

УДК 629.179.13

М.В. ШЕВЧЕНКО, С.В. ЕПИФАНОВ

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РИДЖ-ОЦЕНИВАНИЯ

*Рассмотрена проблема оценки отклонений неизмеряемых параметров ГТД путем статистического анализа отклонения измеряемых параметров в условиях изменения технического состояния двигателя и недостатка информации об этом изменении, обусловленном ограниченными возможностями измерительной системы. Рассмотрены известные методы решения исследуемой проблемы, их достоинства и недостатки. Проведен дисперсионный анализ и выявлена мультиколлинеарность элементов матрицы плана поставленной задачи. Для решения проблемы рассмотрена процедура с использованием «следа гребня» (ridge trace), позволяющая получить устойчивые оценки в классе смещенных оценок. С помощью нелинейной поузловой модели исследуемого объекта были смоделированы дефекты проточной части и получены оценки отклонения исследуемого параметра с применением простейшей итерационной процедуры ridge-оценивания. Определены погрешности оценивания.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, диагностирование, тяга, корреляция, мультиколлинеарность, статистическая оценка, ридж-оценка.

### Введение

Современные стратегии эксплуатации газотурбинных силовых установок основываются на техническом обслуживании и управлении ими по техническому состоянию. Для успешной реализации этих задач необходима информация о текущем техническом состоянии. Для полного представления о причинах и характере изменения технического состояния двигателя, необходимо построить характеристики узлов. Для этого необходимо знать полную температуру, полное и статическое давление на входе и выходе из каждого узла, и, в случае компрессора и турбины, частоту вращения ротора. На практике большая часть этой информации недоступна. Помимо недостатка информации, как правило, наблюдается шум и отклонения показаний датчиков, связанные с их погрешностями.

Поэтому при определении технического состояния двигателей прежде всего контролируются интегральные параметры. Для турбореактивных двигателей таковыми являются тяга и удельный расход топлива, однако в полете непосредственно не измеряются.

Известно несколько методов, позволяющих при диагностировании двигателя преодолеть проблему недостатка измерений. В [7] описывается многорежимный подход, суть которого заключается в использовании результатов измерения параметров двигателя на нескольких режимах его работы и получении недостающей информации из дополнительных рабочих точек. Такой подход лишь немного увеличивает точность обычного МНК, так как матрица коэффициентов

влияния по режимам меняется незначительно. В [8] объясняется, что многорежимный подход основывается на допущении постоянства относительных отклонений параметров состояния. Нарушение этого допущения может привести к существенным погрешностям оценивания. В [8] предлагается также метод, основанный на рассмотрении отклонений параметров в одной и той же рабочей точке, описанной разными признаками состояния. Такой метод устраняет недостаток многорежимного подхода, но не улучшает существенно точность оценок. Достаточно популярное в настоящее время направление в области диагностики ГТД – нейронные сети. Нейронную сеть можно обучать в процессе работы двигателя, и она будет настраиваться с учетом изменения технического состояния объекта, причем она может работать с зашумленными данными. Но для обучения нейросетевой модели необходимо или измерять моделируемый параметр, или иметь информацию о его связи с измеряемыми параметрами. Однако эта связь зависит от того, какие именно изменения происходят в узлах при изменении технического состояния двигателя. Поэтому метод нейронных сетей не решает проблему определения неизмеряемых параметров в условиях изменения технического состояния. В [9] отмечено, что для мониторинга технического состояния с целью определения постепенной деградации двигателя широко используется алгоритм «фильтр Калмана», который дает высокую точность. В этой же работе предлагается в дополнении к фильтру Калмана применять проверку по обобщенному коэффициенту вероятности с целью обнаружения внезапных отказов. Но из материалов работы видно, что авторы выполня-

ют диагностику по шести параметрам состояния при семи измерениях, то есть в условиях избытка информации. А значит, подобный алгоритм не решает проблему недостатка информации. В [10] авторы предлагают разбивать статически неопределимую задачу (когда измерений меньше, чем искомым параметров) на две подзадачи: первая – количество измерений равно количеству неизвестных, вторая – остаток неизвестных гораздо меньше количества измерений. Затем применяется метод наименьших квадратов (МНК) и выбирается комбинация, которая ближе всего отражает объект. В работе нет данных о работоспособности метода в условиях изменения характеристик (возможно, при изменении характеристик более подходящим окажется иная комбинация данных, чем в исходном состоянии).

Итак, проблема разработки алгоритмов для определения неизмеряемых параметров двигателей в настоящее время не решена и требует дальнейших исследований.

## 1. Постановка задачи

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;  $\varepsilon_t$  – случайное отклонение. Уравнение (1) в дальнейшем будем называть регрессией [1]. Анализ уравнения (1) и методика определения параметров становятся более наглядными, а расчетные процедуры существенно упрощаются, если воспользоваться матричной записью уравнения (1):

$$\vec{Y} = X \cdot \vec{\beta} + \vec{\varepsilon}, \quad (2)$$

где  $\vec{Y}$  – вектор зависимой переменной размерности  $(n \times 1)$ ,  $X$  – матрица независимых переменных  $x_1, x_2, \dots, x_m$  размерностью  $(n \times m)$ ;  $\vec{\beta}$  – подлежащий оцениванию вектор неизвестных параметров размерности  $(m \times 1)$ ;  $\vec{\varepsilon}$  – вектор случайных отклонений (возмущений) размерности  $(n \times 1)$  [1].

Регрессионная модель, рассматриваемая в данной статье, имеет вид

$$\delta \vec{Y} = H \cdot \delta \vec{\theta}, \quad (3)$$

где  $\delta \vec{Y}$  – относительные отклонения термогазодинамических параметров – признаков состояния (температуры, давления, частоты вращения роторов, расход топлива и др.) от их значений в исправном состоянии;

$\delta \vec{\theta}$  – малые относительные отклонения параметров технического состояния (внутренние коэф-

фициенты нелинейной поузловой модели, характеризующие степени развития неисправностей, позволяющие смещать характеристики узлов в различных направлениях и имитировать тем самым неисправности этих узлов – отклонения КПД узла, расхода проходящего через него рабочего тела, коэффициента восстановления полного давления, степени повышения (понижения) давления);

$H$  – матрица коэффициентов влияния (МКВ), каждый элемент которой описывает линейную зависимость между соответствующим отклонением параметра технического состояния и соответствующим признаком состояния.

МКВ формируется из нелинейной поузловой модели в результате моделирования дефектов путем задания коэффициентов  $\delta \theta$ .

Примером не измеряемого, но важного для оценки технического состояния двигателя параметра является тяга. Отклонение дроссельной характеристики для тяги от исходной является признаком изменения технического состояния двигателя. Оно является результатом комплексного изменения параметров проточной части. В данной работе предлагается выполнить анализ влияния изменения технического состояния газотурбинного двигателя на изменение его параметров и на примере тяги предложить алгоритм определения ее значения.

В работе [5] представлен обзор способов измерения тяги, и показано, что ни один из этих способов не способен учитывать изменение тяги с изменением технического состояния силовой установки в процессе эксплуатации.

В данной статье исследуются особенности применения регрессионного анализа для определения изменения тяги трехвального турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) типа Д-436-Т1. При этом изменение технического состояния описывается тринадцатью параметрами, а признаки состояния контролируются пятью датчиками. Также необходимо определить область применимости, достоинства и недостатки выбранного метода.

Так как количество параметров технического состояния ГТД больше количества измеряемых параметров ( $\text{rank}(H) < m$ ), применение регрессионного анализа в классическом виде невозможно из-за невыполнения одного из предположений, на которых он базируется [1]. Следовательно, при оценивании тяги ГТД по штатно измеряемым параметрам при изменении технического состояния необходимо выбрать метод регрессионного анализа, который способен давать решения при любом значении ранга МКВ.

В качестве исходной информации об объекте исследования использована нелинейная поузловая модель рабочего процесса трехвального ТРДД.



Метод гребневой регрессии в его простейшей форме состоит в следующем. Пусть  $\mathbf{Z}$  представляет собой подходящим образом центрированную и нормированную матрицу  $\mathbf{H}$  и состоит из  $g$  столбцов  $Z_1, Z_2, \dots, Z_g$ . Тогда оценки параметров  $\delta\bar{\theta}$  можно получить по формуле [4]:

$$\delta\bar{\theta}(\alpha) = (Z^T Z + \alpha \cdot I)^{-1} \cdot Z^T \delta\bar{Y}; \quad (7)$$

где  $I$  – единичная матрица такой же размерности, как  $Z^T Z$ ;  $\alpha$  – положительное число (обычно лежит в интервале  $(0, 1)$ ).

Основной проблемой формирования алгоритма ридж-оценивания для решения практических задач является выбор значения параметра  $\alpha$ . Один из подходов к решению этой проблемы основан на построении и исследовании графика зависимости  $\delta\bar{\theta}_j(\alpha)$  от  $\alpha$  для  $j = 1, 2, \dots, g$ . Такой график называется следом гребня (ridge trace). Его вид определяется тем, что по мере увеличения параметра  $\alpha$  оценки уменьшаются и стремятся к нулю, когда  $\alpha$  стремится к бесконечности. Затем выбирается определенная величина  $\alpha$ , значение которой является компромиссным. После того, как значение  $\alpha$  выбрано, величины  $\delta\bar{\theta}_j(\alpha)$  используются в конечном варианте регрессионного уравнения. Результатом решения такого уравнения являются оценки, которые не являются оценками метода наименьших квадратов, имеют смещение, но оказываются более устойчивыми в указанном выше смысле. Они приводят к более низкому значению полного среднего квадрата ошибки, поскольку вызванное ими уменьшение разброса ошибок будет больше того, которое нужно для компенсации введенного смещения. Другими словами, погрешность, вносимая при смещении оценок, меньше, чем погрешность, вызываемая разбросом ошибок в классе несмещенных оценок. Однако Н. Дрейпер и Г. Смит [4] рекомендуют относиться к гребневым оценкам и к выбору  $\alpha$  с определенной осторожностью, поясняя «...Гребневая регрессия не есть панацея от всех бед. Это обычное решение задачи МНК-оценивания при наличии некоторой дополнительной информации о параметрах. Если дополнительная информация разумная и не противоречит имеющимся данным, то гребневая регрессия оправдана».

### 2.3. Применение гребневой регрессии к оцениванию параметров ГТД

Рассмотрим случай засорения компрессора. Моделируем его с помощью нелинейной модели, смещаая характеристику компрессора влево и вниз по  $\pi_{квд}$  и по КПД. Для этого задаем

$$\delta\pi_{квд} = -0.01, \delta G_{квд пр.} = -0.02, \delta\eta_{квд} = -0.02.$$

При этом признаки состояния изменяются следующим образом:

$$\delta P_{квд} = -0.0102, \delta T_r = 0.0106, \delta n_{нд} = -0.0044, \\ \delta n_{сд} = -0.0062, \delta n_{вд} = 0.0007, \delta P_{мод} = -0.00992.$$

Варьируя значения  $\alpha$  от 0 (случай обычного МНК) до 1, строим график – след гребня (рис. 1). Как видно из графика, при  $\alpha > 2 \cdot 10^{-7}$  оценки коэффициентов регрессионной модели стабилизируются.

Приблизительно оценив значение  $\alpha$ , принимаем начальное его значение, равное  $2 \cdot 10^{-7}$ . Затем определяем величину этого коэффициента более точно в соответствии с методом, предложенном Херлом, Кеннардом и Болдуином [4]. Они предложили выбирать эту величину согласно формуле

$$\alpha = \frac{g \cdot s^2}{\{\delta\bar{\theta}_z(\alpha)\}^T \{\delta\bar{\theta}_z(\alpha)\}}, \quad (8)$$

где  $g$  – число параметров модели;  $s^2$  – остаточный средний квадрат, входящий в таблицу дисперсионного анализа;  $\delta\bar{\theta}_z(\alpha)$  – оценки при  $\alpha$  на предыдущей итерации.

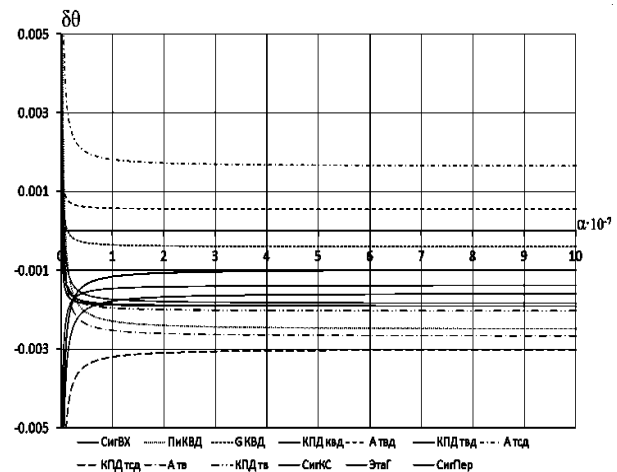


Рис. 1. След гребня

След гребня для абсолютного значения тяги представлен на рис. 2.

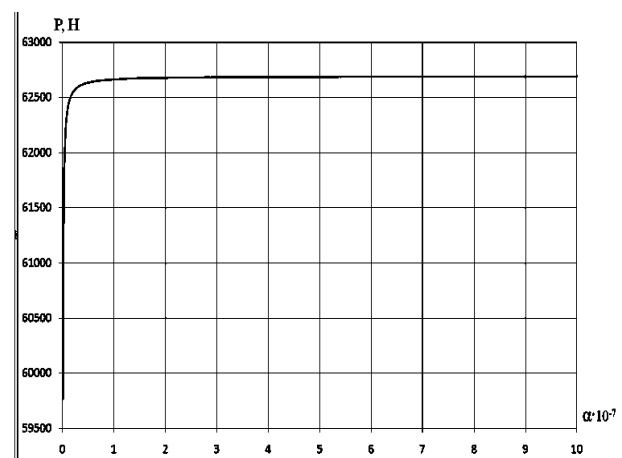
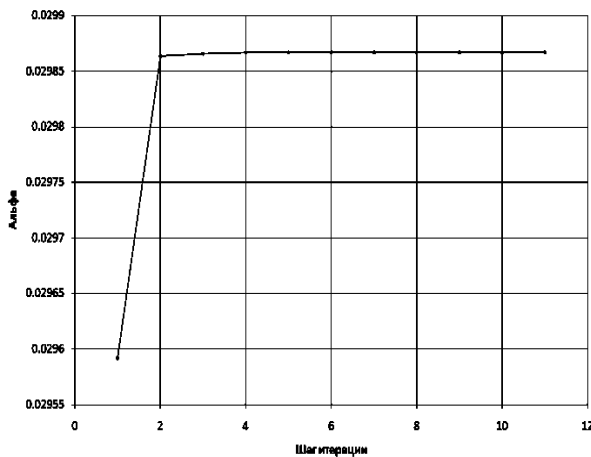


Рис. 2. След гребня для тяги Р

Изменение значения коэффициента  $\alpha$  в процессе итерации показано на рис. 3.

Рис. 3. Итерационный подбор  $\alpha$ 

По результатам итерационной процедуры принимаем  $\alpha = 0.029867$  и из уравнения (7) получаем:

$$\det(Z \cdot Z + \alpha \cdot I) = 7.505 \cdot 10^{-13}$$

Характеристические числа  $\lambda_i$  новой матрицы плана имеют следующие значения:

$$\lambda = (0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.2987, 0.8815, 1.7221, 4.0314, 6.4845).$$

Зная значения вектора  $\bar{C}$  в системе уравнений (4), можем определить значение  $\delta P$ :  $\delta P = -0.01437$ .

Полученное значение сравниваем со значением, полученным из нелинейной поузловой модели:  $\delta P_{\text{мод}} = -0.00992$ .

Погрешность определения тяги с помощью ридж-оценивания равна  $(\delta P_{\text{мод}} - \delta P) \cdot 100\%$  составляет  $\Delta = 0.445\%$ .

Подобным образом смоделируем три различных изменения технического состояния и сравним результаты оценивания с результатами расчетов, полученными с использованием нелинейной модели:

1. Изменяется  $\delta A_{\text{твд}}$ ,  $\delta \eta_{\text{твд}}$ :

$$\delta P_{\text{квд}} = -0.02678, \delta T_{\text{т}} = 0.01464, \delta n_{\text{нд}} = -0.00598, \delta n_{\text{сд}} = -0.00845, \delta n_{\text{вд}} = -0.01908, \delta P = -0.02815; \delta P_{\text{мод}} = -0.01337; \Delta = 1.48\%.$$

2. Изменяется  $\delta \eta_{\text{твд}}$ ,  $\delta \sigma_{\text{тс}}$ ,  $\delta \eta_{\text{т}}$ :

$$\delta P_{\text{квд}} = -0.00598, \delta T_{\text{т}} = -0.00101, \delta n_{\text{нд}} = -0.01381, \delta n_{\text{сд}} = -0.01245, \delta n_{\text{вд}} = -0.0079, \delta P = -0.00823; \delta P_{\text{мод}} = -0.03286; \Delta = 2.46\%.$$

3. Изменяется  $\delta \eta_{\text{квд}}$ ,  $\delta \pi_{\text{квд}}$ ,  $\delta \eta_{\text{твд}}$ ,  $\delta \eta_{\text{тсд}}$ ,  $\delta \eta_{\text{тв}}$ ,  $\delta \sigma_{\text{вх}}$ :

$$\delta P_{\text{квд}} = -0.02649, \delta T_{\text{т}} = 0.02883, \delta n_{\text{нд}} = -0.01164, \delta n_{\text{сд}} = -0.01147, \delta n_{\text{вд}} = -0.01283, \delta P = -0.04108; \delta P_{\text{мод}} = -0.04399; \Delta = 0.29\%.$$

## Выводы

Рассмотрена проблема расчета неизмеряемых параметров ГТД при изменении технического состояния двигателя и недостатке информации об

этом изменении, обусловленном ограниченными возможностями измерительной системы.

Рассмотрены известные методы решения исследуемой проблемы, их достоинства и недостатки. Для решения поставленной задачи предложено использовать метод ридж-оценивания, который позволяет получить неточные (смещенные) оценки, но в условиях недостатка информации (при большем разбросе ошибок оценивания) эти оценки устойчивы и имеют меньшее значение полного среднего квадрата ошибок.

Предложенный метод проверен на примере нелинейной поузловой модели трехвального ТРДД. Оценена точность полученных результатов. Значения погрешностей лежат в диапазоне от 0,3% до 2,5% (тем больше, чем меньше степень смещения характеристик узлов).

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности предложенного метода, но показывают его высокие погрешности. Без уменьшения погрешностей исследуемый алгоритм для решения поставленной задачи не подходит, так как полученные значения погрешностей соизмеримы с искомыми отклонениями (так, например, в эксплуатации ГТД отклонение тяги больше чем на 2% свидетельствует о неудовлетворительном техническом состоянии). Пути к уменьшению значений погрешностей можно искать в двух направлениях:

1). Изменить алгоритм расчета параметра смещения  $\alpha$ , который применялся в данной работе.

2). Использовать определенные ограничения, при которых гребневая оценка будет абсолютно корректной [4]:

– байесовская формулировка регрессионной задачи при наличии определенных априорных данных о параметрах;

– формулировка регрессионной задачи как задачи МНК-оценивания с ограничениями определенного типа на параметры (например ограничения «сферического» типа:  $\beta'_z \cdot \beta_z \leq c^2$ , где  $c$  – радиус сферы).

## Литература

1. Демиденко Е.З. *Линейная и нелинейная регрессии* / Е.З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.

2. Добрянский Г.В. *Динамика авиационных ГТД* / Г.В. Добрянский, Т.С. Мартынова. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

3. Дрейпер Н. *Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. кн.1: пер. с англ.* / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

4. Дрейпер Н. *Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. кн.2: пер. с англ.* / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 351 с.

5. Епифанов С.В. *Определение тяги ГТД с учетом изменения технического состояния проточной части* / С.В. Епифанов, М.В. Шевченко // *Авиационно-космическая техника и технология: научн.-техн. журн.* – 2009. – № 10 (67). – С. 184-189.

6. Химмельблау Д. *Анализ процессов статистическими методами: пер. с англ.* / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 960 с.

7. Mathioudakis K. *Multipoint non-linear method for enhanced component and sensor malfunction diagnosis* / K Mathioudakis, P. Kamboukos // *ASME Turbo Expo – 2006. ASME paper, GT – 2006 – 90451, May 8-11, 2006, Barcelona, Spain.* – 9 p.

8. Stamatis A. *Optimum use of existing sensor information for gas turbine diagnostics* / A. Stamatis // *ASME Turbo Expo – 2008. ASME paper, GT – 2008 – 50296, June 9-13, 2008, Berlin, Germany.*

9. Borguet S. *A generalized likelihood ratio test for adaptive gas turbine health monitoring* / S. Borguet, O. L'èonard // *ASME Turbo Expo – 2008. ASME paper, GT – 2008 – 50117, June 9-13, 2008, Berlin, Germany.* – 11 p.

10. Bauer M. *Gas turbine fault diagnostics using a fusion of least squares estimations and fuzzy logic rules* / M. Bauer, H. Lipowsky, D. Nagy, S. Staudacher // *ASME Turbo Expo – 2008. ASME paper, GT – 2008 – 50190, June 9-13, 2008, Berlin, Germany.* – 10 p.

Поступила в редакцию 1.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры конструкции авиационных двигателей Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ГТД ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РІДЖ-ОЦІНЮВАННЯ

*М.В. Шевченко, С.В. Єпіфанов*

Розглянуто проблему оцінювання відхилення невимірюваних параметрів ГТД шляхом статистичного аналізу відхилень вимірюваних в умовах зміни технічного стану двигуна і браку інформації щодо цієї зміни, обумовленого обмеженими можливостями вимірювальної системи. Розглянуто відомі методи вирішення досліджуваної проблеми, їх переваги та недоліки. Здійснено дисперсійний аналіз і виявлено мультиколінеарність елементів матриці плану поставленої задачі. Для вирішення проблеми було запропоновано процедуру з використанням «сліду гребеня» (ridge trace), яка дозволяє проводити аналіз нестійких оцінок у класі зміщених оцінок. За допомогою нелінійної повузлової моделі досліджуваного об'єкта було змодельовано дефекти проточної частини, і отримано оцінки відхилення досліджуваного параметра з використанням найпростішої ітераційної процедури ridge – оцінювання для поставленої задачі. Отримані результати з використанням найпростішої ітераційної процедури ridge-оцінювання. Визначено похибки оцінювання.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун (ГТД), діагностування, невимірювані параметри, тяга, кореляція, мультиколінеарність, статистична оцінка, рідж-оцінка.

### GAS TURBINE PARAMETERS DEVIATION DETERMINATION USING RIDGE-ESTIMATION

*M.V. Shevchenko, S.V. Yepifanov*

The problem of the gas turbine engine nonmetering parameters deviations estimation using deviation of monitored parameters statistical analysis has been handled. Possible changing of the engine technical condition and lack of information about this changing caused by metering system limited capacity has been taken into account. Known procedures of solving assigned problem are considered. Variance analysis has been carried out. Multicollinearity of the assigned task design matrix elements has been found out. The ridge-trace procedure that allows estimating unstable assessments in the biased assessments class has been suggested and analyzed. The faults of the engine gas path were modeled using nonlinear component-based model of observable object. The assessments of parameters deviation with simple iteration procedure of ridge-estimation application have been obtained. The accuracy of assessments has been estimated.

**Key words:** gas turbine engine, diagnostics, nonmetering parameters, thrust, correlation, multicollinearity, statistical assessment, ridge-assessment.

**Шевченко Максим Владимирович** – аспірант, м.н.с. кафедри конструкції авіаційних двигателів Національного аэрокосмічного університета ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: mv\_shevchenko@ukr.net.

**Єпіфанов Сергей Валерьевич** – доктор техн. наук, професор, завідує кафедрою конструкції авіаційних двигателів Національного аэрокосмічного університета ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: aedlab@gmail.com.