

УДК 536.5.08

Д.Ф. СИМБИРСКИЙ¹, Г.Д. СИМБИРСКИЙ²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*² *Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина*

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Методы параметрической идентификации сложных технических объектов широко применяются при экспериментальных исследованиях последних. Являясь методами косвенных измерений параметров объекта, они должны завершаться определением нормативных показателей точности результатов, что в силу сложности проблемы обычно трудно выполнимо. В связи с этим в статье излагается и иллюстрируется разработанная в ХАИ универсальная методология определения совместных доверительных областей и интервалов определяемых параметров технического объекта на основе его функций чувствительности измеряемых параметров к искомым.

Ключевые слова: объект, параметр, идентификация, оптимальный, оценки точности, планирование, теплоперенос, датчик теплового потока

Введение

Методы обратных задач (ОЗ) математического моделирования составляют основу современных информационных технологий исследования сложных технических объектов. В частности, путем параметрической идентификации математической модели объекта (далее – модели) по экспериментальным данным могут быть найдены неизвестные параметры, которые представляют как внутренние свойства объекта, так и внешние воздействия на него. Интерес к ОЗ постоянно возрастает, что вызывается, в первую очередь, потребностью практики, а, во-вторых, активным развитием программно-аппаратных средств решения ОЗ в формате “интеллектуальных” измерительно-вычислительных систем (ИС) на базе ЭВМ [1].

В технической литературе неоднократно подчеркивалось, что ОЗ по своей сути являются разновидностью косвенных совместных или совокупных измерений, в которых в качестве уравнения измерения используются математические модели объектов. Это обстоятельство в соответствии с нормативными требованиями к средствам и методам измерений, особенно к ИС, которые также являются таким средством [1], приводит к необходимости установления показателей точности решений ОЗ.

Однако, в большинстве известных случаев практической постановки и решения ОЗ, определению показателей точности последних не уделяется достаточного внимания, в основном, в силу сложности и неокончательной решенности этой проблемы.

1. Постановка задачи

Методы установления показателей точности результатов параметрической идентификации динамических систем в общей постановке рассматриваются, например, в работах по теории чувствительности систем к изменению их параметров.

Известно также значительное количество исследований, посвященных проблеме оптимального планирования процедуры параметрической идентификации как метода решения обратных задач теплопереноса (ОЗТ). Методология такого планирования, разработка которой началась в конце 70-х годов, в законченном виде изложена, например, в фундаментальной коллективной монографии под редакцией академика О.М. Алифанова [2]. В ее основу положены исследования особенностей информационной матрицы Фишера $\bar{\Phi}$, составленной из функций чувствительности измеряемых параметров объекта к искомым. Так как функции чувствительности отражают все значимые факторы процедуры параметрической идентификации, то, добываясь желательных свойств матрицы $\bar{\Phi}$ путем выбора факторов, можно осуществить оптимальное планирование самого эксперимента. Используются различные общие показатели уровня обусловленности матрицы $\bar{\Phi}$, в частности: степень ее обусловленности, выраженная через собственные числа $\bar{\Phi}$, норма $\|\bar{\Phi}^{-1}\|$, детерминант или след $\bar{\Phi}$ и др. Однако, они не пригодны для оценок точности и планирования определения отдельных, например, наиболее важных параметров из числа искомых.

Поэтому нами для апостериорных (конечных) оценок точности полученных решений ОЗ и для априорного (до проведения идентификации) планирования экспериментов предлагается использовать такие общепринятые метрологические показатели точности косвенных измерений, как введенные в работе [3] совместные доверительные области (СДО) получаемых значений искомым параметров. На основе фундаментальных теоретических разработок, изложенных как в [3], так и в других работах по анализу процессов статистическими методами, представителями научных школ ХАИ в области решений ОЗТ и ОЗ диагностики газоздушного тракта авиационных ГТД была разработана методология построения СДО [4-11]. При этом был предложен такой более простой приближенный показатель, как совместные доверительные интервалы (СДИ) – проекции СДО на оси пространства искомым параметров.

Однако, указанная методология, на наш взгляд, недостаточно используется при разработках и реализациях современных методов решения ОЗ.

Отсюда задачами настоящего исследования являются:

- 1) последовательно изложить указанную методологию планирования и оценивания точности параметрической идентификации объектов;
- 2) в качестве иллюстрации выполнить планирование параметрической идентификации градиентных датчиков теплового потока.

2. СДО и СДИ при оценивании точности результатов и планировании параметрической идентификации объектов

В цитированных выше работах ХАИ показано, что одним из наиболее перспективных методов решения ОЗ является экстремальный метод параметрической идентификации объекта – получение оптимальных оценок вектора его искомым параметров.

Рассмотрим этот метод детальнее с целью получения упомянутых выше показателей его точности.

2.1. Экстремальная постановка ОЗ параметрической идентификации объекта

Предполагается, что некоторые параметры состояния динамического, в общем случае, объекта измеряются в эксперименте и составляют дискретный по времени $\tau_k = k\Delta t$ ($m \times 1$)-вектор измерения \bar{Y}_k . Кроме полезной информации \bar{Y}_k аддитивно включает ($m \times 1$)-вектор $\bar{\varepsilon}_k$ случайных погрешностей (шумов) с нулевым математическим ожидани-

ем, нормальным распределением и различной дисперсией σ_i^2 . Последнее учитывает возможные различия в физической природе составляющих y_{ik} и в системах их регистрации. В такой постановке шум в измерениях является фактором выявления степени неустойчивости ОЗ, что позволяет на начальном этапе не рассматривать систематические погрешности в исходных данных.

Ковариационная ($m \times m$)-матрица R вектора шумов $\bar{\varepsilon}_k$ при условии некоррелированности его составляющих ε_{ik} имеет вид

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m^2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Предполагается, что существует модель состояния объекта, в которой можно выделить ($r \times 1$)-вектор искомым параметров $\bar{\Theta}$. Его составляющие либо постоянны, либо (в противном случае) могут быть аппроксимированы обобщенными полиномами на основе известных функций времени с постоянными неизвестными (искомыми) коэффициентами.

С помощью модели состояния можно рассчитывать прогноз (аналог) вектора измерений $\hat{Y}_k(\bar{\Theta})$ в функции от $\bar{\Theta}$ при известных остальных параметрах модели

$$\hat{Y}_k(\bar{\Theta}) = [\hat{y}_{1k}(\bar{\Theta}) \ \hat{y}_{2k}(\bar{\Theta}) \ \dots \ \hat{y}_{mk}(\bar{\Theta})]^T. \quad (2)$$

В таком случае параметрическая идентификация объекта заключается в определении оптимальных оценок $\hat{\bar{\Theta}}_n$ вектора $\bar{\Theta}$ по n значениям вектора измерений \bar{Y}_k и модели измерений (2). Наиболее универсальный экстремальный метод определения заключается в минимизации по $\bar{\Theta}$ следующей квадратичной функции невязки

$$\Phi(\bar{\Theta}) = \sum_{k=1}^n \left[\bar{Y}_k - \hat{Y}_k(\bar{\Theta}) \right]^T R^{-1} \left[\bar{Y}_k - \hat{Y}_k(\bar{\Theta}) \right]. \quad (3)$$

В соответствии с [3] можно констатировать, что метод параметрической идентификации объекта сведен к обобщенному, а для условий (3) – к взвешенному методу наименьших квадратов (МНК).

2.2. Решение линейных ОЗ

В случае линейной ОЗ, когда имеет место линейная зависимость аналога вектора измерений $\hat{Y}_k(\bar{\Theta})$ от вектора искомым параметров $\bar{\Theta}$ можно воспользоваться известным решением линейного

МНК для оценок $\hat{\Theta}_n$ по n измерениям \bar{Y}_k с учетом шумов $\bar{\varepsilon}_k$ в измерениях и ковариационной $(r \times r)$ -матрицы P_n ошибок этих оценок [3]:

$$\hat{\Theta}_n = P_n \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{\Theta}} \right)_{\hat{\Theta}_n}^T R^{-1} \bar{Y}_k ; \quad (4)$$

$$P_n = \left[\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{\Theta}} \right)_{\hat{\Theta}_n}^T R^{-1} \left(\frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{\Theta}} \right)_{\hat{\Theta}_n} \right]^{-1} = A_n^{-1}; \quad (5)$$

$$A_n = \left[\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{\Theta}} \right)_{\hat{\Theta}_n}^T R^{-1} \left(\frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{\Theta}} \right)_{\hat{\Theta}_n} \right].$$

Здесь $\left(\frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{\Theta}} \right)_{\hat{\Theta}_n} = H_k$ – $(m \times r)$ -матрица функ-

ций чувствительности $u_{ijk} = \frac{\partial y_{ik}}{\partial \theta_j}$ составляющих

y_{ik} вектора измерений в k -й момент времени k искомым параметрам θ_j ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, r; k=1, 2, \dots, n$), которая для значений $\bar{\Theta} = \hat{\Theta}_n$ имеет следующий вид:

$$H_k = \begin{bmatrix} u_{11k} & u_{12k} & \dots & u_{1rk} \\ u_{21k} & u_{22k} & \dots & u_{2rk} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{m1k} & u_{m2k} & \dots & u_{mrk} \end{bmatrix}_{\hat{\Theta}_n}; \quad (6)$$

T – знак транспонирования вектора или матрицы.

Универсальным методом расчета функций чувствительности является численный с использованием модели состояния объекта.

В теории линейного МНК доказано [3], что оценки $\hat{\Theta}_n$ при принятом виде (1) ковариационной матрицы вектора шума $\bar{\varepsilon}_k$ являются оптимальными – несмещенными, эффективными, достаточными и состоятельными.

Рассмотрим более детально матрицу A_n , входящую в формулу (5) для ковариационной матрицы P_n . Она называется матрицей Грама функций чувствительности и в соответствии с (5) для случая разнородных измерений с ковариационной матрицей шумов (1) имеет следующий вид:

$$A_n = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} U_{i1k}^2 & \dots & \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} U_{i1k} U_{ir_k} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} U_{ir_k} U_{i1k} & \dots & \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} U_{ir_k}^2 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1r} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{r1} & \dots & a_{rr} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Из A_n можно получить обратную матрицу Грама A_n^{-1} , которую будем обозначать следующим образом:

$$A_n^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11}^* & \dots & a_{r1}^* \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{r1}^* & \dots & a_{rr}^* \end{bmatrix}. \quad (8)$$

2.3. Построение СДО и СДИ оценок искомым параметров на основе матрицы Грама

Под совместной доверительной областью (СДО) обычно, например, в [3], понимают r -мерный эллипсоид в пространстве θ_j , в который с заданной доверительной вероятностью попадают оптимальные оценки $\hat{\Theta}_n$, определяемые по формулам (4) – (5). СДО являются исчерпывающей характеристикой точности для полученных оценок $\hat{\Theta}_n$. Их можно несложным образом построить для случая $r = 2$ и отчасти для $r=3$.

Приближенными к СДО являются оценки точности $\hat{\Theta}_n$ с помощью введенных в [9, 11] совместных доверительных интервалов (СДИ) – проекций СДО на оси r -мерного пространства θ_j . СДИ – это практически единственный простой способ оценивания точности решений для случая многомерных ($r > 3$) ОЗ.

Для построения СДО будем использовать следующее известное положение [3]: если матрица Грама является положительно определенной с действительными положительными собственными значениями, то квадратичная форма $\bar{\Theta}_n^T A_n \bar{\Theta}_n$ описывает в окрестности точки $\hat{\Theta}_n$ r -мерный эллипсоид:

$$(\bar{\Theta} - \hat{\Theta}_n)^T P_n^{-1} (\bar{\Theta} - \hat{\Theta}_n) = B, \quad (9)$$

$$B = rF_v(r, n-r),$$

где $F_v(r, n-r)$ – табличные значения квантиля распределения Фишера для r параметров и n измерений на участке оценивания;

v – доверительная вероятность.

Если в (9) в соответствии с (5) вместо P_n^{-1} подставить A_n с учетом (7), то для случая $r=2$ можно прийти к следующему уравнению:

$$a_{11}(\Delta\hat{\theta}_1)^2 + 2a_{12}\Delta\hat{\theta}_1\Delta\hat{\theta}_2 + a_{22}(\Delta\hat{\theta}_2)^2 = B, \quad (10)$$

где $\Delta\hat{\theta}_1 = \hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_{1,n}$ и $\Delta\hat{\theta}_2 = \hat{\theta}_2 - \hat{\theta}_{2,n}$.

В этом случае уравнение (10) представляет СДО в форме эллипса в пространстве искомых параметров θ_1 , θ_2 и величин $\Delta\hat{\theta}_1$, $\Delta\hat{\theta}_2$ с центром в точке ($\Delta\hat{\theta}_1 = \Delta\hat{\theta}_2 = 0$), вид которого приведен в разделе 4. Для его построения по точкам можно воспользоваться одним из следующих уравнений, вытекающих из (10):

$$\begin{aligned} (\Delta\hat{\theta}_1)_{1,2} &= \\ &= \frac{-a_{12}\Delta\hat{\theta}_2 \pm \sqrt{a_{12}(\Delta\hat{\theta}_2)^2 - a_{11}[a_{22}(\Delta\hat{\theta}_2)^2 - B]}}{a_{11}}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (\Delta\hat{\theta}_2)_{1,2} &= \\ &= \frac{-a_{12}\Delta\hat{\theta}_1 \pm \sqrt{a_{12}(\Delta\hat{\theta}_1)^2 - a_{22}[a_{11}(\Delta\hat{\theta}_1)^2 - B]}}{a_{22}}, \end{aligned} \quad (12)$$

Для этого необходимо, подставляя, например, в уравнение (11) одно значение $\Delta\hat{\theta}_2$, получать по два значения $\Delta\hat{\theta}_1$ точек эллипса.

Для получения СДИ, например, для значений $\Delta\hat{\theta}_2$ необходимо добиться, чтобы задаваемому значению $\Delta\hat{\theta}_2$ из уравнения (11) соответствовало лишь одно значение $\Delta\hat{\theta}_1$. Это реализуется, когда подкоренное выражение в формуле (11) будет тождественно равно 0. Из этого условия определяются граничные значения $(\Delta\hat{\theta}_2)_{гр}$ в конечных точках СДИ для $\Delta\hat{\theta}_2$ по формуле

$$(\Delta\hat{\theta}_2)_{гр} = \pm \sqrt{\frac{a_{11}B}{\det A_n}}, \quad (13)$$

где $\det A_n = a_{12}^2 - a_{11}a_{22}$.

Аналогичным образом можно получить следующую зависимость для граничных значений $(\Delta\hat{\theta}_1)_{гр}$ в конечных точках СДИ для $\Delta\hat{\theta}_1$:

$$(\Delta\hat{\theta}_1)_{гр} = \pm \sqrt{\frac{a_{22}B}{\det A_n}}. \quad (14)$$

Таким образом, для случая параметрической идентификации объектов с двумя искомыми параметрами ($r=2$) СДО и СДИ их оценок могут быть представлены в наглядной форме путем несложных вычислений с использованием элементов матрицы Грама.

2.4. Определение СДИ оценок параметров $\hat{\Theta}_n$ на основе обратной матрицы Грама

Приведенный выше способ построения СДО и СДИ оценок параметров при $r < 3$ отличается своей наглядностью. Однако уже при $r=3$ он становится мало удобным, а при $r > 3$ - практически неприменимым.

Поэтому в [9], а затем в [10] были предложены способы определения СДИ, эффективные для больших r . Из них, по нашему мнению, следует рекомендовать полученную в [10] следующую простейшую зависимость, основанную на обратной матрице Грама (8):

$$(\Delta\hat{\theta}_j)_{гр} = \pm \sqrt{a_{jj}^*} B, \quad (15)$$

где a_{jj}^* - соответствующие j диагональные элементы матрицы (8), а, следовательно, с учетом (5) и ковариационной матрицы P ошибок оценок параметров.

Отметим, что построение A_n^{-1} по A_n является стандартной вычислительной процедурой.

На примере случая двух искомых параметров ($r=2$) можно показать, что из (15) следуют ранее полученные формулы (13) и (14).

Для этого воспользуемся следующей известной формулой обращения для (2x2)-матрицы Грама

$$A_n = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \text{ а именно}$$

$$A_n^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* \\ a_{21}^* & a_{22}^* \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где $\det A = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$.

Если теперь подставить в (15) вместо a_{11}^* и a_{22}^* их значения, то приходим к формулам (13) и (14).

Заметим, что в [9, 11] предложены отличающиеся от (13) и (14) зависимости для СДИ. Однако там же для случая $r=2$ показана их адекватность формулам (13) и (14).

Таким образом, для дальнейшего применения в качестве показателя точности и, особенно, для планирования параметрической идентификации целесообразно использовать СДИ, определяемые по формуле (15).

2.5. Планирование параметрической идентификации объекта

Выше была представлена методология апостериорной (после проведения экспериментов и расчетов) оценки точности полученных оценок $\hat{\Theta}_n$. Определяемые при этом СДО и (или) СДИ через функции чувствительности измерений к искомым параметрам θ_j зависят от всех значимых факторов организации и проведения параметрической идентификации объекта, в том числе и самого эксперимента. Следовательно, эта методология может быть естественным образом использована для априорных исследований влияния этих факторов на СДО и (или) СДИ, т. е. фактически для оптимального или, по крайней мере, рационального планирования процесса параметрической идентификации.

К числу значимых факторов будем относить следующие [4, 5, 9-11]:

- структуру (состав) вектора искомых параметров $\bar{\Theta}$;
- структуру вектора измерений \bar{Y}_k : вид и количество измеряемых параметров;
- особенности динамических процессов в объекте, включая начальные и граничные условия;
- участки наблюдения (измерения) динамики объекта;
- количество моментов времени n на участке наблюдения;
- дисперсии σ_i^2 ($i=1, 2, \dots, m$) случайных погрешностей измерений, учитывающие особенности и качество каналов регистрации и др.

Таким образом, СДО и (или) СДИ априорных оценок $\hat{\Theta}_n$, зависящих от выбранного набора значимых факторов или **плана** проведения параметрической идентификации, могут быть использованы в целевой функции планирования.

В соответствии с [3, 9 – 11] уравнение (9) в пространстве $\hat{\theta}_j$ в случае планирования имеет следующий вид:

$$(\hat{\Theta} - \bar{\Theta}_0)^T P_n^{-1} (\hat{\Theta} - \bar{\Theta}_0) = \chi_v^2(\gamma), \quad (17)$$

где $\chi_v^2(\gamma)$ - квантиль χ^2 -распределения для случая γ искомых параметров при доверительной вероятности v .

С учетом (5) многомерный эллипсоид (17), аналогичный эллипсоиду (9), можно записать в виде

$$(\hat{\Theta} - \bar{\Theta}_0)^T A_n (\hat{\Theta} - \bar{\Theta}_0) = \chi_v^2(\gamma), \quad (18)$$

где A_n - матрица Грама, рассчитанная по (7) для априорно задаваемого "истинного" значения $\bar{\Theta}_0$ и n измерений \bar{Y}_k на участке наблюдения $n\Delta t$.

Для выполнения планирования желательно, а для случаев $\gamma > 2$ необходимо, использовать СДИ оценок, определяемые на основе обратной матрицы Грама A_n^{-1} по следующей, аналогичной (15), формуле:

$$(\Delta \hat{\theta}_n)_{гр} = \pm \sqrt{a_{jj}^* \chi_v^2(\gamma)}. \quad (19)$$

Для случая $\gamma=1$ и в особо важных случаях при $\gamma=2$ целесообразно обращаться к построению СДО оценок.

Реализуется следующий механизм планирования: полученные по формуле (19) значения СДО оценок искомых параметров для исследуемого плана сравниваются с заданными предельно допустимыми разбросами. При отрицательном результате сравнения исследуемый план заменяется новым, и указанная процедура повторяется.

Необходимо отметить, что такая процедура планирования несмотря на приближенность (СДИ вместо СДО) для линейных ОЗ по сути является квазиоптимальной или, по крайней мере, рациональной [9 – 11].

2.6. Приближенный метод оценивания точности результатов и планирования для нелинейных ОЗ

В монографии [3] предложен подход к построению приближенных СДО и (или) СДИ для нелинейных ОЗ. В его основе лежит допущение, что для рассматриваемой ОЗ существует метод получения оценок $\hat{\Theta}_n$ вектора искомых параметров $\bar{\Theta}$, близкого его истинному значению $\bar{\Theta}_0$. Это предположение должно быть подтверждено путем имитационного моделирования решений ОЗ указанным методом для реальных условий.

При подтвержденной близости $\hat{\Theta}_n$ и $\bar{\Theta}_0$ приближенные СДО и СДИ оценок $\hat{\Theta}_n$ могут быть получены путем линеаризации функции невязки (3) в области вблизи $\hat{\Theta}_n$. В ней ковариационная матрица P_n определяется по формуле (5) для значений $\hat{\Theta}_n$, а приближенные СДО и СДИ – по приведенным выше формулам для линейных ОЗ.

Аналогичный подход может быть использован и для приближенного планирования параметрической идентификации в нелинейных ОЗ. Он основан на применении описанной в разделе 2.5 методологии к линеаризованной вблизи априорных значений $\bar{\Theta}_0$ области γ -мерного пространства параметров $\hat{\theta}_j$.

Отметим, что справедливость и эффективность указанного подхода к проблеме точности в нелинейных ОЗ подтверждены в работах [4 – 11], где, как правило, рассматривались нелинейные ОЗТ и ОЗ диагностики проточной части тепловых двигателей.

3. Оценивание точности и планирование параметрической идентификации в обратных задачах теплопереноса

3.1. Методы ОЗТ в тепловых двигателях

В теплоэнергетике, включая тепловые двигатели, широко применяются методы (ОЗТ) как при экспериментальных исследованиях температурного состояния рабочих сред и элементов конструкции (ОЗТ диагностики), так и при оптимальном проектировании последних (ОЗТ оптимизации) [2].

При диагностике наиболее распространены граничные ОЗТ, целью которых является определение локальных тепловых потоков, коэффициентов теплоотдачи, тепловых сопротивлений и др. на поверхности объектов теплопереноса. При этом их диапазон весьма широк: от трехмерных охлаждаемых лопаток турбин до одномерных измерителей (датчиков) тепловых потоков (ДТП) [4, 6, 10].

Отдельным классом ОЗТ являются коэффициенты, целью которых является определение теплофизических характеристик материала, а также комбинированные или комплексные ОЗТ. В этих задачах в вектор искомым параметров $\bar{\Theta}$ включаются различные тепловые величины, например, тепловые потоки, поступающие в объект от внешней среды, и коэффициент теплопроводности λ его материала.

Известно, что ОЗТ относятся к некорректно поставленным ОЗ математической физики, которым свойственна неустойчивость решений. Поэтому для них рассматриваемые нами проблемы точности имеют первостепенное значение, что также отражено в цитированных выше исследованиях [4 – 8, 10].

3.2. Методологии построения СДО и СДИ для ОЗТ

Модели измерений в тепловых объектах обладают некоторыми специфическими особенностями. Так, в практике ОЗТ, например, в работах [4 – 8, 10], исходно измеряются, в основном, только температуры в одной или нескольких точках объекта. Таким образом, вектор измерения состоит из однородных физических величин, регистрируемых однотипной измерительной аппаратурой. Это позволяет предположить адекватные уровни дисперсий $\sigma_i^2 = \sigma^2$ для всех m составляющих вектора измерений.

Тогда выражение (1) для ковариационной матрицы шума в измерениях принимает вид

$$R = \sigma^2 I, \quad (20)$$

где I – единичная $(m \times m)$ -матрица.

Это обстоятельство позволяет упростить приведенные выше зависимости для СДО и СДИ. Так, основные исходные выражения (5), (7) и (8) для ковариационной матрицы \bar{P}_n , прямой \bar{A}_n и обратной \bar{A}_n^{-1} матриц Грама в случае ОЗТ принимают следующий вид:

$$\bar{P}_n = \bar{A}_n^{-1}, \quad (21)$$

$$\bar{A}_n = \frac{1}{\sigma^2} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m u_{i1k}^2 & \dots & \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m u_{i1k} u_{i\Gamma k} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m u_{i\Gamma k} u_{i1k} & \dots & \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m u_{i\Gamma k}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma^2} \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \dots & \bar{a}_{1\Gamma} \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{a}_{\Gamma 1} & \dots & \bar{a}_{\Gamma\Gamma} \end{bmatrix}; \quad (22)$$

$$\bar{A}_n^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11}^* & \dots & \bar{a}_{\Gamma 1}^* \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{a}_{\Gamma 1}^* & \dots & \bar{a}_{\Gamma\Gamma}^* \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Необходимо внести изменения также в формулы (14) и (17) – (19), а именно: вместо ковариационной матрицы P_n использовать \bar{P}_n и вместо матриц Грама A_n и A_n^{-1} и их элементов – матрицы \bar{A}_n и \bar{A}_n^{-1} и их элементы. Вместо параметра B использовать

$$\bar{B} = \sigma^2 B, \quad (24)$$

а величину $\chi_v^2(r)$ в формулах (17) – (19) умножать на σ^2 .

В частности, используемые в дальнейшем изложении формулы для СДИ оценок будут иметь следующий вид:

при оценивании погрешностей решений ОЗТ

$$(\Delta\theta_j)_{\text{гр}} = \pm \sigma \sqrt{\bar{a}_{jj}^*} B, \quad (25)$$

а при планировании решения ОЗТ

$$(\Delta\theta_j)_{\text{гр}} = \pm \sigma \sqrt{\bar{a}_{jj}^* \chi_v^2(r)}, \quad (26)$$

где \bar{a}_{jj}^* – элементы обратной матрицы Грама, рассчитанные для значений $\bar{\theta} = \hat{\theta}_n$ в формуле (25) и $\bar{\theta} = \bar{\theta}_0$ в формуле (26).

При этом в случае планирования величина σ^2 дисперсии шума в измерениях задается априори, исходя из характеристик системы регистрации измерений, а в случае оценивания результатов – может быть определена в процессе решения ОЗТ [10].

Таким образом, адаптация к ОЗТ общей для ОЗ методологии оценивания точности и планирования не вызывает затруднений. В то же время специфика ОЗТ позволила разделить в формулах (21)-(26) погрешности на две взаимно независимые составляющие: первая определяется дисперсией σ^2 шума в измерениях, а вторая – степенью внутренней неустойчивости ОЗТ, количественно выражаемой особенностями матрицы Грама-объекта.

В качестве иллюстрации рассмотрим планирование процедуры параметрической идентификации одномерных градиентных ДТП.

4. Планирование параметрической идентификации датчиков плотности теплового потока

4.1. Постановки ОЗТ для одномерных градиентных ДТП

ДТП указанного типа обычно размещаются внутри детали заподлицо с исследуемой поверхностью ее внешнего теплообмена и представляют собой теплоизолированный с трех сторон стержень ограниченной длины H (рис. 1). Через рабочий торец в ДТГ входит тепловой поток, под воздействием которого в стержне осуществляется нестационарный одномерный (по оси x) теплоперенос. Ход температур в одной или нескольких точках по длине ДТГ или их перепадов измеряется миниатюрными термометрами сопротивления, термопарами или батареями термопар и служат основанием для решения граничной ОЗТ – экспериментально-расчетного определения (восстановления) значений плотности входящего в ДТГ теплового потока $q = q(\tau)$ или $q = \text{const}$, но в динамическом режиме.

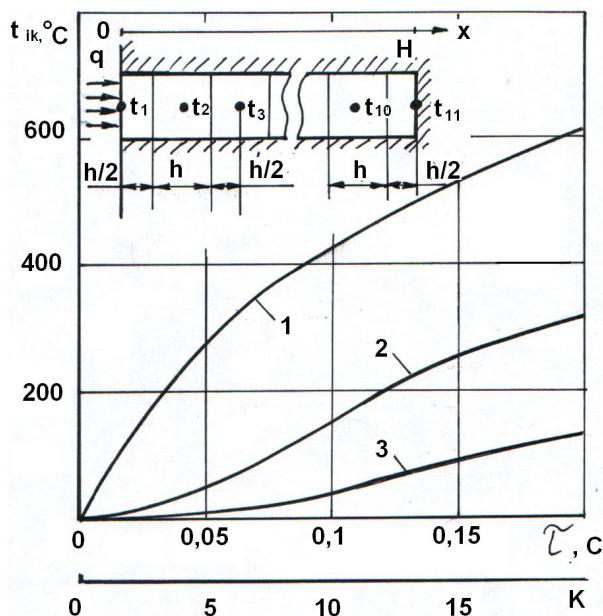


Рис. 1. Тепловая схема одномерного градиентного ДТГ и ход температур t_{zk} его блоков: 1 – t_{1k} ; 2 – t_{3k} ; 3 – t_{5k}

Постановке граничных ОЗТ, которые предполагается решать методом параметрической идентификации, должна предшествовать (раздел 2.1) параметризация задачи – выделение в модели температурного состояния ДТГ вектора постоянных иско-

мых параметров $\bar{\theta} = \text{const}$. При этом будем рассматривать два случая.

В случае $q = \text{const}$ параметризация осуществляется естественным образом в виде

$$\bar{\Theta}_1 = [q] = \text{const} \quad (27)$$

В более общем случае $q = q(\tau)$ для параметризации нами рекомендуется применять аппроксимацию $q(\tau)$ В-сплайнами первого порядка [5,10]. В рассматриваемой иллюстративной ОЗТ воспользуемся аналогичной, но более простой и распространенной кусочно-линейной аппроксимацией $q(\tau)$ на последовательных участках равной продолжительности $\Delta = k\Delta\tau$, ограничиваясь рассмотрением первого участка. Его начальный отрезок $n\Delta\tau$, на котором необходимо получить решение ОЗТ, содержит n измерений \bar{Y}_k ($k=1, 2, \dots, n$). Принимаем, что на каждом участке кусочно-линейной аппроксимации Δ тепловой поток q_k ($k=1, 2, \dots, 20$) представляется своими левым q_l и правым q_{np} значениями на границах участка и описывается очевидной зависимостью

$$q_k = q_l + k \frac{q_l - q_{np}}{n} \quad (28)$$

Таким образом $(n \times 1)$ -вектор искомых параметров на первом и каждом из последующих участков аппроксимации имеет вид

$$\bar{\Theta}_2 = [q_l \quad q_{np}]^T = \text{const}, \quad (29)$$

а целью параметрической идентификации ДТГ становится определение на начальном отрезке $n\Delta\tau$ участка Δ оптимальных оценок \hat{q}_l и \hat{q}_{np} величин q_l и q_{np} .

Кроме восстановления входящих в ДТГ тепловых потоков может возникать задача определения или уточнения его теплофизических характеристик (ТФХ), в частности, теплопроводности λ . Это приводит к целесообразности рассмотрения нами еще двух комбинированных (гранично-коэффициентных) ОЗТ с

$$\bar{\Theta}_3 = [q_1 \quad \lambda]^T \text{ и } \bar{\Theta}_4 = [q_1 \quad q_2 \quad \lambda]^T.$$

Для них примем $\lambda_0 = 20,0 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$.

4.2. Модели температурного состояния и измерений ДТГ

Для решения поставленных ОЗТ, а также для планирования их решений необходимы модели температурного состояния и измерений ДТГ.

В качестве модели температурного состояния будем использовать весьма удобную при одномерном теплопереносе дифференциально-разностную модель (ДРМ) и ее программную реализацию применяемую в работах ХАИ [4, 5 и др.].

Для построения ДРМ стержень (рис. 1) длиной H разбивается на z элементарных блоков, из которых $z-2$ внутренних имеют толщину h . Средние температуры внутренних блоков отнесены к их геометрическим центрам, а средние температуры t_1 и t_z двух граничных блоков толщины $h/2$ – к их торцевым поверхностям. Температуры блоков составляют $(z \times 1)$ – вектор температур ДТП

$$\vec{T}_k = [t_{1k} \ t_{2k} \ \dots \ t_{zk}]^T. \quad (30)$$

Часть m составляющих вектора \vec{T}_k ($m \leq z$) измеряется в эксперименте, образуя $(m \times 1)$ –вектор измерений \vec{Y}_k , который в функции невязки МНК (2) сравнивается со своим прогнозом (аналогом) $\hat{Y}_k(\vec{\Theta})$, рассчитываемым по ДРМ ДТП в функции искомым параметров $\vec{\Theta}$.

На рис. 1 в качестве примера приведен полученный с помощью ДРМ ход температур t_{1k} , t_{3k} и t_{5k} блоков 1, 3 и 5 для истинных значений искомым параметров, которые для планирования были приняты следующими: $q_1 = 1 \cdot 10^7$ Вт/м²; $q_2 = 1,8 \cdot 10^7$ Вт/м² и $\lambda = 20,0$ Вт/м·град при нулевых начальных условиях $\vec{T} = 0$.

4.3. Исходные данные для планирования

Для планирования принимаем следующие исходные данные:

1. ДТП упомянутого выше типа длиной $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м из жаропрочного сплава со следующими известными ТФХ: плотность $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; теплопроводность $\lambda = 20,0$ Вт/м·град; удельная теплоемкость $C = 0,43$ кДж/кгК; температуропроводность $\alpha = 5,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Априорно выбранные “истинные” значения искомым параметров приведены выше.

2. В качестве модели температурного состояния ДТП используем ДРМ описанного выше типа с количеством блоков $z=11$.

3. В качестве значимых факторов, влияющих на процедуру решения ОЗТ или факторов планирования будем рассматривать следующие:

а) структура (состав) вектора искомым параметров $\vec{\Theta}$ из числа представленных выше вариантов $\vec{\Theta}$, т. е. вид ОЗТ.

б) структура (состав) вектора измерений \vec{Y}_k , в частности, варианты измерения одиночных температур рабочего торца t_{1k} , t_{3k} или t_{5k} , а также одно-временного измерения температур двух внутренних блоков t_{3k} и t_{5k} .

в) количество измерений n (5, 10 или 20) на начальной части $n \cdot \Delta\tau$ участка $\Delta = 20 \cdot \Delta\tau$ линейной аппроксимации $q(\tau)$ между значениями q_1 при $k=0$ и q_2 при $k=20$. При этом для всех вариантов планирования временной шаг $\Delta\tau = 0,01$ с.

г) величина среднеквадратичного отклонения σ шума в измерениях.

4. В качестве показателя точности оценок $\hat{\theta}_j$ для рассматриваемых планов вариантов идентификации предлагается использовать СДИ оценок, определяемые по формуле (26). Для сравнения величин СДИ искомым параметров $\hat{\theta}_j$ целесообразно ввести относительный СДИ, определяемый следующим образом:

$$\delta\hat{\theta}_j = \pm \frac{(\Delta\hat{\theta}_j)_{гр}}{\theta_{j0}} = \pm \frac{\sigma}{\theta_{j0}} \sqrt{a_{jj}^* \chi_{v(r)}^2}, \quad (31)$$

где θ_{j0} – “истинное” значение параметра. θ_j .

4.4. Выполнение планирования

4.4.1. Относительно стратегии планирования необходимо подчеркнуть следующее:

Планированием будет охвачено четыре вида нестационарных ОЗТ по восстановлению входящих в ДТП тепловых потоков, поставленные в подразделе 4.1.

В двух из них (№ 2 и № 4) также определяется теплопроводность λ материала ДТП.

Рассматривается два возможных вида тепловых потоков. В первом, наиболее простом случае, восстанавливается стационарный тепловой поток $q_1 = \text{const}$ (ОЗТ №1 и №2) на участке наблюдения $n \cdot \Delta\tau$ (во всех случаях $\Delta\tau = 0,01$ с). Во втором случае восстановлению подлежат два параметра q_n и $q_{пр}$ линейной аппроксимации нестационарного потока $q(\tau)$ на участке $\Delta = 20 \cdot \Delta\tau$ при измерениях \vec{Y}_k на начальном отрезке $n \cdot \Delta\tau$ участка Δ . Таким образом, в обоих случаях указанные косвенные измерения теплового потока должны выполняться за минимальное время и поэтому называются динамическими.

Для поставленных ОЗТ были выполнены следующие этапы планирования их решения:

4.4.2. С помощью ДРМ ДТП были рассчитаны функции чувствительности u_{ijk} i -х ($i=1, 3$ и 5) измеряемых температур к j -м искомым параметрам в k -е моменты времени для значений $n=5, 10$ и 20 с шагом $\Delta\tau=0,01$ с для принятых в разделе 4.2 “истинных” значений искомым параметров $\vec{\Theta}_0$ по следующей приближенной формуле:

$$u_{ijk} = \frac{t_{ik}(\theta_{10}, \theta_{20}, \dots, \theta_{j_0} + \Delta\theta_j, \dots, \theta_{i_0}) - t_{ik0}}{\Delta\theta_j} \quad (32)$$

Предварительно для каждой u_{ijk} выбиралась величина приращения $\Delta\theta_j$, которая, как правило, не превышала $\pm 0,05$ от θ_{j_0} . При этом критерием выбора являлись близость и устойчивость u_{ijk} для значений $\pm \Delta\theta_j$. Для ОЗТ №№3 и4 в ДРМ подставлялись значения теплового потока q_k в соответствии с формулой (28).

В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены функции чувствительности u_{iq_1k} , u_{iq_2k} и $u_{i\lambda k}$ температур t_1 , t_3 и t_5 к изменению параметров q_1 , q_2 и λ в k -е моменты времени.

4.4.3. Для каждой ОЗТ с использованием полученных значений функций чувствительности u_{ijk} ($i=1, 3$ и 5 ; $j=q_1, q_2$ и λ ; $k=1, 2$ и n , где $n=5, 10$ и 20) по формуле (22) для $\sigma^2=1$ было построено по девять вариантов матрицы Грама \bar{A}_n для девяти вариантов (планов) параметрической идентификации ДТП. Применением стандартной процедуры обращения из них получены девять обратных матриц Грама \bar{A}_n^{-1} для использования при определении СДИ искомым

параметров для рассматриваемых вариантов (планов). Кроме того, для ОЗТ № 2 дополнительно были построены по 2 варианта матриц \bar{A}_n и \bar{A}_n^{-1} для плана с одновременным измерением температур t_3 и t_5 двух блоков ДТП (для $n = 10$ и $n = 20$).

4.4.4. В качестве показателя планируемой точности оценок искомым параметров для различных вариантов (планов) нами использовались относительные СДИ $\delta\hat{\theta}_j$ оценок при $\sigma^2 = 1$, определяемые по формуле (31). Их значения в (%) для девяти вариантов (планов) по каждой из четырех ОЗТ сведены в табл. 1. В табл. 2 аналогичные показатели приведены для оговоренного в 4.4.3 случая одновременного измерения температур двух внутренних блоков ДТП в ОЗТ № 2.

4.4.5. В качестве иллюстрации особенностей графического представления планируемой точности оценок искомым параметров (случай $r=2$) для одного из вариантов (планов) ОЗТ № 2. При этом использовались элементы матрицы Грама \bar{A}_n и приведенная в подразделе 2.5 методика с формулами (17) – (19), в которой значение $\chi_{v(r)}^2$ умножалось на величину $\sigma^2 = 1$. Результаты построения СДО и соответствующей ей СДИ, а также СДИ для некоторых вариантов (планов) ОЗТ №2 приведены на рис. 3.

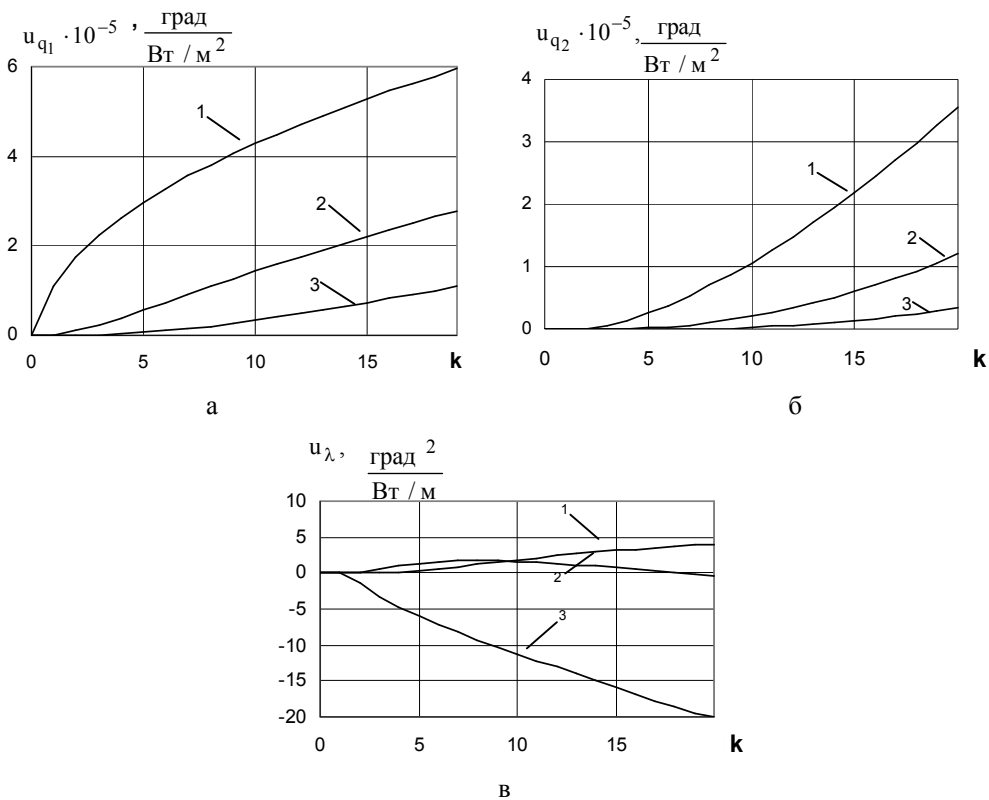


Рис. 2. Функции чувствительности i -х измерений (1 – t_1 ; 2 – t_3 ; 3 – t_5) к j -м искомым параметрам: а – к q_1 ; б – к q_2 ; в – к λ

Таблица 1

Сводные результаты планирования параметрической идентификации при решениях ОЗТ №№ 1-4

№№ вариантов ОЗТ	Вектор искомым параметров	Точки измерения температуры	Относительные СДИ $\delta\hat{\theta}_j$ при $\sigma^2 = 1$								
			$\delta\hat{q}_1$			$\delta\hat{q}_2$			$\delta\lambda$		
			Кол-во измерений			Кол-во измерений			Кол-во измерений		
			n=5	n=10	N=20	n=5	n=10	n=20	n=5	n=10	n=20
1	$\bar{\Theta}_1 = [q_1]$	1	0,39	0,20	0,10	-	-	-	-	-	-
		3	2,67	0,75	0,25	-	-	-	-	-	-
		5	60,20	3,77	0,71	-	-	-	-	-	-
2	$\bar{\Theta}_2 = [q_1, \lambda]$	1	4,60	0,37	0,32	-	-	-	11,10	8,27	6,90
		3	15,80	2,00	0,32	-	-	-	25,20	7,00	2,80
		5	60,00	3,10	0,35	-	-	-	287,0	25,0	5,25
3	$\bar{\Theta}_3 = [q_1, q_2]$	1	1,16	0,67	0,36	6,66	1,74	0,44	-	-	-
		3	3,50	3,53	1,12	34,0	13,20	1,78	-	-	-
		5	192,00	30,00	4,40	3130	157,0	9,12	-	-	-
		3	192,70	32,60	3,80	883,0	32,60	5,50	158,0	59,9	8,40
		5	1150,0	530,0	200,2	5245	1114,	187,1	426,0	236,0	133,0

Таблица 2

Влияние структуры вектора измерений (в ОЗТ №2) на относительные СДИ искомым параметров

Вектор измерений	Относительные СДИ $\delta\hat{\theta}_j$ для $\sigma^2 = 1$			
	$\delta\hat{q}_1$		$\delta\lambda$	
	Количество измерений n		Количество измерений n	
	n=10	n=20	n=10	n=20
$\bar{Y} = [t_3]$	2,03	0,31	7,00	2,80
$\bar{Y} = [t_5]$	3,10	0,35	25,00	5,25
$\bar{Y} = [t_3, t_5]^T$	0,83	0,16	5,10	2,30

4.5. Обсуждение результатов планирования

По приведенным в табл. 1 и 2 результатам планирования можно сделать следующие основные выводы.

4.5.1. При идентификации постоянного теплового потока $q=q_1=const$ (ОЗТ №№ 1 и 2) на начальном отрезке переходного процесса $n \cdot \Delta t$ для повы-

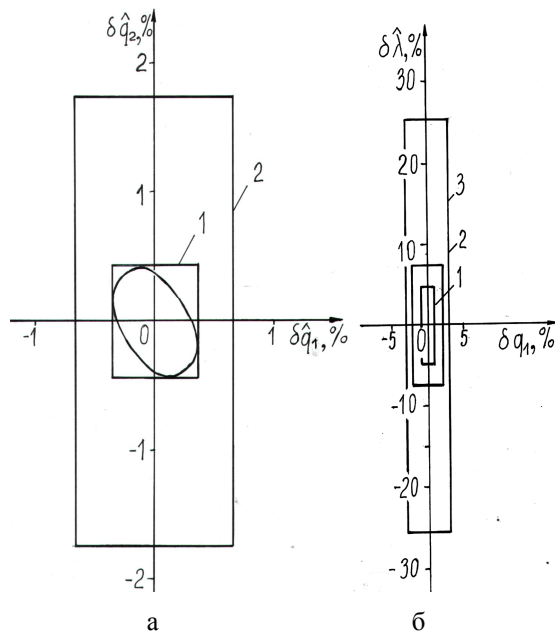


Рис. 3. Примеры СДО и СДИ оценок искомым параметров: а – ОЗТ №3; 1 – СДО-эллипс и СДИ для t_1 и $n=20$; 2 - СДИ для t_1 и $n=10$; б – ОЗТ №2; СДИ для $n=10$ и следующих вариантов измерения: 1 – t_3 и t_5 ; 2 – t_3 ; 3 – t_5

шения быстродействия косвенных измерений желательнее использовать измерения температуры t_1 . Заглубление точки измерения температуры (измерение t_3) приводит к существенному росту относительных СДИ, особенно при одновременной идентификации λ (ОЗТ № 2). Так, использование t_3 практически возможно только при значительном расширении отрезка наблюдения (до $n=20$), что существенно сужает быстродействие динамических измерений q_1 . Использование в качестве измеряемой температуры t_5 для большинства вариантов (планов) приводит к значительным проблемам неустойчивости ОЗТ и является нецелесообразным.

4.5.2. При идентификации переменного во времени теплового потока $q(\tau)$, то есть его кусочно-линейной аппроксимации на участках $\Delta=20\Delta\tau$ (ОЗТ №№ 3 и 4), вывод о желательности использования измерений t_1 становится еще более категоричным. Так, планы с измерениями t_5 фактически исключаются, а измерения t_3 можно рекомендовать лишь для ОЗТ № 3 при больших $n=20$.

Одновременное оценивание λ (ОЗТ № 4) ухудшает точность оценок q_1 и q_2 , оставляя их в допустимых пределах лишь для планов с измерением t_1 , а если t_3 , то при больших $n=20$. В последнем случае начальный отрезок решения ОЗТ совпадает с участком аппроксимации $q(\tau)$ $\Delta = 20\Delta\tau$.

4.5.3. Как следует из результатов табл. 2, состав вектора измерений, в частности, добавление еще одного измерения t_5 , оказывает определенное положительное влияние на планируемую точность оценок параметров q_1 и λ .

4.5.4. Планирование выполнено для конкретного ДТП и априорно заданных предполагаемых “истинных” значений $\bar{\Theta}_0$ вектора искомых параметров $\bar{\Theta}$. Разработанное нами программное обеспечение позволяет оперативно выполнять планирование для иных исходных данных.

При этом можно считать, что постановка ОЗТ в части выбора структуры и состава вектора искомых параметров $\bar{\Theta}$ фактически является одним из факторов планирования.

Заключение

1. Изложена разработанная в ХАИ методология планирования и оценивания точности параметрической идентификации динамических объектов как метода решения ОЗ математического моделирования для них. Методология основана на построении СДО и (или) СДИ оценок искомых параметров, которые через функции чувствительности измеряемых параметров объекта к изменению искомых учитывают все значимые факторы, влияющие на процеду-

ру параметрической идентификации. На их основе могут быть построены прямая и обратная матрица Грама функций чувствительности. Первая из них определяет СДО, а вторая – СДИ оценок искомых параметров как в случае оценивания их точности, так и планирования самой процедуры параметрической идентификации.

2. Представлена адаптация этой методологии для оценок точности и планирования параметрической идентификации как метода решения ОЗТ, распространенных в области тепловых двигателей и теплоэнергетики. При этом оказалось возможным разделить влияние случайных погрешностей в измерениях, которое прямо пропорционально величине их среднеквадратичного отклонения, и собственной неустойчивости ОЗТ.

3. В качестве иллюстрации выполнено планирование параметрической идентификации одномерных градиентных ДТП при их использовании как средства косвенных динамических измерений плотности входящих в элементы конструкции тепловых потоков.

4. Представляется, что в предложенной методологии для ОЗТ шум в измерениях практически выступает в качестве тестового сигнала, показывающего уровень некорректности их постановок при различных вариантах (планах). В дальнейшем необходимо разработать методику учета влияния систематических погрешностей в измерениях.

Литература

1. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения по ГОСТР 8.596–2002 [Текст] // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 5. – С. 2–7.
2. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем [Текст]: учеб. пособие / О.М. Алифанов, П.Н. Вабищевич, В.В. Михайлов [и др.]. – М.: Логос, 2001. – 400 с.
3. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами [Текст] / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 957 с.
4. Симбирский, Д.Ф. Температурная диагностика двигателей (пленочная термометрия и оптимальные оценки) [Текст] / Д.Ф. Симбирский. – К.: Техника, 1976. – 208 с.
5. Бут, Е.Н. Сплайн-идентификация тепловых потоков [Текст]: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук.: 01.04.14 “Теплофизика” / Евгений Николаевич Бут. – Л.: ЛИТМО.–Л.: 1979. – 20 с.
6. Симбирский, Д.Ф. Метрология косвенных измерений [Текст] / Д.Ф. Симбирский // Измерительная техника. – 1983. – № 1. – С. 12–14.
7. Симбирский Д.Ф. Оптимальный синтез измерительных систем, использующих алгоритмы

обратных задач [Текст] / Д.Ф. Симбирский, А.В. Олейник, С.В. Епифанов // Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии.: тез. докл. 5-го Всесоюз. симпозиума. – Новосибирск, 1989. – С. 136 – 137.

8. Симбирский, Д.Ф. Оптимальное планирование и метрологические аспекты параметрической идентификации динамических систем [Текст] / Д.Ф. Симбирский, А.В. Олейник, С.В. Епифанов // Идентификация динамических систем и обратные задачи.: тез. докл. Всесоюз. конф. – Суздаль, 1990. – С. 142.

9. Епифанов, С.В. Оптимальный выбор измеряемых параметров при идентификации ГТД [Текст] / С.В. Епифанов, Д.Ф. Симбирский, С.А. Кап-

лун / Изв. ВУЗов. Авиационная техника. – 1989. – № 4. – С. 39 – 43; 1990. – № 1. – С. 57 – 62; 1990. – № 2. – С. 72 – 78.

10. Макаренко, Г.В. Оптимизация систем параметрической идентификации теплопереноса в элементах теплоэнергетических установок [Текст]: автореф. дисс. на соискание научн. степени канд. техн. наук.: 05.14.05 "Теоретические основы теплотехники" / Галина Владимировна Макаренко; ИПМаш НАНУ. – Х.: 1992. – 16 с.

11. Епифанов, С.В. Оптимальный синтез систем диагностирования технического состояния авиационных ГТД [Текст]: автореф. дисс. на соискание научн. степени доктора техн. наук.: 05.07.05/ Епифанов Сергей Валериевич; Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Х., 2001. – 35 с.

Поступила в редакцию 1.09.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информатики М.Л. Угрюмов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

ПЛАНУВАННЯ І ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Д.Ф. Симбірський, Г.Д. Симбірський

Методи параметричної ідентифікації складних технічних об'єктів широко застосовуються при експериментальних дослідженнях останніх. Вони є методами непрямих вимірювань параметрів об'єктів і тому повинні завершуватися визначенням нормативних показників точності результатів, що через складність проблеми звичайно важко здійсненне. У зв'язку з цим в статті надається ілюструється розроблена в ХАІ універсальна методологія визначення сумісних довірчих областей і інтервалів параметрів технічного об'єкту, що визначаються на підставі його функцій чутливості параметрів, що вимірюється, до параметрів, що шукаються.

Ключові слова: об'єкт, параметр, ідентифікація, оптимальний, оцінки точності, планування, тепловий стан, чуйник теплового потоку

PLANNING AND ACCURACY ESTIMATION IN PARAMETRICAL IDENTIFICATION OF TEMPERATURE STATE DYNAMIC OBJECTS

D.F. Simbirsky, G.D. Simbirsky

The methods of parametrical identification of difficult technical objects are widely used at their experimental researches. Being the methods of the indirect measuring of parameters of objects, they must be completed by the decision of normative indexes of accuracy of results, whatever by virtue of complication of problem is usually executable. In this connection the universal methodology of decision of joint confiding regions and intervals of the determined parameters of technical object on the basis of its functions of sensitiveness measurable parameters to searching parameters developed in KNAI is expounded in an article and illustrated.

Keywords: object, a parameter, identification, is optimum, estimations of accuracy, planning, temperature state, sensor of heat stream

Симбирский Дмитрий Федорович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры конструкции и прочности двигателей летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина, e-mail: simdm@ukr.net.

Симбирский Геннадий Дмитриевич – канд. техн. наук, доцент кафедры информатики Харьковского национального автотранспортного университета, Харьков, Украина, e-mail simgn27@ukr.