

УДК 621.452.3–6:519.22

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

ОЦЕНИВАНИЕ НЕИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ГТД С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

Рассмотрены известные методы оценивания неизмеряемых параметров ГТД. Выбраны и проанализированы два метода, наиболее устойчивых к изменению технического состояния и не требующих значительных вычислительных ресурсов. Первый метод основан на построении регрессионной зависимости интересующего параметра на выборке значений измеряемых параметров во всех возможных состояниях двигателя, второй – на использовании линейной математической модели рабочего процесса и главных компонентах соответствующей матрицы системы. В качестве объекта исследования рассмотрен двухконтурный трехвальный ГТД с четырьмя измеряемыми параметрами и двадцатью тремя параметрами, характеризующими изменение технического состояния. В качестве оцениваемых неизмеряемых параметров выбраны температура газа перед турбиной, тяга и удельный расход топлива. С помощью нелинейной поузловой модели исследуемого объекта смоделированы дефекты проточной части, имитирующие изменение технического состояния. Получены оценки неизмеряемых параметров и выполнено их сравнение с результатами, полученными с помощью нелинейной модели. Проведено сравнение предложенных методов на основании анализа погрешностей.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель (ГТД), главные компоненты, диагностика, регрессионная модель, статистическая оценка, удельный расход топлива, тяга, температура газа перед турбиной.

Список обозначений

А – параметр расхода через сопловой аппарат турбины;
 $C_{уд}$ – удельный расход топлива;
 G – массовый расход;
 Н – матрица коэффициентов влияния;
 М – математическое ожидание;
 n – частота вращения;
 p – давление;
 R – тяга;
 T – температура;
 Y – измеряемые параметры проточной части;
 δ – относительное отклонение параметра;
 π – степень повышения давления;
 η – КПД;
 μ – коэффициент расхода;
 σ – коэффициент восстановления полного давления, среднеквадратическое отклонение;
 θ – параметры характеристик узлов;
 φ – коэффициент скорости;
 ТРДД – турбореактивный двухконтурный двигатель.

Список индексов

* – параметр торможения потока;
 В – каскад вентилятора, сечение за вентилятором;

В1 – сечение за вентилятором во внутреннем контуре;
 В2 – сечение за вентилятором во внешнем контуре;
 ВД – каскад высокого давления;
 вх – вход в компрессор;
 в – воздух;
 г – газ;
 К – компрессор;
 Н – 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 газотурбинных двигателей основываются на информации об их текущем техническом состоянии. Для полного представления о причинах и характере изменения технического состояния

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, а для компрессоров и турбин – 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.

В процессе испытаний и эксплуатации ГТД требуется определение основных параметров, характеризующих техническое состояние двигателя в целом и его отдельных узлов: коэффициентов полезного действия узлов, степени повышения давления в компрессоре, температуры газа перед турбиной, тяги, удельного расхода топлива. Существенной проблемой является то, что многие из этих параметров не измеряются, поэтому необходимо оценивать их значения, используя измеряемые параметры. Необходимость оценивания температуры газа перед турбиной очевидна – при превышении ее предела значительно сокращается ресурс турбины, при значительном превышении предела возможны прогары сопловых аппаратов и поломка рабочих лопаток и диска первой ступени турбины. Оценивание степени повышения давления в компрессоре необходимо для предотвращения неустойчивых режимов работы компрессора, которые могут привести к выходу из строя двигателя в целом. Точная информация о величине удельного расхода топлива необходима для определения необходимого запаса топлива на полет. Постановка задачи оценки тяги рассмотрена в [1], ее роль в эксплуатации двигателя по состоянию – в [2].

Известные подходы к оцениванию неизмеряемых параметров ГТД представлены на рис. 1.

Самый простой и широко известный метод оценивания неизмеряемых параметров основан на использовании линейной зависимости между отклонениями параметров рабочего процесса (в состав которых входит оцениваемый неизмеряемый параметр) и малыми отклонениями характеристик узлов. Это метод с использованием линейной модели рабочего процесса на одном режиме без использования регуляризации (см. рис. 1). Отклонения характеристик узлов являются промежуточными результатами процедуры оценивания, поэтому такой подход применим лишь в случае, когда количество измеряемых параметров не меньше количества рассматриваемых характеристик узлов.

Как отмечено в [2], самой большой проблемой при оценивании неизмеряемых параметров является избыточность степеней свободы рассматриваемой системы: количество измеряемых параметров меньше количества характеристик узлов. В настоящее время применяется несколько методов преодоления этой проблемы: 1) формирование регрессионных моделей путем аппроксимации значений параметров проточной части без использования модели рабочего процесса [3-5]; 2) формирование регрессионных моделей с использованием линейной однорежимной модели двигателя [6] 3) многорежимный анализ проточной части с использованием линейной модели [7]; 4) использование априорной информации о характеристиках узлов [8]; 5) алгоритмы оценивания параметров на основе нелинейной поузловой модели двигателя [9]; 6) фильтр Калмана [10, 11]; 7) искусственные нейронные сети [12].



Рис. 1. Подходы к оцениванию неизмеряемых параметров

Построение регрессионных моделей путем аппроксимации значений параметров проточной части без использования модели рабочего процесса в алгоритме оценивания является простым методом определения неизмеряемых параметров, не требующим значительных вычислительных ресурсов. В работах [3–5] Г.В.Добрянским и Н.С.Мельниковой предложены алгоритмы расчета таких важных неизмеряемых параметров, как температура газа перед турбиной, расход воздуха через компрессор, КПД компрессора и КПД вентилятора ТРДДФ. Точность определения перечисленных параметров, полученная авторами, очень высока и приемлема для применения таких алгоритмов в системах диагностики и в перспективных системах управления. Однако все исследования, проведенные авторами, относятся к двухвальному ТРДДФ с десятью измеряемыми параметрами. Предложенные алгоритмы должны быть проверены на других типах двигателей с меньшим числом измеряемых параметров.

В работе [6] предложен алгоритм определения неизмеряемых параметров (на примере удельного расхода топлива), основанный на построении регрессионной модели на главных компонентах корреляционной матрицы коэффициентов влияния. Алгоритм показал высокую точность и стабильность относительно других существующих методов при недостатке измерительной информации.

Многорежимный анализ проточной части с использованием линейной модели разработан и исследован многими авторами, например [7, 13, 14]. Этот подход основан на получении недостающей информации путем измерения параметров на нескольких режимах. Но в [14] отмечено, что выбор многорежимного подхода основан на предположении относительного постоянства параметров состояния. Нарушение этого допущения может привести к большим погрешностям оценок. В [14] А. Стаматис предлагает улучшение стандартного многорежимного подхода, основанное на исследовании отклонения параметров в одной рабочей точке, описанной различными параметрами состояния. Такой подход может как выявить, так и идентифицировать дефект в отдельных узлах, но не может обеспечить высокой точности оценивания неизмеряемых параметров.

Использование априорной информации о характеристиках узлов двигателя (в частности, ограничение количества варьлируемых характеристик) не всегда возможно, так как вследствие естественного износа, загрязнения и остаточной деформации элементов двигателя в эксплуатации изменяются практически все характеристики узлов.

Оценивание параметров на основе использования нелинейных поузловых моделей неприемлемо для использования на борту из-за большой вычислительной трудоемкости. Кроме того, подобные модели со временем нуждаются в коррекции для того, чтобы учитывать износ, что возможно только по результатам стендовых испытаний.

Наиболее широко обсуждаемый в зарубежных научных публикациях алгоритм для определения состояния – фильтр Калмана (ФК). Работы в области применения расширенного ФК для определения неизмеряемых параметров [10, 11] показывают хорошую способность этого алгоритма оценивать такие важные параметры, как тяга и запасы устойчивости каскадов компрессора. Оценивание параметров состояния двигателя на основе расширенного ФК с постоянными коэффициентами матрицы системы представлено Т. Кобаяши и др. [11]. В данной работе определены средние и максимальные погрешности оценивания для 100 вариантов исправного и неисправного состояний двигателя и исполнительных устройств. Точность оказалась высокой. В [11], однако, отмечено, что без датчика давления на выходе из сопла наружного контура линейный ФК не способен оценивать тягу точно при изменении технического состояния вентилятора, что означает ограничение применимости данного алгоритма по составу измерительной системы.

В работе [2] Линк Джо ссылается на ряд публикаций, посвященных применению различных типов ИНС для ГТД. ИНС могут быть обучены в ходе работы двигателя и могут учитывать изменение технического состояния. Кроме того, ИНС хорошо работают в условиях зашумленности измерительной системы. Но для обучения ИНС необходима альтернативная модель рабочего процесса двигателя, которая связывает его измеряемые и неизмеряемые параметры с учетом характера изменения технического состояния, либо экспериментальная информация о значениях измеряемых и неизмеряемых параметров для различных состояний двигателя. Поэтому ИНС самостоятельно (без предварительного обучения) не могут оценивать неизмеряемые параметры в условиях изменения технического состояния.

Целью данной работы является сравнение методов, представляющих две группы, указанные на верхнем уровне классификации рис. 1. В качестве метода, не использующего модель рабочего процесса в процедуре оценивания, выбран метод, представленный в работах [3–5], а в качестве метода, основанного на использовании модели рабочего процесса,

выбран метод, основанный на применении главных компонент, перспективность которого обоснована нами в работе [6]. Оцениваемыми неизмеряемыми параметрами являются температура газа перед турбиной, тяга и удельный расход топлива.

Объект исследования

Объектом данного исследования является трехвальный двухконтурный турбореактивный двигатель с большой степенью двухконтурности без смещения потоков. В качестве источника информации о параметрах двигателя используется его нелинейная поузловая термогазодинамическая модель. Техническое состояние двигателя описывается $m = 23$ параметрами $\bar{\theta}$, а изменение

технического состояния описывается их относительными отклонениями $\delta\bar{\theta}$ (перечисленными в первой строке таблицы 1). Один измеряемый параметр $\varpi_{КС}^*$ выбран как режимный. Остальные $n = 4$ измеряемых параметра: полная температура на выходе из турбины, частоты вращения роторов низкого и высокого давления и расход топлива. Их отклонения от базовых значений, соответствующих исходному исправному состоянию, возникающие в результате износа двигателя, формируют вектор $\delta\bar{Y}$.

Дефекты моделировались с помощью нелинейной модели [15] заданием отклонений соответствующих характеристик узлов от базовых значений, соответствующих исправному состоянию.

Таблица 1 – Матрица коэффициентов влияния

	$\delta\sigma_{вх}$	$\delta G_{В пр}$	$\delta\eta_{В1}$	$\delta\eta_{В2}$	$\delta G_{КСД пр}$	$\delta\eta_{КСД}$	$\delta G_{КВД пр}$	$\delta\eta_{КВД}$	$\delta A_{ТВД}$	$\delta\eta_{ТВД}$	$\delta A_{ТСД}$	$\Delta\eta_{ТСД}$
δT_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
δn_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
$\delta n_{ВД}$	-0,2486	0,0535	-0,0412	-0,0123	0,0354	-0,3664	-0,6375	0,5551	0,0578	0,6801	0,8955	-0,2862
δG_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
δT_Γ	-0,4623	0,0929	-0,0769	-0,0194	0,0950	-0,7208	0,0769	-0,6848	0,2807	-0,6820	0,0922	-0,5718
$\delta R_{сум}$	1,4506	-0,5305	0,0375	0,4499	0,0471	-0,2223	0,0210	-0,1955	1,4156	-0,3913	0,0192	-0,3068
$\delta C_{уд}$	-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

	$\delta A_{ТВ}$	$\delta\eta_{ТВ}$	$\Delta\sigma_{КС}$	$\delta\eta_\Gamma$	$\delta\sigma_{В_КСД}$	$\Delta\sigma_{КСД_КВД}$	$\Delta\sigma_{ТВД_ТСД}$	$\delta\varphi_{C1}$	$\delta\mu_{C1}$	$\delta\varphi_{C2}$	$\delta\mu_{C2}$
δT_T	-0,8518	-0,0135	-0,4019	0,0119	-0,3922	-0,5626	-0,8400	-0,0546	-0,0469	-0,0744	-0,0585
δn_B	-0,3373	0,2858	0,4610	-0,0006	-0,0229	-0,0444	-0,1162	0,1153	0,0990	0,4687	0,3690
$\delta n_{ВД}$	-0,2826	-0,0145	0,6562	0,0072	-0,2096	-0,2631	0,5832	-0,0217	-0,0188	-0,0441	-0,0347
δG_T	-1,0288	-0,0557	0,4953	-1,0317	-0,4404	-0,6510	-1,0554	-0,0844	-0,0725	-0,0467	-0,0365
δT_Γ	-0,5981	-0,0236	-0,3313	0,0277	-0,3881	-0,5129	-0,5801	-0,0451	-0,0388	-0,0790	-0,0617
$\delta R_{сум}$	-0,7198	0,4972	1,0824	-0,0055	-0,0832	-0,1467	-0,3372	0,2036	-0,0223	1,8080	0,7860
$\delta C_{уд}$	-0,3067	-0,5557	-0,5934	-1,0261	-0,3570	-0,5036	-0,7158	-0,2886	-0,0502	-1,8889	-0,8290

Состав моделируемых дефектов согласован с работами других исследователей. Предложенный Б. Керноком в работе [16] состав дефектов в дальнейшем был использован для расчетов многими исследователями (П. Дьюаллеф и др. [17], К. Матиоудакис и

др. [18], К. Ромессис и др. [19]). Рассмотренные дефекты узлов – представители наиболее часто встречающихся на практике, они представлены как процентные отклонения параметров состояния от их базовых значений (таблица 2).

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	КВД	$\delta G_{КВД пр} = -1\%, \delta \eta_{КВД} = -0,7\%$
4	КВД	$\delta \eta_{КВД} = -1\%$
5	КВД	$\delta G_{КВД пр} = -1\%$
6	ТВД	$\delta A_{ТВД пр} = +1\%$
7	ТВД	$\delta A_{ТВД пр} = -1\%, \delta \eta_{ТВД} = -1\%$
8	ТВД	$\Delta \eta_{ТВД} = -1\%$
9	ТВ	$\Delta \eta_{ТВ} = -1\%$
10	ТВ	$\delta A_{ТВ пр} = -1\%, \delta \eta_{ТВ} = -0,4\%$
11	ТВ	$\delta A_{ТВ пр} = -1\%$
12	ТВ	$\delta A_{ТВ пр} = +1\%, \delta \eta_{ТВ} = -0,6\%$
13	С1	$\delta \mu_{С1} = +1\%$
14	С2	$\delta \mu_{С2} = -1\%$
15	С2	$\delta \mu_{С2} = +2\%$

Каждый из дефектов рассматривался на пяти режимах работы двигателя, соответствующих следующим значениям суммарной степени повышения давления $\pi_{КС}^*$: 21; 20,5; 20; 19,5; 19.

Постановка задачи

Целью данной работы было поставлено сравнение двух методов оценивания неизмеряемых параметров ГТД: метода, не использующего модель рабочего процесса в процедуре оценивания, представленного в работах [3–5], и метода, основанного на использовании модели рабочего процесса, представленного в работе [6]. В основе двух сравниваемых методов лежит построение регрессионной зависимости между неизмеряемыми и измеряемыми параметрами проточной части, различие лишь в способе ее построения.

Рассмотрим зависимость некоторой случайной величины y (последовательность ее значений y_1, y_2, \dots, y_n) от независимых признаков x_1, x_2, \dots, x_m :

$$y_t = \alpha_1 \cdot x_{t1} + \alpha_2 \cdot x_{t2} + \dots + \alpha_m \cdot x_{tm} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где $t = 1, \dots, n$ – номер наблюдения; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ – параметры, которые необходимо оценить; ε_t – случайное отклонение. Уравнение называется регрессией [20].

В методе, описанном в работах [3–5], в качестве искомой функции регрессионной модели рассматривается неизмеряемый параметр, в качестве аргументов – показания штатных

датчиков на нескольких режимах работы. При этом модель рабочего процесса двигателя не используется.

В методе, описанном в работе [6], в качестве искомой функции и аргументов регрессии рассматриваются параметры линейной статической модели двигателя. Для заданного режима работы она позволяет рассчитывать относительные отклонения $\delta \tilde{Y}$ вызванные малыми отклонениями $\delta \tilde{\theta}$:

$$\delta \tilde{Y} = \mathbf{H} \cdot \delta \tilde{\theta}. \quad (2)$$

Уравнение (2) является матричной формой записи уравнения. Это статическая задача в окрестности заданной режимной точки (в которой неизменны параметры окружающей среды и параметры режима). $\mathbf{H}(n \times m)$ – матрица коэффициентов влияния (МКВ), каждый элемент h_{ij} которой описывает линейную зависимость между соответствующим отклонением параметра технического состояния θ_j и отклонением признака состояния y_i . МКВ формируется из нелинейной поузловой модели в результате моделирования дефектов путем задания отклонений характеристик узлов. Элементы МКВ определяются следующим образом:

$$h_{ij} = \frac{y_i(\delta \theta_j) - y_{0i}}{y_{0i} \cdot \delta \theta_j}, \quad (3)$$

где y_{0i} – измеряемый параметр исправного двигателя, $\delta \theta_j$ – отклонение параметра технического состояния, $y_i(\delta \theta_j)$ – значение

измеряемого параметра двигателя, соответствующее $\delta\theta_j$, которое рассчитывается с помощью нелинейной модели. Таким же образом формируются линейные модели для неизмеряемых параметров $T_{Г}^*$, R и $C_{уд}$:

$$\delta T_{Г}^* = \bar{C}'_{T_{Г}^*} \cdot \delta \bar{\theta}, \quad (4)$$

$$\delta R = \bar{C}'_R \cdot \delta \bar{\theta}, \quad (5)$$

$$\delta C_{уд} = \bar{C}'_{C_{уд}} \cdot \delta \bar{\theta}. \quad (6)$$

Элементы вектора коэффициентов влияния \bar{C} формируются таким же образом, как и элементы матрицы \mathbf{H} .

Матрица \mathbf{H} для режима работы $\pi_{КС}^* = 21$ представлена в табл.1. В последних трех строках

табл.1 представлены векторы $\bar{C}'_{T_{Г}^*}$, \bar{C}'_R и $\bar{C}'_{C_{уд}}$ соответственно.

Чтобы определить отклонение неизмеряемого параметра, необходимо подставить в соответствующую из формул (4) – (6) значения отклонений параметров технического состояния. Последние могут быть определены как решение системы уравнений. Но для исследуемого ТРДД количество параметров технического состояния гораздо больше количества измеряемых параметров, что нарушает основное допущение классического регрессионного анализа ($\text{rank}(\mathbf{H}) < m$) [20]. Это значит, что матрица плана ($\mathbf{H}' \cdot \mathbf{H}$) не может быть обращена и задача не может быть решена классическим методом наименьших квадратов потому, что имеет бесконечное число решений. Поэтому необходимо использовать дополнительную информацию для того, чтобы регуляризовать задачу и получить оценки параметров в классе смещенных оценок. Это возможно сделать с помощью метода главных компонент [6].

Для достижения поставленной в данной работе цели предлагается оценить неизмеряемые $T_{Г}^*$, R и $C_{уд}$ для описанного в разд.1 объекта на нескольких режимах для каждого из перечисленных в табл. 2 дефектов двумя предложенными методами. Затем сравнить результаты с результатами нелинейной модели и сравнить погрешности оценивания.

3. Решение задачи

3.1 Метод, без использования моделей рабочего процесса в алгоритме оценивания

Суть метода заключается в следующем. В качестве искомой функции регрессионной модели рассматривается неизмеряемый параметр, в качестве аргументов – показания штатных

датчиков. Авторами был выбран следующий вид опорной (целевой) функции [3]:

$$f(X) = c_0 \cdot \prod_1^i X_i^{a_i}, \quad (7)$$

где $f(X)$ - неизмеряемый параметр;
 c_0 – постоянный коэффициент;
 a_i – показатель степени i -го аргумента.

Такой вид целевой функции выбран не случайно: многие процессы в двигателе описываются уравнениями, содержащими произведения параметров, возведенных в различные степени (уравнения расходов газа, степеней сжатия и расширения и др.). Модель преобразуется в классическую регрессионную модель вида путем логарифмирования правой части.

Далее в [3] авторами поясняется, что с помощью метода селекции отбирается оптимальный состав и количество аргументов, входящих в целевую функцию. В рассматриваемом нами случае измерительная информация настолько ограничена (число измеряемых параметров всего 4), что в качестве аргументов целевой функции будем использовать все доступные показания датчиков.

В состав обучающей выборки авторы предлагают включать весь набор измерительной информации во всем диапазоне режимов работы и высотно-скоростных условий работы ГТД. В нашем случае обучающая выборка сформирована для 15 дефектов (таблица 2) на ста тридцати трех режимах работы ($\pi_{КС}^* = 18,4, 18,45, 18,5 \dots 25$) при высоте полета 0 и числе Маха 0 – всего 1995 режимов.

В результате получили модели следующего вида:

$$T_{Г}^* = 2,8223 \cdot \frac{T_{Г}^{*0,5193} \cdot n_{вдпр}^{0,053} \cdot G_{Гпр}^{0,1705}}{n_{ндпр}^{0,1098}}, \quad (8)$$

$$R = -1,5609 \cdot \frac{n_{ндпр}^{0,8496} \cdot n_{вдпр}^{0,3775} \cdot G_{Гпр}^{0,7195}}{T_{Г}^{*0,5716}}, \quad (9)$$

$$C_{уд} = 1,5609 \cdot \frac{T_{Г}^{*0,5716} \cdot G_{Гпр}^{0,2805}}{n_{ндпр}^{0,8496} \cdot n_{вдпр}^{0,3775}}. \quad (10)$$

3.2 Регрессия на главных компонентах

Главные компоненты – это система ортогональных векторов, направления которых совпадают с собственными векторами корреляционной матрицы.

ляционной матрицы системы. Этот метод подробно изложен в работе [6]. Из представленной выше матрицы коэффициентов влияния путем центрирования и нормирования формируется корреляционная матрица системы. С помощью линейного преобразования исходных вектор-столбцов корреляционной матрицы формируются новые векторы, каждый из которых соответствует одному из характеристических чисел корреляционной матрицы. Исходная модель заменяется альтернативной моделью, связывающей $\delta\bar{Y}$ с новыми векторами. Влияние величины главных компонент на вектор $\delta\bar{Y}$ уменьшается по мере уменьшения соответствующих характеристических чисел (это интерпретируют как то, что первые главные компоненты «объясняют» основную часть экспериментальных данных [21]).

Поэтому можно использовать не все главные компоненты, а выбрать несколько первых из них. Это дает возможность понизить порядок системы (количество неизвестных главных компонент) и обеспечить однозначность решения задачи оценивания.

Таким образом, дисперсия оценок, которая для исходной системы бесконечна, уменьшается до конечных значений. Однако такое преобразование деформирует систему, поэтому оценки получаются смещенными. Поэтому на этапе формирования алгоритма оценивания необходимо настроить его так, чтобы смещения оценок были ограничены.

4. Сравнение результатов

Для 15 дефектов (таблица 2) на пяти режимах, упомянутых в разд. 1, проведен сравнительный анализ методов, описанных в разд. 3. Оба метода проверялись с учетом зашумлен-

ности измерительной системы. Введенный в каналы измерения шум, соответствует нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием. Результаты для T_{Γ}^* представлены в табл. 3. Для каждого режима в первой строке (со светлым фоном) приведены значения математического ожидания погрешности оценивания T_{Γ}^* методом, описанным в подразд. 3.2. Во второй строке (с темным фоном) приведены значения математического ожидания погрешности оценивания T_{Γ}^* методом, описанным в подразд. 3.1. Дисперсии погрешностей не приведены, т.к. для рассмотренных методов они одинаковы и малы. Аналогичным образом представлены результаты для погрешностей оценивания тяги (табл. 4) и удельного расхода топлива (табл. 5).

Выводы

Рассмотрена проблема определения неизмеряемых параметров ГТД с учетом изменения технического состояния в условиях недостаточной информации для прямого определения параметров, характеризующих это изменение. На данных для ТРДД с большой степенью двухконтурности получены погрешности двух методов решения этой проблемы. Анализ результатов, представленных в табл. 3 – 5, не позволяет однозначно определить лучший из них: метод, основанный на аппроксимации наборов данных, дает меньшее среднее значение погрешностей, однако метод, основанный на главных компонентах, дает меньшие значения максимальных погрешностей. Поэтому оба метода могут быть рекомендованы для практического использования.

Таблица 3 – Погрешность оценивания температуры газа перед турбиной, %

	Де- фект 1	Де- фект 2	Де- фект 3	Де- фект 4	Де- фект 5	Де- фект 6	Де- фект 7	Де- фект 8	Де- фект 9	Де- фект 10	Де- фект 11	Де- фект 12	Де- фект 13	Де- фект 14	Де- фект №15
Режим 1	-0,3548	-0,2245	-0,1601	0,1101	-0,2314	0,0896	0,2683	0,3387	0,1020	-0,0989	-0,1409	0,1869	-0,0340	0,1091	-0,2106
	-0,0322	-0,0067	-0,0355	-0,1482	0,0858	0,1980	-0,1636	0,0195	0,0592	0,0411	0,0308	0,0521	0,0239	0,0514	-0,0012
Режим 2	-0,3156	-0,2314	-0,1541	0,0968	-0,2146	0,0834	0,2614	0,3255	0,1024	-0,0903	-0,1310	0,1934	-0,0323	0,1158	-0,1523
	-0,0448	-0,0273	-0,0546	-0,1678	0,0634	0,1735	-0,1740	0,0085	0,0351	0,0253	0,0164	0,0246	0,0035	0,0294	-0,0128
Режим 3	-0,2267	-0,1596	-0,1572	0,0805	-0,2028	0,0564	0,2538	0,3034	0,1071	-0,0963	-0,1351	0,2337	-0,0302	0,1200	-0,0598
	-0,0423	-0,0277	-0,0669	-0,1756	0,0514	0,1595	-0,1834	0,0019	0,0229	0,0147	0,0064	0,0119	-0,0080	0,0186	-0,0087
Режим 4	-0,1621	-0,1116	-0,1528	0,0538	-0,1742	-0,0203	0,3126	0,2565	0,1202	-0,0928	-0,1371	0,2194	-0,0346	0,1276	-0,0272
	-0,1869	-0,1304	-0,1610	0,0567	-0,1837	-0,0085	0,3110	0,2603	0,1412	-0,1285	-0,1799	0,2766	-0,0394	0,1481	-0,0268
Режим 5	-0,2362	-0,1850	-0,1685	0,1313	-0,2371	0,1235	0,2530	0,3681	0,1133	-0,0945	-0,1408	0,2166	-0,0340	0,0773	-0,0918
	-0,0408	-0,0291	-0,0663	-0,1645	0,0549	0,1591	-0,1699	0,0116	0,0278	0,0157	0,0063	0,0160	-0,0048	0,0163	-0,0114

Таблица 4 – Погрешность оценивания тяги, %

	Де-фект 1	Де-фект 2	Де-фект 3	Де-фект 4	Де-фект 5	Де-фект 6	Де-фект 7	Де-фект 8	Де-фект 9	Де-фект 10	Де-фект 11	Де-фект 12	Де-фект 13	Де-фект 14	Де-фект 15
Режим 1	0,7350	0,3926	-0,4404	-0,2090	-0,3044	-0,2659	-0,0744	-0,2939	0,1636	-0,8228	-0,8922	0,8840	0,1632	0,2646	-0,5200
	-0,1710	-0,3593	-0,2559	-0,5455	-0,1515	-0,4318	-0,5626	-0,5959	-0,0925	-0,3427	-0,4577	-0,1107	-0,3118	0,0953	-1,2597
Режим 2	0,7282	0,4671	-0,4327	-0,1627	-0,3201	-0,1843	-0,0395	-0,2091	0,1759	-0,7680	-0,8312	0,9509	0,1623	0,2483	-0,5988
	-0,1845	-0,3582	-0,2909	-0,5895	-0,1819	-0,4779	-0,6031	-0,6444	-0,1104	-0,3971	-0,5172	-0,1209	-0,3445	0,0593	-1,2769
Режим 3	0,5384	0,3191	-0,4236	-0,0420	-0,3749	-0,1701	0,0651	-0,0667	0,1600	-0,7221	-0,7937	0,8176	0,1541	0,2375	-0,7917
	-0,2141	-0,3784	-0,3007	-0,6072	-0,1890	-0,4970	-0,6100	-0,6641	-0,1140	-0,4211	-0,5466	-0,1223	-0,3553	0,0356	-1,3095
Режим 4	0,3771	0,2018	-0,4140	-0,1582	-0,2715	-0,2640	-0,0707	-0,2157	0,1594	-0,7258	-0,7960	0,8965	0,1546	0,2593	-0,8760
	-0,2340	-0,3841	-0,2803	-0,5944	-0,1685	-0,5005	-0,5615	-0,6551	-0,0751	-0,4187	-0,5491	-0,0708	-0,3391	0,0764	-1,3082
Режим 5	0,3771	0,2018	-0,4140	-0,1582	-0,2715	-0,2640	-0,0707	-0,2157	0,1594	-0,7258	-0,7960	0,8965	0,1546	0,2593	-0,8760
	-0,1554	-0,3052	-0,1761	-0,4985	-0,0647	-0,4309	-0,4522	-0,5607	0,0307	-0,3255	-0,4598	0,0394	-0,2407	0,1687	-1,2237

Таблица 5 – Погрешность оценивания удельного расхода топлива, %

	Де-фект 1	Де-фект 2	Де-фект 3	Де-фект 4	Де-фект 5	Де-фект 6	Де-фект 7	Де-фект 8	Де-фект 9	Де-фект 10	Де-фект 11	Де-фект 12	Де-фект 13	Де-фект 14	Де-фект 15
Режим 1	-1,1764	-0,6715	0,2785	0,4445	-0,0118	0,3275	0,3263	0,5877	-0,0417	0,5845	0,6015	-0,5514	-0,1980	-0,1448	0,2559
	0,1712	0,3606	0,2566	0,5485	0,1518	0,4336	0,5658	0,5995	0,0926	0,3439	0,4598	0,1109	0,3127	-0,0952	1,2757
Режим 2	-1,1138	-0,7505	0,2777	0,3895	0,0199	0,2519	0,2818	0,4921	-0,0524	0,5432	0,5556	-0,6036	-0,1968	-0,1216	0,4148
	0,1848	0,3595	0,2918	0,5930	0,1822	0,4802	0,6068	0,6486	0,1106	0,3987	0,5199	0,1211	0,3456	-0,0592	1,2934
Режим 3	-0,8065	-0,5086	0,2749	0,3683	0,0191	0,2871	0,2570	0,4737	-0,0334	0,5396	0,5635	-0,4706	-0,1880	-0,1100	0,7273
	0,2146	0,3798	0,3016	0,6109	0,1894	0,4995	0,6138	0,6686	0,1141	0,4229	0,5496	0,1225	0,3565	-0,0356	1,3269
Режим 4	-0,6990	-0,4329	0,2937	0,2490	0,1035	0,0173	0,4599	0,2893	0,0838	0,4505	0,4313	-0,3701	-0,2201	-0,0037	0,8288
	0,2346	0,3855	0,2811	0,5980	0,1688	0,5031	0,5647	0,6595	0,0751	0,4205	0,5521	0,0708	0,3402	-0,0763	1,3256
Режим 5	-0,8604	-0,6051	0,2768	0,2762	0,0608	0,1130	0,2683	0,3564	-0,0107	0,4733	0,4739	-0,4977	-0,2018	-0,2208	0,6133
	0,1556	0,3062	0,1764	0,5010	0,0647	0,4328	0,4543	0,5639	-0,0307	0,3266	0,4619	-0,0394	0,2413	-0,1684	1,2388

Обсуждая направления дальнейших исследований, можно отметить как недостаток работы, приведенной в данной статье, то, что проверка погрешностей методов, обусловленных изменением технического состояния, проведена при тех же уровнях изменения технического состояния, при которых была сформирована обучающая выборка для метода, основанного на построении регрессионной модели. Это дает основание считать полученные значения погрешностей оценивания данным методом излишне оптимистичными. Поэтому в дальнейшем необходимо продолжить исследование этих методов, существенно расширив состав моделируемых состояний двигателя.

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.
- Мельникова Н.С. Управление двигателем по закону $T_{Г}^* = const$ с применением регрессионной модели $T_{Г}^*$ [Текст]/ Н.С. Мельникова, А.О. Кузьмичева // Полет. – 2009. – №2. – С. 29-37.
- Мельникова Н.С. Определение в полете величины расхода воздуха на входе в газотурбинный двигатель [Текст]/ Н.С. Мельникова, Г.В. Добрянский // Авиационная промышленность. – 2010. – №1. – С. 24-30.
- Мельникова Н.С. Применение регрессионных моделей при параметрической диагностике и контроле технического состояния авиационных двигателей [Текст]/ Н.С. Мельникова, Г.В. Добрянский // Авиационная промышленность. – 2011. – №2. – С. 42-47.
- 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.
- Stamatis A. Jet engine fault detection with discrete operating points gas path analysis [Text]/ A. Stamatis, K. Mathioudakis, K. Papailiou, G. Berios // Journal of Propulsion and Power. – 1991. – Vol. 7, №6. – P. 1043-1048.

8. Doel, D.L. An assessment of weighted-least-squares-based gas path analysis [Text]/ D.L. Doel // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1994. – №116. – P. 366-373.
9. Mathioudakis, K. Turbofan performance deterioration tracking using nonlinear models and optimization techniques [Text]/ K. Mathioudakis, Ph. Kamboukos, A. Stamatis // ASME Turbo Expo Paper No GT2002-30026, Amsterdam, The Netherlands, June 3-6 2002. – 9 p.
10. Litt, J.S. An optimal orthogonal decomposition method for Kalman filter-based turbofan engine thrust estimation [Text]/ J.S. Litt // ASME Turbo Expo Paper No GT2005-68808, Reno-Tahoe, Nevada, USA, June 6-9 2005. – 12 p.
11. Kobayashi, T. Application of a Constant Gain Extended Kalman Filter for in-flight estimation of aircraft engine performance parameters [Text]/ T. Kobayashi, D.L. Simon, J.S. Litt // ASME Turbo Expo Paper No GT2005-68494, Reno-Tahoe, Nevada, USA, June 6-9 2005. – 12 p.
12. Neural network applications to engine condition monitoring [Text]: ARD50069-2002. – Society of Automotive Engineers (SAE), 2002. – 24 p. – (U.S. Government document).
13. Mathioudakis, K. Multipoint non-linear method for enhanced component and sensor malfunction diagnosis [Text]/ K. Mathioudakis // ASME Turbo Expo Paper No GT2006-90451, Barcelona, Spain, May 8-11 2006. – 9 p.
14. Stamatis, A. Optimum use of existing sensor information for gas turbine diagnostics [Text]/ A. Stamatis // ASME Turbo Expo Paper No GT2008-50296, Berlin, Germany, June 9-13 2008. – 8 p.
15. Синтез систем управления и диагностики газотурбинных двигателей [Текст]: моногр. / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаченко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
16. Curnock V. OBIDICOTE Programme – Work Package 4: Steady-state test cases for engine deterioration: technical report [Text]/ Rolls Royce PLC; Curnock, 2001. – Document No DNS78608. – 12 p.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии [Текст]/ Е.З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
21. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст]: в 2-х кн. кн.2: пер. с англ./ Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 351 с.

Поступила в редакцию 12.07.2013.

М.В. Шевченко, С.В. Єпифанов. Оцінювання параметрів ГТД, що не вимірюються, з урахуванням зміни технічного стану проточної частини

Розглянуто відомі методи оцінювання параметрів ГТД, що не вимірюються. Вибрано та проаналізовано два методи, найбільш стійкі до зміни технічного стану, які не потребують значних обчислювальних ресурсів. Перший метод базується на формуванні регресійної залежності потрібного параметра на базі вибірки значень вимірюваних параметрів за всіх можливих станах двигуна, другий – на використанні лінійної математичної моделі робочого процесу та головних компонентах відповідної матриці системи. Об'єктом дослідження обрано двоконтурний трьохвальний ГТД з чотирма вимірюваними параметрами та двадцятьма трьома параметрами, що характеризують зміну технічного стану. У якості параметрів, що досліджуються та не вимірюються обрано температуру газу перед турбіною, тягу та питому витрату палива. За допомогою нелінійної повузлової моделі досліджуваного об'єкта моделювались дефекти проточної частини, що імітують зміну технічного стану. Отримано оцінки невимірюваних параметрів і виконано їх порівняння з результатами, що їх було отримано за допомогою нелінійної моделі. Проведено порівняння розглянутих методів на основі похибок оцінювання ними потрібних параметрів.

Ключові слова: газотурбінний двигун (ГТД), головні компоненти, діагностування, регресійна модель, статистична оцінка, питома витрата палива, тяга, температура газу перед турбіною.

M.V. Shevchenko, S.V. Yepifanov. Estimating nonmetering parameters taking into account gas path technical state changing

The paper deals with methods used to estimate nonmetering parameters of GTE using measured ones. Two methods were chosen among all already existing to carry out their comparative analysis. These methods are the most robust to changes in technical state and do not need big computational resources. These methods are synthesizing regression correlation of parameter of interest, basing the measuring system sample at all possible states of an engine and synthesizing regression model basing principal components of system correlation matrix. Three spool TFE was chosen to be the subject of analysis. Considered engine has four measured parameters and twenty three parameters to characterize technical state. Temperature at turbine inlet, thrust and specific fuel consumption were chosen to be nonmetering parameters of interest. Authors have modeled faults of gas-path using mathematical model of the engine by simulating changing of technical state. Estimations of parameters of interest were compared with results of modeling using non-linear mathematical model. Errors to estimate parameters of interest were adopted to be criterion for comparison.

Key words: *gas turbine engine (GTE), principal components, diagnostics, regression model, statistical assessment, specific fuel consumption, thrust, turbine inlet temperature*