния формировались из пяти параметров: коэффициента восстановления полного давления во входном устройстве  $\sigma_{вх}$ , КПД компрессора  $\eta^*_к$ , коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания  $\sigma_{к/с}$ , КПД турбины  $\eta^*$  и коэффициента изменения массового расхода в реактивном сопле  $\mu_c$ .

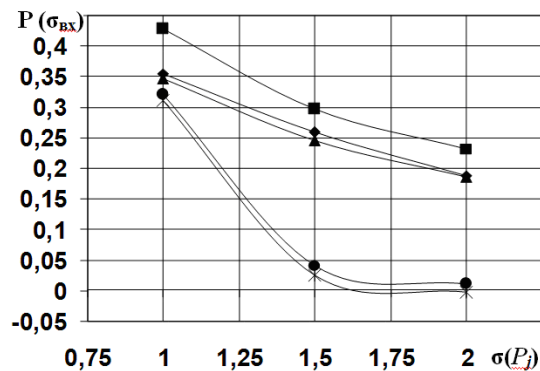
Исследование показало следующее.

1. Увеличение погрешности контролируемых параметров ведет к снижению вероятности распознавания состояния двигателя независимо от применяемого метода диагностики состояния при идентификации любым методом и любого состояния узла двигателя (рис. 4).

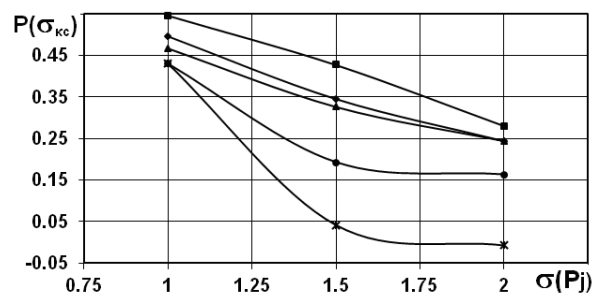
2. Наличие погрешности контролируемых параметров ведет к возникновению дополнительных «невязок» по контролируемым параметрам  $\delta_{P_j}^{ногр.}$ . Поэтому при параметрической диагностике состояния минимизируются «невязки», обусловленные изменением состояния двигателя и наличием погрешности контролируемых параметров. Это, естественно, ведет к искажению оценки параметров состояния двигателя. Особенностью «невязок», обусловленных погрешностями контроля  $\delta_{P_j}^{ногр.}$ , является то, что они не связаны друг с другом (как «невязки», возникающие при изменении технического состояния двигателя  $\delta_{P_j}^{TC}$ ). Ошибки контролируемых параметров распределяются по параметрам состояния обратно пропорционально значениям коэффициентов влияния (табл. 8):

$$[\delta x_i^{TC} + \delta x_i^{ногр.}] \cdot \frac{\partial P_j}{\partial x_i} = \delta_{P_j}^{TC} + \delta_{P_j}^{ногр.}, \quad (4)$$

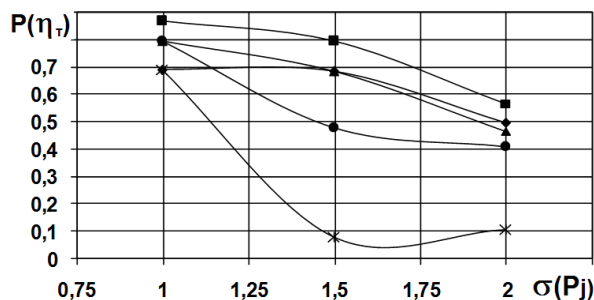
т. е. чем больше значение коэффициента влияния  $\partial P_j / \partial x_i$ , тем меньше отклонение идентифицируемого параметра состояния  $\delta x_i^{ногр.}$ , обусловленное погрешностью контроля  $\delta_{P_j}^{ногр.}$ . Поэтому при диагностике состояния важным является выбор перечня контролируемых параметров и режима работы двигателя, на котором проводится диагностирование.



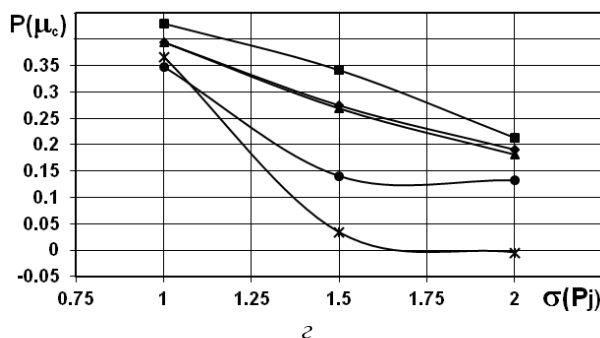
a



б



в



г

Рис. 4. Влияние погрешности контролируемых параметров двигателя на вероятность распознавания состояния входного устройства (a); камеры сгорания (б); турбины (в); реактивного сопла (г), методы: А (■); Б (◆); В (▲); Г (●); Д (×)

3. В условиях наличия погрешности контролируемых параметров идентификация состояния узлов двигателя становится затруднительной, поскольку приходится минимизировать «невязку» между случайными (внутри доверительного интервала) значениями контролируемых параметров и их значениями, определяемыми по модели рабочих процессов. Поэтому увеличение числа идентифицируемых параметров состояния приводит к снижению вероятности распознавания дефектов двигателя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. В условиях статистического рассеяния контролируемых параметров, обусловленного погрешностями их измерений, задача параметрической диагностики состояния двигателя носит вероятностный характер. Вследствие этого основным критерием качества диагностики является вероятность достоверной оценки состояния. С увеличением погрешности контролируемых параметров вероятность распознавания состояния двигателя снижается независимо от применяемого метода диагностики состояния и анализируемого перечня параметров состояния.

2. Выбор режима работы двигателя, на котором проводится диагностика, проводится варьированием количества и перечня контролируемых параметров с учетом их информативности, погрешности контроля, а также значения критерия обусловленности Тюринга. Поскольку критерии являются противоречивыми, то выбор режима диагностирования и перечня контролируемых параметров сводится к решению задачи многокритериальной оптимизации, позволяющей получить оптимальные компромиссные решения методом Парето [6].

3. При диагностике ГТД в первую очередь минимизируются «невязки» по наиболее информативным параметрам контроля.

4. Повышение вероятности распознавания состояния двигателя в условиях статистического рассеяния контролируемых параметров возможно за счет снижения числа контролируемых параметров путем исключения из процедуры диагностики состояния малоинформативных параметров и (или) добавлением более информативных параметров. При этом снижение числа контролируемых параметров оправдано только в том случае если это не приводит к ухудшению числа обусловленности решаемой при диагностировании системы уравнений.

5. Выбор режима диагностирования позволяет снять неопределенность в оценке состоя-

ния двигателя при малом объеме исходной информации за счет изменения числа обусловленности решаемой системы уравнений и повышения информативности диагностических параметров. Существует свой оптимальный режим диагностирования для конкретно рассматриваемого перечня параметров состояния ГТД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урбан Л. Выбор параметров для диагностики дефектов газотурбинного двигателя // Энергетические машины и установки / Пер. с англ. 1985. № 2. С. 87–94. [L. Urban, "Selection of parameters for the diagnosis of defects in gas turbine engine," *Energeticheskie mashiny i ustanovki*, no. 2, pp. 87-94, 1985.]

2. Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. М.: Машиностроение, 1983. 206 с. [A. M. Ahmedzyanov, N. G. Dubravskiy, A. P. Tunakov, *Diagnosis of the state of air jet on termogazodinamicheskikh parameters*. Moscow: Mashinostroenie, 1983.]

3. Гишваров А. С., Приб И. В. Метод выбора оптимальных условий параметрического диагностирования состояния авиационных ГТД // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 2 (31). С. 3–10. [A. S. Gishvarov, I. V. Prib, "Method of selecting the optimum conditions parametric diagnosing the state of gas turbine engines," *Vestnik UGATU*, no. 2 (31), pp. 3-10, 2009.]

4. Гишваров А. С., Агеев Г. К. Повышение достоверности диагностирования ГТД при некорректной постановке задачи идентификации состояния // Проблемы расчета, проектирования и производства авиационно-ракетной техники: сб. тр. науч.-техн. конф. Т. 2. Уфа, УГАТУ, 2011. [A. S. Gishvarov, G. K. Ageev, "Increasing the reliability of diagnosing GTD formulation of the problem with incorrect identification of the state, (in Russian), in Proc. *Problemy rascheta, proektirovaniya b proizvodstva aviacionno-raketnoy tehniki*, 2011.]

5. Гишваров А. С., Приб И. В. Эффективность методов параметрической оценки технического состояния двигателей на основе термогазодинамических моделей // Сб. тр. УГАТУ–СГАУ. Самара: СГАУ, 2001. С. 44–50. [A. S. Gishvarov, I. V. Prib, "Effectiveness of the methods of parametric estimation of a technical condition of the engines on the basis of TGD models," in *Samara*, pp. 44-50, 2001.]

6. Гишваров А. С. Многокритериальное планирование эксперимента при исследовании технических систем. Уфа: Гилем, 2006, 328 с. [A. S. Gishvarov, *Multicriteria planning experiment in technical systems*, (in Russian). Ufa: Gilem, 2006.]

### ОБ АВТОРАХ

**ГИШВАРОВ Анас Саидович**, проф., зав. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1993). Теор. и эксп. исследования в обл. надежности, ресурса и испытаний технических систем.

**АЛГУШАЕВ Айнура Гафурович**, асп. каф. авиац. двигателей. М-р техн. и технол. по авиа- и ракетостроению (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. моделирования, прогнозирования и диагностики состояния ГТД.



**METADATA**

**Title:** Parametric study of the efficiency of methods of diagnosis status GTE.

**Authors:** A. S. Gishvarov<sup>1</sup>, . A. G. Algushaev<sup>2</sup>,

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> ad@mail.rb.ru, <sup>2</sup> b\_1\_4@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 48-56, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Analyzed the efficiency of parametric methods of diagnosis and state of GTE. The influence on the efficiency of diagnosing the state of GTE method used identify the state of the engine, the number, range and scattering of monitored parameters and modes of operation of the engine, which is diagnosed his condition [1].

**Key words:** mathematical model; gas turbine engine; parametric diagnostics; accuracy of estimates.

**About authors:**

**GISHVAROV, Anas Saidovich**, Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. engineer (USATU, 1973). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 1993).

**ALGUSHAEV, Ainur Gafurovich**, Dipl. engineer of aircraft engines (USATU, 2011).