

УДК 621.452.3–6:519.22

**М. В. ШЕВЧЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ  
НЕИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ГТД, ОСНОВАННОГО НА МЕТОДЕ  
ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ, В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ**

*Исследована погрешность разработанного ранее метода оценивания неизмеряемых параметров ГТД, основанного на построении регрессии на главных компонентах. В качестве объекта исследования рассмотрен двухконтурный трехвальный ГТД с пятью измеряемыми параметрами и двадцатью тремя, характеризующими изменение технического состояния. Имитационное моделирование исследуемого объекта проводилось с помощью его поузловой модели. В ходе исследования погрешности предложенного метода аналитически доказано влияние состава рассматриваемых характеристик узлов на точность оценивания. Выявлена принадлежность задачи оптимизации состава рассматриваемых характеристик узлов к классу NP-полных задач. Для ее решения выбран генетический алгоритм. Получены оценки неизмеряемых параметров, доказана высокая точность разработанного метода.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель (ГТД), главные компоненты, диагностирование, регрессионная модель, статистическая оценка, удельный расход топлива, тяга, генетический алгоритм.

**Список обозначений и сокращений**

А – параметр расхода через сопловой аппарат турбины;  
 $C_{уд}$  – удельный расход топлива;  
 G – массовый расход;  
 H – матрица коэффициентов влияния (МКВ);  
 $M(x)$  – математическое ожидание величины x;  
 n – частота вращения;  
 p – давление;  
 R – тяга;  
 T – температура;  
 Y – измеряемые параметры проточной части;  
 $\delta$  – относительное отклонение параметра;  
 $\pi$  – степень повышения давления;  
 $\eta$  – КПД;  
 $\mu$  – коэффициент расхода;  
 $\sigma$  – коэффициент восстановления полного давления, среднеквадратическое отклонение;  
 O – параметры характеристик узлов;  
 φ – коэффициент скорости;  
 ГТД – газотурбинный двигатель;  
 МКВ – матрица коэффициентов влияния;  
 ТРДД – турбореактивный двухконтурный двигатель;  
 ТС – техническое состояние.

**Список индексов**

\* – параметр торможения потока;  
 B – каскад вентилятора, сечение за вентилятором;  
 B1 – сечение за вентилятором во внутреннем

контуре;  
 B2 – сечение за вентилятором во внешнем контуре;  
 BД – каскад высокого давления;  
 вх – вход в компрессор;  
 в – воздух;  
 г – газ;  
 К – компрессор;  
 H – сечение невозмущенной атмосферы;  
 пр – приведенное значение параметра;  
 СД – каскад среднего давления;  
 С1 – реактивное сопло внутреннего контура;  
 С2 – реактивное сопло наружного контура;  
 Т – турбина, сечение за турбиной;  
 т – топливо;  
 Σ – суммарное значение;  
 0 – значение параметра в исправном состоянии.

**Введение**

Современные стратегии эксплуатации ГТД основываются на информации об их текущем ТС. Для полного представления о причинах и характере изменения ТС проточной части двигателя необходимо определять характеристики узлов и анализировать их изменение. Для этого необходимо знать полную температуру, полное и статическое давление на входе и выходе из каждого узла, частоты вращения роторов. На практике большая часть этой информации недоступна. Помимо недостатка информации, как правило, наблюдаются шум и отклонения показаний

датчиков, связанные с их погрешностями.

ТС двигателя в целом можно оценить по интегральным параметрам, таким как тяга и удельный расход топлива.

Точная информация о величине удельного расхода топлива позволяет определить необходимый запас топлива на полет. Точная информация о величине тяги необходима для определения длины пробега при взлете, для расчета параметров маневров и контроля работоспособности двигателя.

Режим работы двигателя может быть оптимальным с точки зрения максимальной работы цикла (максимум удельной тяги) и экономичности (минимум удельного расхода топлива). Значит, точное значение тяги необходимо для оптимального автоматического управления режимами работы двигателя.

Измерить тягу и удельный расход топлива турбореактивного двигателя непосредственно в полете невозможно. Если оценить тягу, то по известным показаниям расходомера топлива можно определить удельный расход топлива. Но топливные расходомеры, устанавливаемые на современных двигателях, обладают значительной погрешностью, вследствие чего определение удельного расхода топлива может быть очень неточным. Поэтому оценивание удельного расхода топлива ГТД на основании информации, поступающей от штатной измерительной системы двигателя, является такой же актуальной задачей, как и оценивание тяги.

Оценивание тяги ГТД в полете в реальном времени является ключевым элементом в адаптивной системе управления тягой, но связано с рядом вычислительных трудностей и на сегодняшний день не может быть выполнено с достаточной точностью.

В процессе испытаний и эксплуатации ГТД также требуется определение других неизмеряемых параметров. Этими параметрами являются степень повышения давления в компрессоре, температура газа перед турбиной, расход рабочего тела и др.

Постановка задачи оценивания тяги, как примера неизмеряемых параметров ГТД, рассмотрена в [1], ее роль в эксплуатации двигателя по состоянию – в [2]. Известные подходы к оцениванию неизмеряемых параметров ГТД, их достоинства и недостатки представлены в [3]. Авторами был предложен альтернативный метод решения задачи оценивания неизмеряемых параметров ГТД, заключающийся в построении линейной регрессии на главных компонентах линейной статической модели состояния ГТД [4–7]. В работе [6] выявлен механизм возникновения погрешности предложенного метода, связанный со смещением оценки, однако пути минимизации этой погрешности не рассмотрены.

Целью данной работы является исследование

погрешности метода, предложенного авторами в работах [4–7], ее анализ и поиск путей ее минимизации. Для проверки практической применимости разработанного метода предлагается применить его к результатам стендовых испытаний исследуемого объекта.

## 1. Объект исследования

Объектом данного исследования является трехвальный двухконтурный турбореактивный двигатель с большой степенью двухконтурности без смешения потоков. В качестве источника информации о параметрах двигателя используется его нелинейная поузловая термогазодинамическая модель [8]. Техническое состояние двигателя описывается  $m=23$  параметрами  $\bar{\Theta}$ , а изменение технического состояния описывается их относительными отклонениями  $\delta\bar{\Theta}$  (перечислены в первой строке табл. 1). Измеряемый параметр  $\pi_{кз}^*$  выбран в качестве режимного. Остальные  $n=5$  измеряемых параметров – полная температура на выходе из турбины среднего давления, частоты вращения роторов вентилятора, низкого и высокого давления и расход топлива. Их отклонения от базовых значений, соответствующих исходному исправному состоянию, возникающие в результате износа двигателя, формируют вектор  $\delta\bar{Y}$  (его компоненты перечислены в первом столбце табл. 1).

Дефекты моделировались с помощью нелинейной поузловой модели [8] заданием отклонений соответствующих характеристик узлов от базовых значений (в исправном состоянии).

Состав моделируемых дефектов согласован с работами других исследователей. Предложенный Б. Кёрноком в работе [9] состав дефектов в дальнейшем был использован для расчетов многими исследователями (П. Дьюаллеф и др. [10], К. Матиоудакис и др. [11], К. Ромессис и др. [12]). К дефектам работы [9] авторами по аналогии были добавлены дефекты ротора среднего давления. Рассмотренные дефекты узлов – представители наиболее часто встречающихся на практике, они представлены как процентные отклонения параметров состояния от их базовых значений (табл. 2).

Для примера МКВ выбранного объекта на режиме  $\pi_{кз}^*=21$  представлена в табл. 1.

## 2. Постановка задачи

Целью данной работы является исследование и поиск путей снижения погрешностей метода, предложенного авторами в работах [4–7]. Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть структуру погрешности метода.

Таблица 1

Матрица коэффициентов влияния для режима работы двигателя  $\pi_{КС}^* = 21$

	$\delta\sigma_{ВХ}$	$\delta G_{В пр}$	$\delta\eta_{В1}$	$\delta\eta_{В2}$	$\delta G_{КСД пр}$	$\delta\eta_{КСД}$	$\delta G_{КВД пр}$	$\delta\eta_{КВД}$	$\delta A_{ТВД}$	$\delta\eta_{ТВД}$	$\delta A_{ТСД}$	$\Delta\eta_{ТСД}$
$\delta T_T$	-0,4749	0,0701	-0,0813	-0,0098	0,1282	-0,8103	0,0833	-0,7513	0,4587	-0,9816	0,0940	-0,7985
$\delta n_B$	-0,2290	-0,7135	0,0238	0,2538	0,0159	-0,0686	0,0064	-0,0592	0,5742	-0,1344	0,0056	-0,1048
$\delta n_{сд}$	-0,4781	0,2291	-0,0555	-0,0847	-0,5056	0,3697	-0,0109	0,1175	0,4636	0,0965	-0,3425	0,3835
$\delta n_{вд}$	-0,2486	0,0535	-0,0412	-0,0123	0,0354	-0,3664	-0,6375	0,5551	0,0578	0,6801	0,8955	-0,2862
$\delta G_T$	-0,5121	0,0959	-0,0623	-0,0414	0,1577	-0,9448	0,0959	-0,8678	1,5590	-1,2312	0,1037	-0,9923
$\delta R_{сум}$	1,4506	-0,5305	0,0375	0,4499	0,0471	-0,2223	0,0210	-0,1955	1,4156	-0,3913	0,0192	-0,3068
$\delta C_{вд}$	-1,9916	0,6231	-0,0998	-0,4935	0,1107	-0,7209	0,0749	-0,6710	0,1454	-0,8366	0,0845	-0,6834

Продолжение таблицы 1

	$\delta A_{ТВ}$	$\delta\eta_{ТВ}$	$\Delta\sigma_{КС}$	$\delta\eta_{Г}$	$\delta\sigma_{В КСД}$	$\Delta\sigma_{КСД КВД}$	$\Delta\sigma_{ТВД ТСД}$	$\delta\mu_{C1}$	$\delta\mu_{C1}$	$\delta\mu_{C2}$	$\delta\mu_{C2}$
$\delta T_T$	-0,8518	-0,0135	-0,4019	0,0119	-0,3922	-0,5626	-0,8400	-0,0546	-0,0469	-0,0744	-0,0585
$\delta n_B$	-0,3373	0,2858	0,4610	-0,0006	-0,0229	-0,0444	-0,1162	0,1153	0,0990	0,4687	0,3690
$\delta n_{сд}$	0,4832	-0,0967	0,5441	0,0032	-0,4403	0,0887	0,0823	-0,0182	-0,0156	-0,0948	-0,0744
$\delta n_{вд}$	-0,2826	-0,0145	0,6562	0,0072	-0,2096	-0,2631	0,5832	-0,0217	-0,0188	-0,0441	-0,0347
$\delta G_T$	-1,0288	-0,0557	0,4953	-1,0317	-0,4404	-0,6510	-1,0554	-0,0844	-0,0725	-0,0467	-0,0365
$\delta R_{сум}$	-0,7198	0,4972	1,0824	-0,0055	-0,0832	-0,1467	-0,3372	0,2036	-0,0223	1,8080	0,7860
$\delta C_{вд}$	-0,3067	-0,5557	-0,5934	-1,0261	-0,3570	-0,5036	-0,7158	-0,2886	-0,0502	-1,8889	-0,8290

Таблица 2

Состав исследуемых дефектов

№	Узел с дефектом	Отклонение параметров состояния
1	В	$\delta G_{В пр} = - 1,7\%$ , $\delta\eta_{В1} = - 0,4\%$ , $\delta\eta_{В2} = - 0,5\%$
2	В	$\delta G_{В пр} = - 1\%$
3	КСД	$\delta G_{КСД пр} = - 1\%$ , $\delta\eta_{КСД} = - 0,7\%$
4	КСД	$\delta\eta_{КСД} = - 1\%$
5	КСД	$\delta G_{КСД пр} = - 1\%$
6	КВД	$\delta G_{КВД пр} = - 1\%$ , $\delta\eta_{КВД} = - 0,7\%$
7	КВД	$\delta\eta_{КВД} = - 1\%$
8	КВД	$\delta G_{КВД пр} = - 1\%$
9	ТВД	$\delta A_{ТВД пр} = + 1\%$
10	ТВД	$\delta A_{ТВД пр} = - 1\%$ , $\delta\eta_{ТВД} = - 1\%$
11	ТВД	$\Delta\eta_{ТВД} = - 1\%$
12	ТСД	$\delta A_{ТСД пр} = + 1\%$
13	ТСД	$\delta A_{ТСД пр} = - 1\%$ , $\delta\eta_{ТСД} = - 1\%$
14	ТСД	$\Delta\eta_{ТСД} = - 1\%$
15	ТВ	$\Delta\eta_{ТВ} = - 1\%$
16	ТВ	$\delta A_{ТВ пр} = - 1\%$ , $\delta\eta_{ТВ} = - 0,4\%$
17	ТВ	$\delta A_{ТВ пр} = - 1\%$
18	ТВ	$\delta A_{ТВ пр} = + 1\%$ , $\delta\eta_{ТВ} = - 0,6\%$
19	С1	$\delta\mu_{C1} = + 1\%$
20	С2	$\delta\mu_{C2} = - 1\%$
21	С2	$\delta\mu_{C2} = + 2\%$

По аналогии с общим подходом к исследованию погрешностей в измерительной технике, можно выделить два основных класса погрешностей моделирования [8]:

- методические;
- инструментальные.

В классе методических погрешностей можно выделить три группы:

- погрешности, обусловленные неадекватностью модели;
- погрешности, обусловленные используемыми

вычислительными алгоритмами;

- ошибки программной реализации.

Инструментальные погрешности обусловлены особенностями инструментальной базы, которая необходима для выполнения алгоритмов, полученных на основе разработанного метода. Инструментальной базой будем считать цифровые машины, на которых реализуются соответствующие алгоритмы, и систему измерения параметров проточной части ГТД.

Из всех вышеперечисленных погрешностей

ошибками программной реализации, отнесенными нами к классу методических погрешностей, можно пренебречь, поскольку алгоритмы, реализуемые на основе разработанного метода, достаточно просты и легко тестируются.

Неадекватность модели может быть структурной и параметрической. В данной работе в качестве источника информации об исследуемом объекте используется его нелинейная поузловая термогазодинамическая модель. Эта модель верифицирована по результатам испытаний, поэтому будем считать ее эталонной и лишенной параметрических погрешностей.

Частным случаем ошибок, обусловленных структурной неадекватностью, являются ошибки отбрасывания, которые образуются при редуцировании исходной нелинейной модели. В нашем случае это ошибки линеаризации, поскольку предложенный в [4–7] метод работает с линейной однорежимной моделью состояния. Для получения этой модели нами был использован метод двухстороннего варьирования [13]. Исследования показали, что его погрешности не превышают 0,1%.

Инструментальные погрешности, связанные с использованием вычислительных машин, можно считать пренебрежимо малыми, если следовать рекомендациям [8].

Основной интерес представляет инструментальная погрешность средств измерения параметров проточной части. В данной работе для учета этого вида погрешности применяется имитационное моделирование с введением нормально распределенного шума в каналы измерения. Так как вносимая измерительными приборами погрешность является случайной величиной, результат оценивания является случайным и характеризуется двумя величинами: математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением. Применяемая в данной работе процедура имитирования шума измерительной системы изложена в [5, 6]. Основной методической погрешностью является погрешность, обусловленная используемым вычислительным алгоритмом. Исследования показали, что именно эта погрешность оказывает наибольшее влияние на результаты оценивания разработанным методом. Ее анализ и минимизация и является главной задачей данной работы.

### 3. Решение задачи

В [14] показано, что оценки, полученные с помощью используемого авторами для оценивания неизмеряемых параметров метода главных компонент, являются смещенными. Это смещение и вызывает ошибку оценивания, обусловленную используемым вычислительным алгоритмом. В данном разделе представлен анализ структуры и величины этой ошибки.

#### 3.1. Структура погрешности используемого метода

Как было сказано ранее, рассматриваемый метод работает с линейной однорежимной моделью состояния (в данном случае не учитываем погрешность линеаризации ввиду ее малости (см. раздел 2))

$$\begin{cases} \delta\bar{Y} = \mathbf{H} \cdot \delta\bar{\Theta} + \bar{\epsilon}_y; \\ \delta v = \bar{C}' \cdot \delta\bar{\Theta}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\delta\bar{Y}$  – (nx1)-вектор относительных отклонений измеряемых параметров, элементы которого являются признаками технического состояния ГТД и представлены в первом столбце табл. 1 (за исключением последних двух строк);

$\mathbf{H}$  – (nхm)-МКВ, каждый элемент которой  $h_{ij}$  описывает линейную зависимость между соответствующим относительным отклонением параметра технического состояния  $\delta\theta_j$  и соответствующим относительным отклонением признака состояния  $\delta y_i$  на определенном режиме работы ГТД;

$\delta\bar{\Theta}$  – (mx1)-вектор относительных отклонений параметров технического состояния, элементы которого представлены в первой строке табл. 1;

$\bar{\epsilon}_y$  – (nx1)-вектор случайных погрешностей измерений;

$\delta v$  – относительное отклонение (от значения в исправном состоянии) интересующего неизмеряемого параметра;

$\bar{C}$  – вектор коэффициентов влияния, являющийся частью МКВ (элементы этого вектора представлены для тяги в 7-й, а для удельного расхода топлива в 8-й строке табл. 1).

Разработанный авторами метод оценивания неизмеряемых параметров [4–7] заключается в следующем. Исходная матрица модели  $\mathbf{H}$  преобразуется в центрированную нормированную матрицу  $\mathbf{Z}$  [14]:

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{H} - \bar{\mathbf{H}}) \cdot \mathbf{S} \quad \text{или} \quad Z_{ij} = (H_{ij} - \bar{H}_j) \cdot S_{jj}^{1/2}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{H}} &= [\bar{H}_1 \dots \bar{H}_n]; \quad \bar{H}_j = \sum_{i=1}^n H_{ij} / n = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n H_{ij}; \\ \mathbf{S} &= \text{diag} \left( \frac{1}{\sqrt{S_{jj}}} \right); \quad S_{jj} = \sum_{i=1}^n (H_{ij} - \bar{H}_j)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Затем определяется корреляционная матрица  $(\mathbf{Z}' \cdot \mathbf{Z})$ , все ее собственные числа  $\lambda_j$  и соответствующие им собственные вектора  $\bar{\gamma}_j$ , матрицу, состоящую из вектор-столбцов которых, обозначим  $\mathbf{\Gamma}$ .

Главными компонентами называют систему ортогональных векторов  $\bar{W}_j$  (направления которых

совпадают с направлениями собственных векторов корреляционной матрицы системы), полученных с помощью преобразования

$$\mathbf{W} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{\Gamma}. \quad (4)$$

Далее используется приведенная нормированная регрессионная модель в виде

$$\bar{y} = \mathbf{W} \cdot \bar{\mathbf{b}} + \bar{\varepsilon}_y, \quad (5)$$

где  $\bar{y} = (\delta\bar{Y} - \delta\bar{Y}) / \sqrt{S_{yy}}$  – центрированный и нормированный вектор  $\delta\bar{Y}$  модели (1);

$$\delta\bar{Y} = \sum_{i=1}^m \delta Y_i / m; S_{yy} = \sum_{i=1}^m (\delta Y_i - \delta\bar{Y})^2.$$

Для получения оценок коэффициентов  $\bar{\mathbf{b}}$  к модели (5) применяется метод наименьших квадратов:

$$\hat{\bar{\mathbf{b}}} = (\mathbf{W}' \cdot \mathbf{W})^{-1} \cdot \mathbf{W}' \cdot \bar{y}'. \quad (6)$$

Подставив (4) в (5), получим:

$$\bar{y} = \mathbf{W} \cdot \bar{\mathbf{b}} + \bar{\varepsilon}_y = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{\Gamma} \cdot \bar{\mathbf{b}} + \bar{\varepsilon}_y. \quad (7)$$

Подставив  $\bar{y}$  и  $\mathbf{Z}$  в (7), получим:

$$\delta\bar{Y} - \delta\bar{Y} = \sqrt{S_{yy}} \cdot (\mathbf{H} - \bar{\mathbf{H}}) \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{\Gamma} \cdot \bar{\mathbf{b}} + \bar{\varepsilon}_y. \quad (8)$$

В [16] доказано, что первое уравнение модели (1) можно записать в виде

$$\delta\bar{Y} - \delta\bar{Y} = (\mathbf{H} - \bar{\mathbf{H}}) \cdot \delta\bar{\Theta} + \bar{\varepsilon}_y. \quad (9)$$

Сравнив (8) и (9), получим оценку вектора  $\delta\bar{\Theta}$ :

$$\delta\hat{\bar{\Theta}} = \sqrt{S_{yy}} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{\Gamma} \cdot \hat{\bar{\mathbf{b}}}. \quad (10)$$

$$(\mathbf{H} - \bar{\mathbf{H}}) = \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} (h_{11} - h_{21}) & (h_{12} - h_{22}) & (h_{13} - h_{23}) \\ (h_{21} - h_{11}) & (h_{22} - h_{12}) & (h_{23} - h_{13}) \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} (h_{11} - h_{21}) & (h_{12} - h_{22}) & (h_{13} - h_{23}) \\ -(h_{11} - h_{21}) & -(h_{12} - h_{22}) & -(h_{13} - h_{23}) \end{vmatrix}. \quad (17)$$

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{(h_{11} - h_{21})^2}{2^2} + \frac{(-(h_{11} - h_{21}))^2}{2^2} = \frac{1}{2} \cdot (h_{11} - h_{21})^2; \\ S_{22} = \frac{(h_{12} - h_{22})^2}{2^2} + \frac{(-(h_{12} - h_{22}))^2}{2^2} = \frac{1}{2} \cdot (h_{12} - h_{22})^2; \\ S_{33} = \frac{(h_{13} - h_{23})^2}{2^2} + \frac{(-(h_{13} - h_{23}))^2}{2^2} = \frac{1}{2} \cdot (h_{13} - h_{23})^2. \end{cases} \quad (18)$$

Тогда  $\mathbf{Z}$  в соответствии с (2):  $\mathbf{Z} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{vmatrix} \frac{(h_{11} - h_{21})}{\sqrt{(h_{11} - h_{21})^2}} & \frac{(h_{12} - h_{22})}{\sqrt{(h_{12} - h_{22})^2}} & \frac{(h_{13} - h_{23})}{\sqrt{(h_{13} - h_{23})^2}} \\ \frac{(h_{21} - h_{11})}{\sqrt{(h_{21} - h_{11})^2}} & \frac{(h_{22} - h_{12})}{\sqrt{(h_{22} - h_{12})^2}} & \frac{(h_{23} - h_{13})}{\sqrt{(h_{23} - h_{13})^2}} \end{vmatrix}. \quad (19)$

Подставив (10) во второе уравнение системы (1) получим выражение для оценки отклонения искомого неизмеряемого параметра двигателя:

$$\delta\hat{v} = \bar{C}' \cdot \sqrt{S_{yy}} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{\Gamma} \cdot \hat{\bar{\mathbf{b}}}. \quad (11)$$

Получив оценку отклонения неизмеряемого параметра (11) можем вычислить оценку непосредственно искомого параметра. Как известно, относительное отклонение параметра

$$\delta v = \frac{v - v^0}{v^0}, \quad (12)$$

где  $v^0$  – значение параметра в исправном состоянии. Отсюда

$$v = v^0 \cdot (1 + \delta v) \quad (13)$$

$$\hat{v} = v^0 \cdot (1 + \delta\hat{v}). \quad (14)$$

В уравнении (14) значение  $v^0$  известно из характеристики исправного состояния, которую снимают для каждого двигателя во время приемодаточных испытаний.

Рассмотрим простейший пример – систему уравнений (1), в которой три параметра технического состояния, два измеряемых параметра и один интересующий нас неизмеряемый параметр:

$$\begin{cases} \delta y_1 = h_{11} \cdot \delta\theta_1 + h_{12} \cdot \delta\theta_2 + h_{13} \cdot \delta\theta_3 + \varepsilon_{y1}; \\ \delta y_2 = h_{21} \cdot \delta\theta_1 + h_{22} \cdot \delta\theta_2 + h_{23} \cdot \delta\theta_3 + \varepsilon_{y2}; \\ \delta v = c_1 \cdot \delta\theta_1 + c_2 \cdot \delta\theta_2 + c_3 \cdot \delta\theta_3, \end{cases} \quad (15)$$

где  $\varepsilon_{yi}$  – погрешность измерения соответствующего параметра.

В соответствии с (3)

$$\bar{\mathbf{H}} = \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} (h_{11} + h_{21}) & (h_{12} + h_{22}) & (h_{13} + h_{23}) \\ (h_{11} + h_{21}) & (h_{12} + h_{22}) & (h_{13} + h_{23}) \end{vmatrix}; \quad (16)$$

В (19) возможны следующие варианты:

$$\begin{cases} h_{11} < h_{21} \Rightarrow Z_{11} = -1/\sqrt{2}, Z_{21} = 1/\sqrt{2}; \\ h_{11} > h_{21} \Rightarrow Z_{11} = 1/\sqrt{2}, Z_{21} = -1/\sqrt{2}; \\ h_{12} < h_{22} \Rightarrow Z_{12} = -1/\sqrt{2}, Z_{22} = 1/\sqrt{2}; \\ h_{12} > h_{22} \Rightarrow Z_{12} = 1/\sqrt{2}, Z_{22} = -1/\sqrt{2}; \\ h_{13} < h_{23} \Rightarrow Z_{13} = -1/\sqrt{2}, Z_{23} = 1/\sqrt{2}; \\ h_{13} > h_{23} \Rightarrow Z_{13} = 1/\sqrt{2}, Z_{23} = -1/\sqrt{2}. \end{cases} \quad (20)$$

Всего возможны 8 вариантов матрицы  $\mathbf{Z}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}; \mathbf{Z}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{vmatrix}; \\ \mathbf{Z}_3 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \end{vmatrix}; \mathbf{Z}_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \\ \mathbf{Z}_5 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{vmatrix}; \mathbf{Z}_6 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix}; \end{aligned}$$

$$\mathbf{Z}_7 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix}; \mathbf{Z}_8 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

Если определить корреляционную матрицу каждого из вариантов матрицы  $\mathbf{Z}$ , получим всего 2 возможных варианта корреляционной матрицы:

$$\mathbf{Z}' \cdot \mathbf{Z} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \mathbf{Z}' \cdot \mathbf{Z} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Для любой из корреляционных матриц собственные числа  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$  и одно  $\lambda_1 = 3$ . Соответственно возможны 2 варианта собственных векторов:

$$\bar{\gamma}' = \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \frac{1}{\sqrt{3}} \right]; \bar{\gamma}' = \left[ -\frac{1}{\sqrt{3}} \quad \frac{1}{\sqrt{3}} \quad -\frac{1}{\sqrt{3}} \right]. \quad (22)$$

Применяя для каждого из возможных вариантов  $\mathbf{Z}$  и  $\bar{\gamma}$  математические преобразования (4) –(11), получим 16 вариантов оценки  $\delta \hat{v}$ :

$$\delta \hat{v} = \begin{cases} \frac{\pm 1}{\sqrt{2}} \cdot \left[ (\delta y_1 - \delta y_2)^2 \cdot \left( \frac{c_1}{h_{11} - h_{21}} + \frac{c_2}{h_{12} - h_{22}} + \frac{c_3}{h_{13} - h_{23}} \right) \right]; \\ \frac{\pm 1}{\sqrt{2}} \cdot \left[ (\delta y_1 - \delta y_2)^2 \cdot \left( \frac{c_1}{h_{11} - h_{21}} - \frac{c_2}{h_{12} - h_{22}} + \frac{c_3}{h_{13} - h_{23}} \right) \right]; \\ \frac{\pm 1}{\sqrt{162}} \cdot \left[ (\delta y_1 - \delta y_2)^2 \cdot \left( \frac{c_1}{h_{11} - h_{21}} + \frac{c_2}{h_{12} - h_{22}} + \frac{c_3}{h_{13} - h_{23}} \right) \right]; \\ \frac{\pm 1}{\sqrt{162}} \cdot \left[ (\delta y_1 - \delta y_2)^2 \cdot \left( \frac{c_1}{h_{11} - h_{21}} - \frac{c_2}{h_{12} - h_{22}} + \frac{c_3}{h_{13} - h_{23}} \right) \right]; \\ \frac{\pm 3}{\sqrt{2}} \cdot \left[ (\delta y_1 - \delta y_2)^2 \cdot \left( \frac{c_1}{h_{11} - h_{21}} + \frac{c_2}{h_{12} - h_{22}} + \frac{c_3}{h_{13} - h_{23}} \right) \right]; \\ \frac{\pm 3}{\sqrt{2}} \cdot \left[ (\delta y_1 - \delta y_2)^2 \cdot \left( \frac{c_1}{h_{11} - h_{21}} - \frac{c_2}{h_{12} - h_{22}} + \frac{c_3}{h_{13} - h_{23}} \right) \right]; \\ \frac{\pm 1}{\sqrt{18}} \cdot \left[ (\delta y_1 - \delta y_2)^2 \cdot \left( \frac{c_1}{h_{11} - h_{21}} + \frac{c_2}{h_{12} - h_{22}} + \frac{c_3}{h_{13} - h_{23}} \right) \right]; \\ \frac{\pm 1}{\sqrt{18}} \cdot \left[ (\delta y_1 - \delta y_2)^2 \cdot \left( \frac{c_1}{h_{11} - h_{21}} - \frac{c_2}{h_{12} - h_{22}} + \frac{c_3}{h_{13} - h_{23}} \right) \right]. \end{cases} \quad (23)$$

Погрешность оценивания искомого параметра:

$$\Delta \hat{v} = \frac{\hat{v} - v}{v} = \frac{\delta \hat{v} - \delta v}{1 + \delta v}. \quad (24)$$

Подставим третье уравнение системы (15) и уравнение (23) в (24), получим 16 вариантов величины погрешности оценивания. Общая формула погрешности оценивания в данном случае:

$$\Delta \hat{v} = k_i \cdot k_j \cdot \left( (\delta y_1 + \varepsilon_{y1}) - (\delta y_2 + \varepsilon_{y2}) \right)^2 \cdot \frac{\left( \frac{c_1}{h_{11} - h_{21}} + k_\ell \cdot \frac{c_2}{h_{12} - h_{22}} + \frac{c_3}{h_{13} - h_{23}} \right) - c_1 \cdot \delta \theta_1 + c_2 \cdot \delta \theta_2 + c_3 \cdot \delta \theta_3}{1 + c_1 \cdot \delta \theta_1 + c_2 \cdot \delta \theta_2 + c_3 \cdot \delta \theta_3}. \quad (25)$$

где  $k_i$  принимает значения  $\frac{1}{\sqrt{2}}; \frac{1}{\sqrt{162}}; \frac{3}{\sqrt{2}}; \frac{1}{\sqrt{18}}$ ;

$k_j$  может принимать значения +1; -1;  
 $k_\ell$  может принимать значения +1; -1.

Выражение (25) показывает, что погрешность метода главных компонент зависит от:

а) характера проявляющегося дефекта ГТД (какие характеристики отклоняются и на какую ве-

личину –  $\delta\theta_1, \delta\theta_2, \delta\theta_3$ );

б) состава используемой статической модели состояния (под составом модели понимаем состав МКВ **H**, т.е. какие характеристики узлов учитываются, какие измеряемые параметры учитываются);

в) от погрешностей  $\hat{\epsilon}$  измерений.

При формировании алгоритма оценивания можно влиять на выбор состава матрицы **H**. Проанализируем влияние состава МКВ на погрешность используемого вычислительного алгоритма.

**3.2. Влияние состава МКВ на погрешность используемого вычислительного алгоритма**

Погрешностью измерительной системы пренебрежем:  $\epsilon_{y1} = \epsilon_{y2} = 0$ .

Рассмотрим матрицу **h** размером (2x3) (часть МКВ **H**, представленной в табл. 1) и соответствующий вектор  $\hat{c}$  (часть вектора  $\hat{C}$ , представленного в предпоследней строке табл. 1).

С помощью поузловой модели имитируем исправное состояние двигателя и дефект № 6 (см. табл. 2) на режиме  $\pi_{к\sigma}^* = 21$ . Параметры двигателя представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры исправного двигателя

	$T_T, K$	$n_B, \text{об/мин}$	$n_{CD}, \text{об/мин}$	$n_{ВД}, \text{об/мин}$	$G_T, \text{кг/ч}$	$R, H$
В исправном состоянии ( $v^0$ )	947	5336	9915	13836	2441	61542
При проявлении дефекта ( $v$ )	951	5338	9908	13874	2452	61607

Пример 1. Измеряются частоты вращения роторов среднего и высокого давления, контролируется изменение характеристик:  $\delta G_{КСД пр}, \delta G_{КВД пр}, \delta \eta_{ТВ}$ :

Таблица 4

МКВ для примера 1

	$\delta G_{КСД пр}$	$\delta G_{КВД пр}$	$\delta \eta_{ТВ}$
$\delta n_{CD}$	-0,5056	-0,0109	-0,0967
$\delta n_{ВД}$	0,0354	-0,6375	-0,0145
$\delta R$	0,0471	0,0210	0,4972

В соответствии с (14)  $\hat{v} = 61556 H$ .

В соответствии с (24)  $\Delta \hat{v} = -0,08\%$ .

Пример 2. Измеряются частоты вращения роторов среднего и высокого давления, контролируется изменение:  $\delta G_{КСД пр}, \delta \eta_{КВД}$  и  $\delta \eta_{ТВД}$ :

Таблица 5

МКВ для примера 2

	$\delta G_{КСД пр}$	$\delta \eta_{КВД}$	$\delta \eta_{ТВД}$
$\delta n_{CD}$	-0,5056	0,1175	0,0965
$\delta n_{ВД}$	0,0354	0,5551	0,6801
$\delta R$	0,0471	-0,1955	-0,3913

$\hat{v} = 61472 H; \Delta \hat{v} = -0,22\%$ .

Пример 3. Измеряются температура за турбиной среднего давления и частота вращения ротора вентилятора, контролируется изменение трех характеристик:  $\delta G_{В пр}, \delta \eta_{КСД}$  и  $\delta G_{КВД пр}$ :

Таблица 6

МКВ для примера 3

	$\delta G_{В пр}$	$\delta \eta_{КСД}$	$\delta G_{КВД пр}$
$\delta T_T$	0,0701	-0,8103	0,0833
$\delta n_B$	-0,7135	-0,0686	0,0064
$\delta R$	-0,5305	-0,2223	0,0210

$\hat{v} = 61608 H; \Delta \hat{v} = 0\%$ .

Как видно из примеров, точность разработанного метода существенно зависит от состава измерительной системы и состава применяемой линейной модели состояния ГТД. При определенном неблагоприятном сочетании параметров модели состояния прогноз может быть не просто неточным, но и неверно отображать характер изменения параметра (например, показывать снижение тяги при ее реальном росте). Значит, одной из главных задач при применении разработанного метода является оптимизация состава используемой модели состояния.

**3.3. Выбор оптимального состава анализируемой системы**

Для реальной МКВ размером (5x23) (табл. 1), анализ погрешностей метода аналитическими методами невозможен. Это связано с тем, что при вычислении главных компонент необходимо будет аналитически найти корни полинома 23-го порядка, а затем провести процедуру аналитического обращения матрицы размером 5x5. Даже осуществив эти преобразования, мы получим многовариантную задачу. Т.о., для подбора оптимального состава МКВ при решении данной задачи, необходимо перебрать все возможные варианты МКВ. Поставленную задачу оценивания неизмеряемого параметра необходимо решить для каждого из возможных вариантов МКВ и в результате найти оптимальную МКВ. Для выбора оптимальной МКВ необходимо с помощью имитационного моделирования рассчитать параметры двигателя для всех наиболее характерных дефектов (см. табл. 2). Для каждого варианта МКВ определить оценку неизмеряемого параметра при проявлении каждого из дефектов. Определить максимальную погрешность среди заданного набора дефектов. Критерием оптимальности МКВ будет минимум максимальной среди заданного набора дефектов погрешности. Так как в данном случае речь идет о матрице размером 5x23, то количество всех возможных неповторяющихся сочетаний для 23 столбцов и 5 строк:

$$\sum_{n=1}^{23} C_{23}^n \cdot \sum_{m=1}^5 C_5^m = (2^n - 1) \cdot (2^m - 1) = 260046817. \quad (26)$$

Нами был проведен эксперимент: была написана компьютерная программа, которая составляет по очереди все возможные варианты МКВ, рассчитывает для каждого варианта оценку неизмеряемого параметра, определяет погрешность этой оценки и запоминает вариант МКВ, при котором максимальная погрешность (оценивания при проявлении всех исследуемых дефектов) минимальна. Программа была запущена на ЭВМ с двухъядерным процессором Intel Core 2 DUO с тактовой частотой каждого ядра 2,15 ГГц и с оперативной памятью DDR II – 800 объемом 6Гб. Частота расчета составляла примерно 150 вариантов в секунду. При такой производительности для выбора оптимальной структуры модели на одном из множества режимов работы двигателя потребовались бы двадцать суток непрерывного компьютерного счета. Для проверки необходимого количества режимов работы двигателя ушло бы более года.

Из (26) видно, что время решения данной задачи прямо пропорционально числу возможных вариантов, поэтому она не может быть решена за время, имеющее полиномиальную зависимость от размера входных данных. Время решения растет в экспоненциальной зависимости от объема входных данных. Значит, данная задача относится к так называемому NP-классу задач в теории алгоритмов [17]. Известны несколько подходов к решению такого класса задач. Из всего многообразия алгоритмов наше внимание привлек так называемый «генетический алгоритм» ввиду простоты его реализации.

### 3.4. Применение генетического алгоритма

Генетические алгоритмы (ГА) – это адаптивные методы поиска, которые в последнее время широко используют для решения задач оптимизации. ГА хорошо исследованы и проиллюстрированы на множестве примеров. Подробнее о ГА можно узнать из [18]. Мы лишь упомянем, что для нашей задачи использовался ГА с целочисленным кодированием, размер популяции – 80 пар хромосом, родители выбираются с помощью панмиксии, для рекомбинации применялся одноточечный кроссинговер для каждой из пар хромосом (отвечающих за строки и столбцы МКВ), мутация случайная одноточечная, вероятность мутации потомка после кроссинговера  $p_m=0,6$ , отбор особей в новую популяцию – элитарный.

Как было указано выше, критерием оптимальности МКВ будет минимум максимальной среди заданного набора дефектов погрешности.

В результате применения ГА к выбору оптимального состава МКВ, получили такую структуру МКВ,

при которой максимальная погрешность оценивания интересующего нас неизмеряемого параметра минимальна. Результирующая МКВ состоит из всех строк МКВ, представленной в табл. 1 и столбцов под номерами 2, 4, 5, 8, 10, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 23.

Определим параметры погрешности разработанного метода с учетом шума измерительной системы с использованием МКВ оптимального состава на примере двадцати одного дефекта (табл. 2) на режиме  $\pi_{КС}^*=21$ .

С помощью нелинейной поузловой термогазодинамической модели моделируем дефекты путем задания смещения соответствующих характеристик (название узлов во втором столбце табл. 2, величина смещения характеристики в третьем столбце табл. 2). К каждому измеряемому параметру  $Y_i$ , полученному из поузловой модели, прибавляем имитированную величину погрешности (процедура имитирования шума измерительной системы подробно изложена в [5, 6]), получаем моделированные результаты измерений параметров двигателя.

Итак, мы рассматриваем центрированную и нормированную МКВ  $\mathbf{H}$  (табл. 1) – которую обозначаем  $\mathbf{Z}$  (см. формулы (2), (3)). Далее находим корреляционную матрицу  $\mathbf{Z}' \cdot \mathbf{Z}$ . Затем находим собственные числа и собственные векторы матрицы  $\mathbf{Z}' \cdot \mathbf{Z}$ . По формуле (4) находим главные компоненты. С помощью формулы (6) находим оценки параметров регрессионной зависимости (5), причем вектор  $\bar{y}'$  – вектор измерений с учетом добавленного шума. И по формуле (11) находим отклонение искомого параметра (в данном случае тяги исследуемого ГТД). Сравниваем получившееся значение с результатом расчета поузловой модели, получаем погрешность алгоритма  $\Delta$ . Повторяем этот алгоритм 10000 раз для каждого из 21 рассматриваемого дефекта. Далее находим математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение погрешности. Результаты расчета с использованием начальной МКВ (табл. 1) представлены в табл. 7. Результаты расчета с использованием оптимизированной с помощью ГА МКВ представлены в табл. 8. Визуальная интерпретация результатов из табл. 7 и 8 представлена на рис. 1. Для удобства сравнения на рис. 1 представлены модули параметров погрешности. Данные из табл. 8 показаны серым оттенком, данные из табл. 7 показаны черным оттенком, заштрихованная область – пересечение диапазонов.

Сравним результаты, представленные в таблицах 7 и 8. Из сравнения видно, что после оптимизации МКВ максимальное значение математического ожидания погрешности уменьшилось в 2,1 раза. Величина среднее квадратического отклонения практически не изменилась.



Таблица 7  
 Параметры погрешности оценивания тяги  
 для различных дефектов

Дефект	1	2	3	4	5	6	7
M( $\Delta$ ),%	1,258	0,746	-0,477	-0,016	-0,467	-0,127	-0,355
$\sigma_{\Delta}$ ,%	0,0372	0,0369	0,0372	0,0375	0,0370	0,0372	0,0373

Продолжение таблицы 7

Дефект	8	9	10	11	12	13	14
M( $\Delta$ ),%	0,107	-0,654	0,089	-0,513	0,385	-0,430	-0,002
$\sigma_{\Delta}$ ,%	0,037	0,0376	0,0371	0,0375	0,0372	0,0371	0,0369

Продолжение таблицы 7

Дефект	15	16	17	18	19	20	21
M( $\Delta$ ),%	0,004	-0,112	-0,013	0,016	0,184	0,140	-0,285
$\sigma_{\Delta}$ ,%	0,0369	0,037	0,0372	0,0369	0,0369	0,0374	0,0372

Таблица 8

Параметры погрешности оценивания тяги  
 для различных дефектов (модифицированная МКВ)

Дефект	1	2	3	4	5	6	7
M( $\Delta$ ),%	0,592	0,297	-0,256	-0,297	-0,067	-0,237	0,271
$\sigma_{\Delta}$ ,%	0,0405	0,0408	0,0407	0,0412	0,0407	0,0412	0,0407

Продолжение таблицы 8

Дефект	8	9	10	11	12	13	14
M( $\Delta$ ),%	-0,416	0,411	-0,023	0,362	-0,513	0,335	-0,207
$\sigma_{\Delta}$ ,%	0,0406	0,0414	0,0410	0,0404	0,0410	0,0407	0,0408

Продолжение таблицы 8

Дефект	15	16	17	18	19	20	21
M( $\Delta$ ),%	0,213	-0,292	-0,377	0,474	0,120	0,315	-0,591
$\sigma_{\Delta}$ ,%	0,0408	0,0406	0,0409	0,0413	0,0412	0,0409	0,0405

Таким образом, применение оптимизации МКВ с помощью ГА позволило существенно снизить погрешность разработанного авторами метода.

### Выводы

Исследована погрешность разработанного ранее метода оценивания неизмеряемых параметров ГТД [4–7], основанного на построении регрессии на главных компонентах. В ходе исследования погрешности предложенного метода, аналитически доказано влияние состава рассматриваемых характеристик узлов на точность предложенного метода. Выявлена принадлежность задачи оптимизации состава рассматриваемых характеристик узлов к классу NP-полных задач. Для ее решения выбран генетический алгоритм. Получены оценки неизмеряемых параметров и доказана высокая точность разработанного метода.

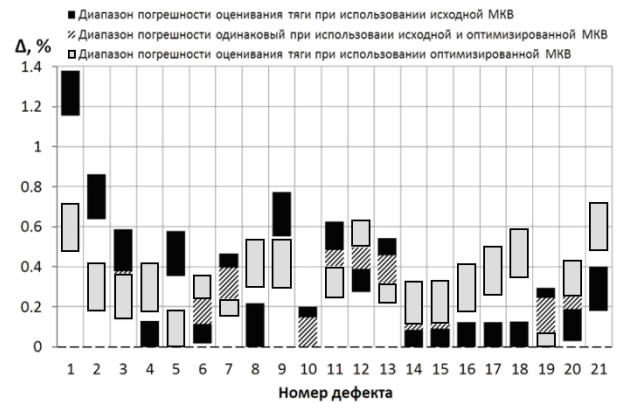


Рис. 1. Ошибки оценивания отклонения тяги ( $\pi_{КС}^* = 21$ , разброс измерений  $3\sigma$ ) при проявлении различных дефектов (сравнение использования полной и модифицированной МКВ)

### Литература

- Henriksson, M. Robust Kalman filter thrust estimation in a turbofan engine [Text] / M. Henriksson, D. Ring // ASME Turbo Expo Paper No GT2006-91241, Barcelona, Spain, May 8-11 2006. – 10 p.
- Jaw, L. C. Recent advancements in aircraft engine health management (EHM) technologies and recommendations for the next step [Text] / L. C. Jaw // ASME Turbo Expo Paper No GT2005-68625, Reno-Tahoe, Nevada, USA, June 6-9 2005. – 13 p.
- Шевченко, М. В. Оценивание неизмеряемых параметров ГТД с учетом изменения технического состояния проточной части [Текст] / М. В. Шевченко, С. В. Епифанов // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 2. – С. 148-157.
- Шевченко, М. В. Метод главных компонент в решении задачи косвенных измерений параметров ГТД [Текст] / М. В. Шевченко, С. В. Епифанов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 9 (86). – С. 219-228.
- Шевченко, М. В. Оценивание тяги с учетом погрешностей измерительной системы и изменения технического состояния ГТД [Текст] / М. В. Шевченко, С. В. Епифанов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 10 (97). – С. 144-152.
- Shevchenko, M. Ridge estimation and principal component analysis to solve an ill-conditioned problem of estimating unmeasured gas turbine parameters [Text] / M. Shevchenko, S. Yepifanov, I. Loboda // ASME Turbo Expo Paper No GT2013-94496, San Antonio, Texas, USA, June 3-7 2013. – 12 p.
- Шевченко, М. В. Оценивание удельного расхода топлива по косвенным измерениям с учетом изменения технического состояния ГТД [Текст] / М. В. Шевченко, С. В. Епифанов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 2 (99). – С. 80-91.
- Синтез систем управления и диагностики газотурбинных двигателей [Текст] : моногр. /

С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. Н. Богаенко и др. – К. : Техника, 1998. – 312 с.

9. Curnock, B. *OBIDICOTE Programme – Work Package 4: Steady-state test cases for engine deterioration: technical report [Text]* / Rolls Royce PLC; B. Curnock, 2001. – Document No DNS78608. – 12 p.

10. Dewallef, P. *On-line aircraft engine diagnostic using a soft-constrained Kalman filter [Text]* / P. Dewallef, O. Leonard, K. Mathioudakis // ASME Turbo Expo Paper No GT2004-53539, Vienna, Austria, June 14-17 2004. – 10 p.

11. Mathioudakis, K. *Turbofan performance deterioration tracking using nonlinear models and optimization techniques [Text]* / K. Mathioudakis, Ph. Kamboukos, A. Stamatis // Journal of Turbomachinery: Transactions of the ASME. – 2002. – № 124. – P. 580- 587.

12. Romessis, C. *The use of probabilistic reasoning to improve least squares based gas path diagnostics [Text]* / C. Romessis, Ph. Kamboukos, K. Mathioudakis // ASME Turbo Expo Paper No GT2006-90619, Barcelona, Spain, May 8-11 2006. – 9 p.

13. Тунаков, А. П. *Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей [Текст]* / А. П. Тунаков – М. : Машиностроение, 1979. – 181 с.

14. Дрейпер, Н. *Прикладной регрессионный анализ. В 2-х кн. кн. 2 [Текст]* : пер. с англ. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 351 с.

15. Шафаревич, И. Р. *Линейная алгебра и геометрия [Текст]* / И. Р. Шафаревич, А. О. Ремизов. – М. : Физматлит, 2009. – 512 с.

16. Дрейпер, Н. *Прикладной регрессионный анализ. В 2-х кн. кн. 1 [Текст]* : пер. с англ. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

17. Гэри, М. *Вычислительные машины и труднорешаемые задачи [Текст]* / М. Гэри, Д. Джонсон. – М. : Мир, 1982. – 416 с.

18. Панченко, Т. В. *Генетические алгоритмы [Текст]* : учеб.-метод. пособие / под ред. Ю. Ю. Тарасевича. – Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.

*Поступила в редакцию 3.12.2014, рассмотрена на редколлегии 20.01.2015*

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИМІРЮВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ГТД, ЗАСНОВАНОГО НА МЕТОДІ ГОЛОВНИХ КОМПОНЕНТ, В УМОВАХ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ

*М. В. Шевченко*

Досліджено похибку розробленого раніше методу оцінювання невимірюваних параметрів ГТД, заснованого на побудові регресії на головних компонентах. Як об'єкт дослідження розглянуто двоконтурний триваловий ГТД з п'ятьма вимірюваними параметрами і двадцятьма трьома, що характеризують зміну технічного стану. Імітаційне моделювання досліджуваного об'єкта проводилося за допомогою його повузлової моделі. У ході дослідження похибки запропонованого методу аналітично доведено вплив складу розглянутих характеристик вузлів на точність оцінювання. Виявлено належність задачі оптимізації складу розглянутих характеристик вузлів до класу NP-повних задач. Для її вирішення обрано генетичний алгоритм. Отримано оцінки невимірюваних параметрів, доведено високу точність розробленого методу.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун (ГТД), головні компоненти, діагностування, регресійна модель, статистична оцінка, питома витрата палива, тяга, генетичний алгоритм.

## IMPROVING THE ESTIMATING ACCURACY OF NONMETERING PARAMETERS WITH HELP OF PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS TAKING INTO ACCOUNT GAS PATH TECHNICAL STATE CHANGING

*M. V. Shevchenko*

The paper deals with investigation of the error of previously developed method that is able to asses GTD unmeasured parameters. The method is based on the regression analysis of principal components. The three-spool turbopfan with five measured and twenty-three technical condition parameters was chosen as the object of study. The technical condition simulation was made with help of unit-level model of the object. Effect of considered unit performances on estimation accuracy of investigated method was analytically proved during estimation error analysis. It was revealed that optimization of the performance configuration is NP-complete problem. Genetic algorithm was chosen for its solving. The estimates of unmeasured parameters were obtained. High accuracy of proposed method was proved.

**Key words:** gas turbine engine (GTE), principal components, diagnosing, regression model, statistical evaluation, specific fuel consumption, thrust, genetic algorithm.

**Шевченко Максим Владимирович** – м.н.с. кафедры конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.