

УДК 629.179.13

С.В. ЕПИФАНОВ, М.В. ШЕВЧЕНКО

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГИ ГТД С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

*Рассмотрена проблема расчета неизмеряемых параметров ГТД путем статистического анализа измеряемых 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. Для наглядного представления поставленной задачи (визуализации в трехмерном пространстве) составлена упрощенная задача с двумя измеряемыми, тремя влияющими и одним расчетным параметрами. Проведен дисперсионный анализ и выявлена мультиколлинеарность элементов матрицы плана поставленной задачи. Для решения проблемы была предложена процедура с использованием «следа гребня» (ridge trace), позволяющая проводить анализ неустойчивых оценок. Учтены известные достоинства и недостатки предложенной процедуры. Получены результаты с применением простейшей итерационной процедуры ridge-оценивания для поставленной задачи. Определены дальнейшие направления исследования.*

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

### Введение

По мере совершенствования авиационной техники все более актуальными становятся вопросы оптимального управления режимами полета и режимами работы силовой установки. Перспективные стратегии эксплуатации основываются на управлении техническим состоянием объектов. Для успешной реализации этих задач необходима информация о текущих значениях параметров рабочего процесса двигателей.

Однако самые важные параметры двигателя непосредственно не измеряются. Например, точное знание температуры за камерой сгорания позволило бы точно определять эффективность двигателя как тепловой машины. Точная информация о расходе рабочего тела, проходящего через двигатель, позволила бы определять КПД. Для летательного аппарата важнейшими характеристиками двигателя являются удельная тяга и удельный расход топлива, которые определяют длину пробега при взлете и дальность полета соответственно. В свою очередь, удельный расход топлива представляет собой отношение физического расхода топлива к тяге двигателя. Это определяет важность определения тяги.

Измерить тягу непосредственно в полете практически невозможно, так как она представляет собой комплексный результат взаимодействия двигателя с окружающей воздушной средой. Поэтому необходимо организовать ее расчет на основании измеряемых параметров двигателя непосредственно

в полете для решения задач управления, или при наземной обработке зарегистрированной в полете параметрической информации для определения технического состояния.

На практике можно систематически снимать двигатель с летательного аппарата и на стенде измерять значение тяги, оценивая ее изменение, связанное с выработкой ресурса. Сотрудниками ЛИИ им. М.В. Громова предложен метод измерения тяги с помощью струны, установленной на срезе сопла (оценка тяги происходит по ее натяжению). Этот метод не требует снятия двигателя, но приводит к увеличению стоимости, расходованию ресурса и уменьшению суммарного полетного времени, а для боевой техники – к снижению боеготовности.

Тягу двигателей, у которых движителем является воздушный винт или винтовентилятор, в некоторых случаях измеряют, помещая гидромеханический датчик измерения тяги в узел опоры винта (винтовентилятора), так как в двигателях этого типа основная доля тяги генерируется винтом (винтовентилятором). Но у такого метода определения тяги низкая точность из-за особенностей устройства датчика. В ряде случаев предлагается рассчитывать тягу двухконтурных двигателей, зная частоту вращения вентилятора, так как в двигателях этого типа основная доля тяги генерируется во втором контуре. Но при длительной эксплуатации вследствие естественного износа узлов зависимость тяги от частоты вращения вентилятора изменяется, и ее необходимо систематически корректировать с использованием

стендовых испытаний. Кроме того, для двигателей с большой степенью двухконтурности известны дефекты, при которых тяга двигателя уменьшается при неизменной частоте вращения оборотах вентилятора. Для ТРДД с малой степенью двухконтурности и ТРД точность расчета тяги по одному из измеряемых параметров проточной части становится еще меньше.

В работе [2] для определения тяги с учетом влияния эксплуатационных факторов предложено использование регрессионных моделей, в которых все измеряемые в двигателе параметры являются аргументами, а неизмеряемые - функциями. Такая модель, подобранная, например, методом группового учета аргументов, имеет достаточно высокую точность на совокупности исходных данных для ее формирования. Но при изменении технического состояния двигателя (например, вследствие возникновения дефекта), модель необходимо уточнять (точнее - строить заново). Уточнять имеющуюся регрессионную зависимость неэффективно, т.к. между параметрами регрессионной модели проявляются корреляции, и оценки параметров модели становятся неустойчивыми. В работе [5] показано, что при использовании метода группового учета аргументов в качестве критерия перехода на следующий уровень селекции (выбора аргументов и структуры модели) следует применять не только значение относительной среднеквадратичной ошибки, но и значение индекса корреляции между аргументами. Но малый коэффициент взаимной корреляции аргументов нелинейной модели не означает их независимость, а удаление из модели аргументов с высокими коэффициентами корреляции уменьшает возможности использования информации об объекте, содержащейся в статистической выборке, что может привести к снижению точности модели. Единственным корректным решением является формирование новой модели, но для этого необходимо измерить значения тяги, что в эксплуатационных условиях не представляется возможным.

В данной работе рассматривается метод определения тяги с использованием математической модели рабочего процесса двигателя.

### Постановка задачи

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

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

где  $t = 1, \dots, n$  означает 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):

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

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

Регрессионная модель, рассматриваемая в данной статье имеет вид

$$\delta \bar{Y} = H \cdot \delta \bar{\Theta}, \quad (3)$$

где  $\delta \bar{Y}$  - относительные отклонения термогазодинамических параметров - признаков состояния (температуры, давления, расходы рабочего тела, частоты вращения роторов, расход топлива и др.) от их значений в исправном состоянии;  $\delta \bar{\Theta}$  - малые относительные отклонения параметров технического состояния (внутренние коэффициенты нелинейной поузловой модели, характеризующие степени развития неисправностей, позволяющие смещать характеристики узлов в различных направлениях и имитировать тем самым неисправности этих узлов);  $H$  - 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  $\delta \bar{\Theta}$ .

В данной статье исследуются особенности применения регрессионного анализа для определения тяги трехвального турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) на простом для визуализации трехмерном примере - двух измеряемых (полное давление за турбиной вентилятора и температура за турбиной среднего давления) и одном контролируемом (тяга) параметре. При этом изменение технического состояния описывается тремя параметрами: КПД вентилятора, КПД компрессора высокого давления, КПД турбины среднего давления. Одной из целей работы является анализ, на основании полученных результатов, возможности применения выбранного метода нахождения оценок (под оценкой понимаем любую функцию случайной выборки [6]) для полного комплекса измеряемых параметров и параметров технического состояния исследуемого объекта. 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.

## Решение поставленной задачи

### 1.1. Анализ исходных данных

МКВ отклонений параметров технического состояния исследуемого объекта на измеряемые параметры в его проточной части представлена в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты влияния параметров отклонения технического состояния на измеряемые параметры

|                         | $\delta\text{КПДв}$ | $\delta\text{КПДквд}$ | $\delta\text{КПДтсд}$ |
|-------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\delta P_{\text{ТВ}}$  | -0.007              | -0.008                | -0.079                |
| $\delta T_{\text{тсд}}$ | -0.213              | -0.252                | -0.648                |
| $\delta P$              | 0.508               | -0.086                | -0.309                |

Контролируемый параметр (тягу) обозначим  $P$ , вектор коэффициентов влияния отклонений параметров технического состояния на тягу –  $\vec{C}$ . Таким образом, получаем систему уравнений, решение которой относительно  $\delta\vec{\Theta}$  является решением поставленной задачи:

$$\begin{cases} \delta\vec{Y} = H \times \delta\vec{\Theta}; \\ \delta P = \vec{C} \times \delta\vec{\Theta}. \end{cases} \quad (4)$$

Так как матрица  $H$  прямоугольная и с ней невозможно провести процедуру инверсии, система не имеет единственного решения (неизвестных параметров в такой системе больше, чем уравнений). В подобном случае применяется процедура так называемой псевдоинверсии, суть которой заключается в применении к уравнению регрессии метода наименьших квадратов. В результате получаем вектор оценок параметров:

$$\delta\vec{\Theta} = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot \delta\vec{Y}, \quad (5)$$

где  $\delta\vec{\Theta}$  – оценка параметров технического состояния ГТД.

Дальнейшие расчеты производим с помощью специально написанной нами компьютерной про-

граммы (программирование осуществлялось на языке программирования Visual C++).

Определитель матрицы плана:

$$\det(H^T \cdot H) = -8.8917 \cdot 10^{-23}. \quad (6)$$

Очевидно, что определитель вырожденной матрицы в точности равен нулю. Отличие от нуля Значения, полученного в результате выполнения программы, объясняется только компьютерной точностью.

Вырожденность матрицы плана говорит о возможной мультиколлинеарности (под мультиколлинеарностью понимаем сопряженность независимых переменных). Характеристические числа  $\lambda_i$  и характеристические векторы  $T_i$  матрицы плана имеют следующие значения:

$$\lambda = \begin{bmatrix} -1,3055 \cdot 10^{-18} \\ 6,8832 \cdot 10^{-4} \\ 5,3444 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix};$$

$$T_1 = (7,67679 \cdot 10^{-1} \quad -6,40827 \cdot 10^{-1} \quad -3,12828 \cdot 10^{-3});$$

$$T_2 = (5,71058 \cdot 10^{-1} \quad 6,86298 \cdot 10^{-1} \quad -4,50431 \cdot 10^{-1});$$

$$T_3 = (2,90795 \cdot 10^{-1} \quad 3,44000 \cdot 10^{-1} \quad 8,92806 \cdot 10^{-1}).$$

Как видно,  $\lambda_1 = 0$  (малое значение, полученное в результате вычислений, объясняется компьютерной точностью), что отражает взаимную сопряженность параметров, входящих в исследуемую регрессионную модель. При рассмотрении проблемы мультиколлинеарности большую наглядность дает геометрический подход [1]. Как известно, геометрическим местом точек, составляющих доверительное множество (при числе параметров модели, равном 3), в случае применения линейной модели и квадратного критерия оценивания является внутренность эллипсоида. На основании значений характеристических чисел (являющихся величинами полуосей эллипсоида) и характеристических векторов (определяющих направление осей эллипсоида), получен характеристический эллипсоид (рис. 1).

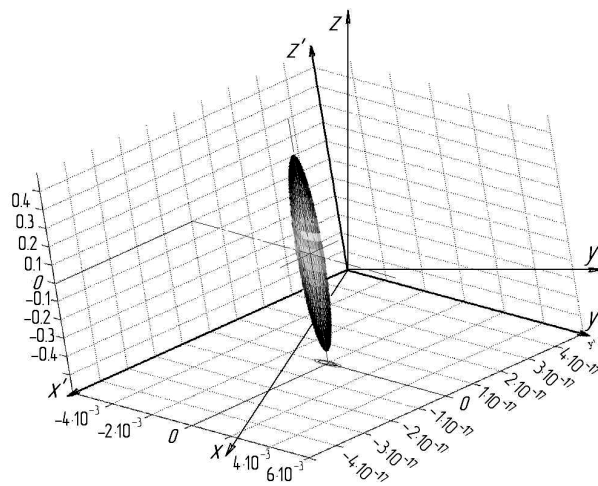


Рис. 1. Характеристический эллипсоид

На рис. 1  $(x', y', z')$  – система координат, в которой уравнение эллипсоида имеет канонический вид;  $(x, y, z)$  – исходная система координат.

Если обратить внимание на масштаб числовых осей на рис. 1 (исходя из значений характеристических чисел), эллипсоид в данном случае вырождается в эллипс.

Далее составим матрицу сопряженности  $R$ , чтобы исключить влияние масштаба переменных, входящих в регрессионную модель и понять степень сопряженности параметров модели:

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0,99609 \\ 1 & 1 & 0,99599 \\ 0,99609 & 0,99599 & 1 \end{vmatrix}$$

Из анализа матрицы сопряженности видно, что степень коллинеарности параметров модели очень высока. Так как в рассматриваемом случае ранг МКВ меньше числа параметров технического состояния, имеет место строгая мультиколлинеарность [1]. В этом случае существует линейное многообразие оценок МНК [1].

Порядок меры обусловленности анализируемой матрицы плана по Нейману-Голдштейну (отношение максимального характеристического числа к минимальному) равен  $\infty$ , что свидетельствует о большом разбросе ошибок оценок классической МНК-регрессии.

Таким образом, становится ясно, что для решения поставленной задачи подход, предусматривающий применение классической регрессии, неприменим, так как, помимо большого разброса ошибок оценок, из-за строгой мультиколлинеарности оценка МНК неустойчива.

## 1.2. Метод гребневой (ридж) регрессии

Процедура с использованием «следа гребня» (ridge trace) была впервые предложена Херлом в 1962 г. Эта процедура предназначена для «плохо обусловленных» ситуаций, когда имеются значительные корреляции между разными параметрами, входящими в модель, вследствие чего матрица  $\mathbf{H}' \cdot \mathbf{H}$  становится почти вырожденной, а оценки параметров – неустойчивыми (вследствие этого они могут иметь, например, неправильный знак, а их значения могут выходить за пределы, обусловленные физическими представлениями).

Метод гребневой регрессии в его простейшей форме состоит в следующем. Пусть  $\mathbf{Z}$  представляет собой подходящим образом масштабированную 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]:

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

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица такой же размерности, как  $\mathbf{Z}' \cdot \mathbf{Z}$ ;  $\alpha$  – 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 следовании 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: «...Огульное применение гребневой регрессии без понимания ее предпосылок может быть опасным и приводить к заблуждениям. Если дополнительная информация разумная и не противоречит имеющимся данным, то гребневая регрессия оправдана».

Таким образом, для решения поставленной в данной статье задачи можно использовать метод ридж-оценивания. При этом важно не только сформировать алгоритм оценивания, но и методику рационального выбора параметра  $\alpha$ , обеспечивающего минимальные погрешности оценивания.

## 1.3. Применение гребневой регрессии к оцениванию параметров ГТД

Варьируя значения  $\alpha$  от 0 (случай обычного МНК) до 1 строим график «след гребня» (рис. 2). Как видно из графика, при  $\alpha > 0.1$  оценки коэффициентов регрессионной модели стабилизируются.

Приблизительно оценив значение  $\alpha$ , принимаем начальное его значение равное 0.1. Затем определяем величину этого коэффициента более точно в соответствии с методом, предложенном Херлом, Кеннардом и Болдуином [4]. Они предложили выбирать эту величину согласно формуле

$$\alpha = \frac{r \cdot s^2}{\{\delta\theta_z(\alpha)\}^2 \cdot \{\delta\theta_z(\alpha)\}}, \quad (8)$$

где  $r$  – число параметров в модели;  $s^2$  – остаточный средний квадрат, входящий в таблицу дисперсионного анализа;  $\delta\theta_z(\alpha)$  – оценки при  $\alpha$  на предыдущей итерации.

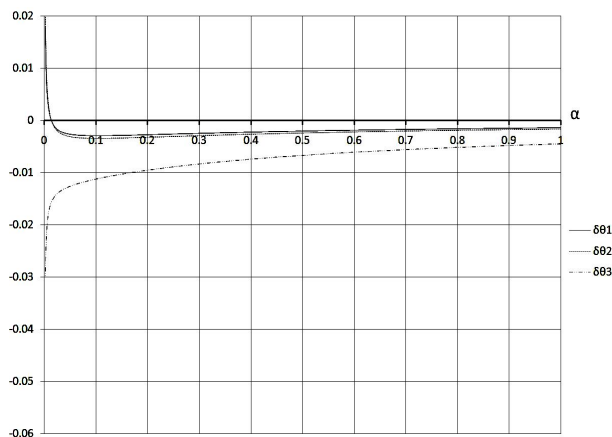


Рис. 2. «След гребня»

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

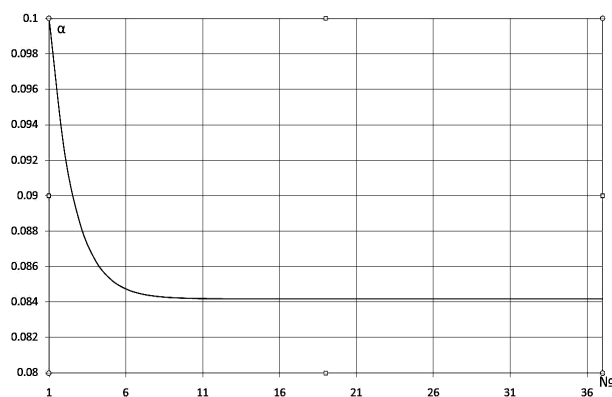


Рис. 3. Итерационный подбор  $\alpha$

По результатам итерационной процедуры принимаем  $\alpha = 0.08419$  и из уравнения (7) получаем:

$$\det(Z^T \cdot Z + \alpha \cdot I) = 0.00442;$$

$$\delta\vec{\theta} = \begin{pmatrix} -0,002899 \\ -0,003416 \\ -0,011587 \end{pmatrix}.$$

Зная значения вектора  $\vec{C}$  в системе уравнений (4) можем определить значение  $\delta P$ :

$$\delta P_{\text{сум}} = -2,401e-003.$$

Полученное значение сравниваем со значением, полученным из нелинейной поузловой модели:

$$\delta P_{\text{сум мод}} = -2.327e-003.$$

Погрешность составляет  $\Delta = 3,1\%$ .

Подобным образом моделируем три различных изменения технического состояния и сравниваем результаты с нелинейной моделью:

1. Изменяется  $\delta G_{\text{прв}}$ ,  $\delta \eta_v$ ,  $\delta G_{\text{прквд}}$ :

$$\delta P_{\text{ТВ}} = 0,0036; \delta T_{\text{Гсд}} = 0,001;$$

$$\delta P_{\text{сум}} = 0,0017; \delta P_{\text{сум мод}} = 0,0023;$$

$$\Delta = 25,8\%.$$

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

$$\delta P_{\text{ТВ}} = -0,0196; \delta T_{\text{Гсд}} = 0,0345;$$

$$\delta P_{\text{сум}} = -0,04529; \delta P_{\text{сум мод}} = -0,0501;$$

$$\Delta = 9,6\%.$$

3. Изменяется  $\delta G_{\text{прв}}$ ,  $\delta \eta_v$ ,  $\delta \eta_{\text{твд}}$ :

$$\delta P_{\text{ТВ}} = -0,0176; \delta T_{\text{Гсд}} = 0,0269;$$

$$\delta P_{\text{сум}} = -0,04821; \delta P_{\text{сум мод}} = -0,0503;$$

$$\Delta = 4,16\%.$$

## 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 4% до 29% (тем больше, чем выше степень корреляции между используемыми характеристиками узлов). Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности предложенного метода. Значения погрешностей можно уменьшить, если увеличить количество измеряемых параметров или количество параметров технического состояния.

В дальнейшем предлагается применить предложенный метод для полного состава штатно измеряемых параметров и параметров технического состояния двигателя, провести более точную оценку его возможностей и исследовать альтернативные способы выбора параметра  $\alpha$ . При этом особое внимание необходимо уделить корректному и рациональному использованию априорной и экспериментальной информации.

## 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. Елисеев Ю.С. Статистические методы формирования алгоритмов вычисления в полете тяги и других основных параметров газотурбинного двигателя, критериев и признаков технического состояния его узлов / Ю.С. Елисеев, Г.В. Добрянский, Т.Ф. Дема // *Авиационно-космическая техника и технология. Межвуз. науч. сб.* – Х.: ХАИ, 2003. – Т. 41, № 6. – С. 81-89.
6. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами: пер. с англ. / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 960 с.

Поступила в редакцию 3.06.2009

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

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЯГИ ГТД З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ

*С.В. Єпіфанов, М.В. Шевченко*

Розглянута проблема розрахунку невимірюваних параметрів ГТД шляхом статистичного аналізу вимірюваних, при зміні технічного стану двигуна і браку інформації що до цієї зміни, обумовленим обмеженими можливостями вимірювальної системи. Розглянуті відомі методи вирішення досліджуваної проблеми, їх переваги та недоліки. Для наочного зображення поставленої задачі (візуалізації в трьохвимірному просторі) була складена спрощена задача з двома вимірюваними, трьома впливальними і одним розрахованим параметрами. Здійснений дисперсійний аналіз і виявлена мультиколінеарність елементів матриці плану поставленої задачі. Для рішення проблеми була запропонована процедура з використанням «сліду гребеня» (ridge trace), яка дозволяє проводити аналіз нестійких оцінок. Враховані відомі переваги та недоліки запропонованої процедури. Отримані результати з використанням найпростішої ітераційної процедури ridge-оцінювання для поставленої задачі. Визначені подальші напрямки досліджень.

**Ключові слова:** газотурбинний двигатель (ГТД), диагностирование, неизмеряемые параметры, тяга, корреляция, мультиколлинеарность, статистическая оценка, ридж-оценка.

### IDENTIFICATION OF GAS TURBINE ENGINE THRUST WITH A GLANCE OF AIR-GAS CHANNEL TECHNICAL CONDITION CHANGING

*S.V. Epifanov, M.V. Shevchenko*

Problem of the gas turbine engine nonmetering parameters estimation using monitored parameters statistical analysis has been handled. Possible changing of 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. The simplified task with two monitored, three influencing and one estimated parameters for visualization (in tree-dimensional space) has been made up. 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 has been suggested and analyzed. The results with simple iteration procedure of ridge-estimation application have been obtained. Further research direction has been specified.

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

**Єпіфанов Сергей Валерьевич** – д-р техн. наук, профессор, заведуючий кафедрой конструкции авиационных двигателей и энергоустановок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

**Шевченко Максим Владимирович** – аспирант, мл. научн. сотр. кафедры конструкции авиационных двигателей и энергоустановок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: mv\_shevchenko@ukr.net.