

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.518

ПОГРЕШНОСТИ АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В ТУРБИНЕ

С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук»
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

Рассматривается семейство функций преобразования в виде зависимостей цифровых кодов от координат смещений в радиальном и осевом направлениях, заданных аналитически (в виде формул), и подобное ему семейство градуировочных характеристик, полученных экспериментально. Функции преобразования используются для построения градуировочных таблиц с выбранным шагом как в радиальном, так и в осевом направлении, которые, в свою очередь, используются для количественных оценок искомых погрешностей алгоритма вычисления. Приведены результаты таких оценок в зависимости от величины шага в обоих направлениях. Приведены также результаты исследований распределения погрешностей внутри ячейки градуировочной таблицы с размерами сторон, равными выбранным значениям шага.

Ключевые слова: лопатки сложной формы, одновитковый вихретоковый датчик, функция преобразования, градуировочная таблица, погрешности.

Введение

Известно, что радиальные зазоры (РЗ) между торцами лопаток рабочего колеса компрессора и турбины авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и внутренней поверхностью статорных оболочек являются важнейшими параметрами, от величины которых зависят экономичность и надежность силовых установок [1–3]. Необходимо отметить, что в стендовых испытаниях ГТД была подтверждена работоспособность одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника, размещенными непосредственно в газозоудушном тракте двигателя [4]. Включенные в состав системы измерения с ПЭВМ для обработки данных ОВТД обеспечивали получение текущей информации о РЗ в предположении об отсутствии многомерных (многокоординатных) смещений

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-00802).

Сергей Юрьевич Боровик (д.т.н.), ведущий научный сотрудник.

Марина Михайловна Кутейникова, научный сотрудник.

Юрий Николаевич Секисов (д.т.н.), заведующий лабораторией.

Юрий Николаевич Секисов (д.т.н.), заведующий лабораторией.

Олег Петрович Скобелев (д.т.н.), профессор, главный научный сотрудник.

торцов лопаток (в системе отсчета $OXYZ$, где точка O (начало отсчета) размещена на внутренней поверхности статора, смещениям в направлении оси Y соответствуют РЗ, оси X – осевые смещения рабочего колеса, оси Z – изгибы лопаток в направлении вращения).

Особенность ОВТД состоит в том, что при наличии многомерных смещений индуктивность ЧЭ реагирует не только на изменения искомого РЗ (координата y), но и на изменения координат x и z , которые при этом можно рассматривать как мешающие факторы (МФ). Чтобы избежать влияния таких МФ, в [5] предложены методы измерения всех без исключения составляющих многомерных смещений торцов лопаток, предусматривающие применение кластера (группы) ОВТД, число которых равно числу составляющих. В частности, при измерении РЗ (y) и наличии осевых смещений рабочего колеса (x) достаточно двух ОВТД в составе кластера. В измерительных цепях (ИЦ) систем измерения, реализующих кластерный метод, радиальные и осевые смещения (координаты y и x соответственно) преобразуются в изменения индуктивностей ОВТД₁ и ОВТД₂ и далее в соответствующие цифровые коды C_1 и C_2 , причем в составе программного обеспечения (ПО) предусмотрена процедура вычисления искомого координат путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} C_1 = C_1(x, y); \\ C_2 = C_2(x, y), \end{cases} \quad (1)$$

где $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ – градуировочные характеристики (ГХ), полученные экспериментально.

Если функции $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ монотонны, то система (1) решается с помощью алгоритма на основе метода Ньютона [6, 7]. Однако применение кластера ОВТД для измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной кривизной поверхности пера, а также в расширенном диапазоне изменений осевых смещений рабочего колеса в турбине сопровождается немонотонным характером изменений кодов ГХ по координате x [8]. При этом алгоритм на основе метода Ньютона неприменим, но можно воспользоваться алгоритмом, предложенным в работах [9, 10].

В графической интерпретации предложенного алгоритма, где коды C_1 и C_2 могут быть представлены плоскостями, параллельными плоскости OXY системы отсчета $SOXY$, а семейство ГХ ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$) – двумя поверхностями в той же самой системе отсчета, пересечение плоскостей C_1 и C_2 с поверхностями $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ происходит по кривым линиям, и их проекции на плоскость OXY также являются кривыми. При этом координаты x и y точки пересечения проекций кривых согласно рассматриваемому алгоритму являются решением системы уравнений (1). Последующие операции предусматривают поиск ячейки градуировочной таблицы (ГТ) и сетки прямоугольной формы, где находится точка пересечения (стороны ячейки равны шагу по каждой из координатных осей ($x_{ш}$, $y_{ш}$) ГТ). Далее в пределах найденной ячейки определяются координаты точки пересечения, причем внутри ячейки отрезки кривых заменяются отрезками прямых.

Представляется очевидным, что координаты точки пересечения отрезков кривых (x_k , y_k) будут отличаться от координат точки пересечения прямых (x_n , y_n), а их разности можно считать погрешностями такого алгоритма.

В работах [9, 10], а также в других известных публикациях отсутствуют какие-либо сведения о погрешностях вычисления координат x , y торцов лопаток. Поэтому целью настоящей статьи являются исследования и количественные оценки этих погрешностей.

Графическое представление погрешностей вычисления координат x , y и выбор семейства функций преобразования (ФП), заданных аналитически

Как отмечалось во введении, искомые погрешности определяются разностью координат точек пересечения отрезков кривых (x_k, y_k) и прямых (x_n, y_n):

$$\Delta x = x_k - x_n; \quad \Delta y = y_k - y_n. \quad (2)$$

Из рис. 1 следует, что в пределах одной ячейки наибольшие значения Δx и Δy наблюдаются в окрестностях центра ячейки. Кроме того, вполне ожидаемым является их рост в каждой ячейке ГТ с увеличением шага ($x_{ш}, y_{ш}$), и наоборот – снижение с уменьшением шага. Количественные оценки таких погрешностей определяют содержание первой серии (1) вычислительных экспериментов. Содержание второй серии (2) определяют исследования распределения погрешностей внутри ячеек, в т. ч. поблизости границ, где они стремятся к нулевым значениям. Результаты планируемых вычислительных экспериментов должны подтвердить сделанные предположения. Однако на предварительном этапе, предшествующем проведению исследований в рамках серий 1 и 2, производится выбор семейства ФП в виде зависимостей кодов от координат x , y , заданных аналитически, т. е. формулами, которые используются для получения ГТ с различными значениями $x_{ш}, y_{ш}$. Важным условием выбора такого семейства ($C_{1ан}(x, y)$ и $C_{2ан}(x, y)$) является подобие семейству ГХ ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$), полученному экспериментально с использованием турбинной лопатки. В свою очередь, прототип выбран из множества семейств ГХ по нескольким критериям.

Во-первых, каждая из функций семейства ГХ – как $C_1(x)$, так и $C_2(x)$ – при $y = \text{const}$ должна быть немонотонна при наличии наиболее выраженных экстремальных значений. При этом в изменениях кодов по координате x должен наблюдаться рост C_1 до максимума с последующим спадом, и наоборот – спад C_2 с последующим ростом.

Во-вторых, диапазоны изменений координат x , y должны быть одинаковыми, а хотя бы приближенное равенство желательно в чувствительности кодов к изменениям координат, и в первую очередь к изменениям координаты y (РЗ)¹.

И, наконец, в-третьих, координаты экстремальных значений кодов C_1 и C_2 по оси X должны соответствовать расстоянию между центрами ЧЭ₁ и ЧЭ₂ ОВТД в составе кластера (около 2 мм). Семейство ГХ прототипа представлено на рис. 2, а подобное ему базовое семейство ФП, предназначенное для получения ГТ, имеет вид

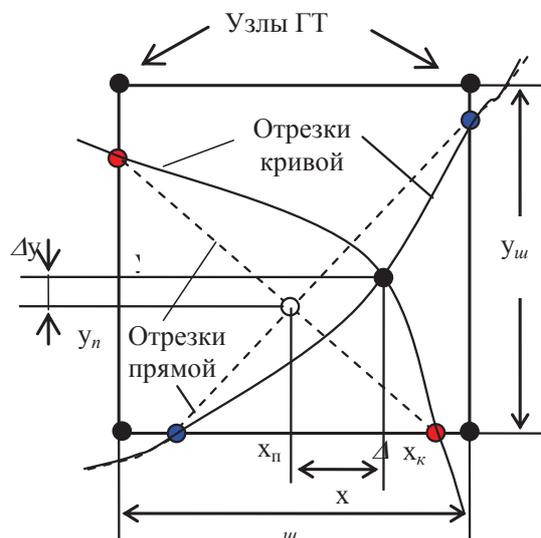


Рис. 1. Графическое представление погрешностей вычисления координат x , y в ячейке ГТ

¹ Среди имеющихся в наличии прототипов далеко не все соответствуют перечисленным критериям, что связано с некоторыми отличиями формы и размеров турбинных лопаток, использованных в процессе получения семейств ГХ, рассматриваемых как возможные прототипы.

$$\begin{cases} C_{1ан}(x, y) = A_{0,0} - A_{0,1} \cdot x + A_{0,2} \cdot x^2 + A_{1,0} \cdot y - A_{1,1} \cdot x \cdot y + A_{1,2} \cdot x^2 \cdot y + \\ + A_{2,0} \cdot y^2 - A_{2,1} \cdot x \cdot y^2 + A_{2,2} \cdot x^2 \cdot y^2; \\ C_{2ан}(x, y) = B_{0,0} - B_{0,1} \cdot x + B_{0,2} \cdot x^2 + B_{1,0} \cdot y - B_{1,1} \cdot x \cdot y + B_{1,2} \cdot x^2 \cdot y + \\ + B_{2,0} \cdot y^2 - B_{2,1} \cdot x \cdot y^2 + B_{2,2} \cdot x^2 \cdot y^2, \end{cases} \quad (3)$$

где А и В – коэффициенты.

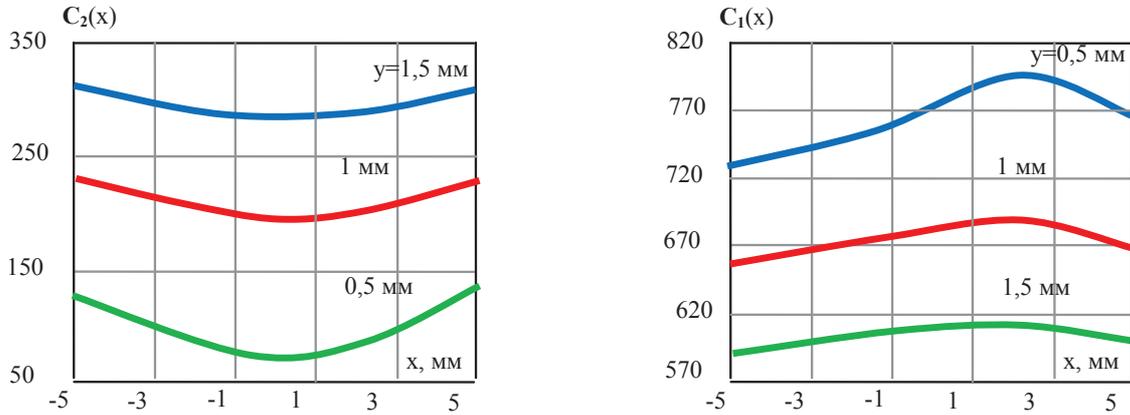


Рис. 2. Семейство ГХ, полученное экспериментально (прототип)

Семейства $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$, приведенные на рис. 3, получены для значений $A_{0,0} = 1087,9$; $A_{0,1} = 15,08$; $A_{0,2} = -2,648$; $A_{1,0} = -395,6$; $A_{1,1} = 11,76$; $A_{1,2} = 2,1716$; $A_{2,0} = 92,358$; $A_{2,1} = 2,648$; $A_{2,2} = -0,513$ и $B_{0,0} = -89,06$; $B_{0,1} = 4,5331$; $B_{0,2} = 1,6848$; $B_{1,0} = 417,54$; $B_{1,1} = -6,666$; $B_{1,2} = -0,942$; $B_{2,0} = -97,92$; $B_{2,1} = 1,7533$; $B_{2,2} = 0,1853$.

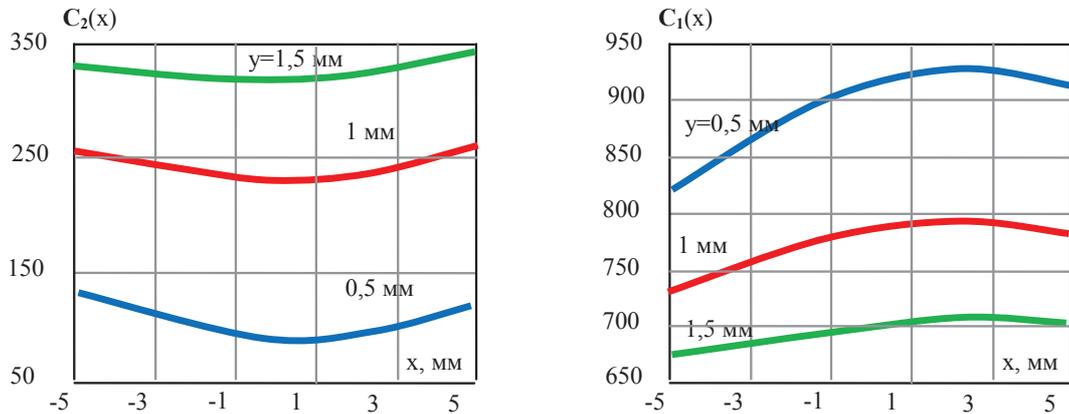


Рис. 3. Семейства ФП, полученные аналитически для определения погрешности алгоритма вычисления

Результаты исследований погрешностей

Вычислительные эксперименты серии 1 начинаются с построения ГТ с заданными $x_{ш}$, $u_{ш}$. Для этого используется семейство ФП, представленное выражениями (3). Выбирается одна из «ячеек» ГТ, и для ее центра с координатами $x_{ц}$, $u_{ц}$ (промежуточными значениями между «узлами» ГТ) с помощью выражения (3) находят коды $C_{1ц}$ и $C_{2ц}$. Полученные ГТ и коды $C_{1ц}$ и $C_{2ц}$ как исходные данные вводятся

в программу, реализующую алгоритм [9, 10], в которой выходными данными являются расчетные значения координат $x_{цр}$ и $y_{цр}$. Можно утверждать, что заданным и расчетным значениям координат ($x_{ц}, y_{ц}$ и $x_{цр}, y_{цр}$) в выражении (2) соответствуют координаты точки пересечения отрезков кривых и прямых ($x_{к}, y_{к}$ и $x_{п}, y_{п}$). С учетом этого искомую погрешность можно записать в виде

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_{к} - x_{п} = x_{ц} - x_{цр}, \\ \Delta y &= y_{к} - y_{п} = y_{ц} - y_{цр}.\end{aligned}\quad (4)$$

Выражение (4) используется для вычисления погрешности в выбранной ячейке, а затем процедура повторяется для остальных ячеек в данной ГТ и других ГТ с иными значениями $x_{ш}, y_{ш}$.

Они представляются в виде приведенных погрешностей и определяются по формулам

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot 100\%; \quad \delta_y = \frac{\Delta y}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\%,$$

где $x_{\max} - x_{\min}, y_{\max} - y_{\min}$ – диапазоны изменений координат x и y .

В процессе последующих вычислительных экспериментов исследовались погрешности δ_x в зависимости от координаты x ($\delta_x(x)$) при постоянных значениях координаты y ($y = \text{const}$) для выбранных значений $x_{ш} = 0,2$ мм при $y_{ш} = \text{var}$ (0,1; 0,2; 0,3; 0,5 мм), а также последовательно для $x_{ш}$, равных 0,3; 0,5 и 1 мм при изменениях $y_{ш}$ в указанном выше диапазоне.

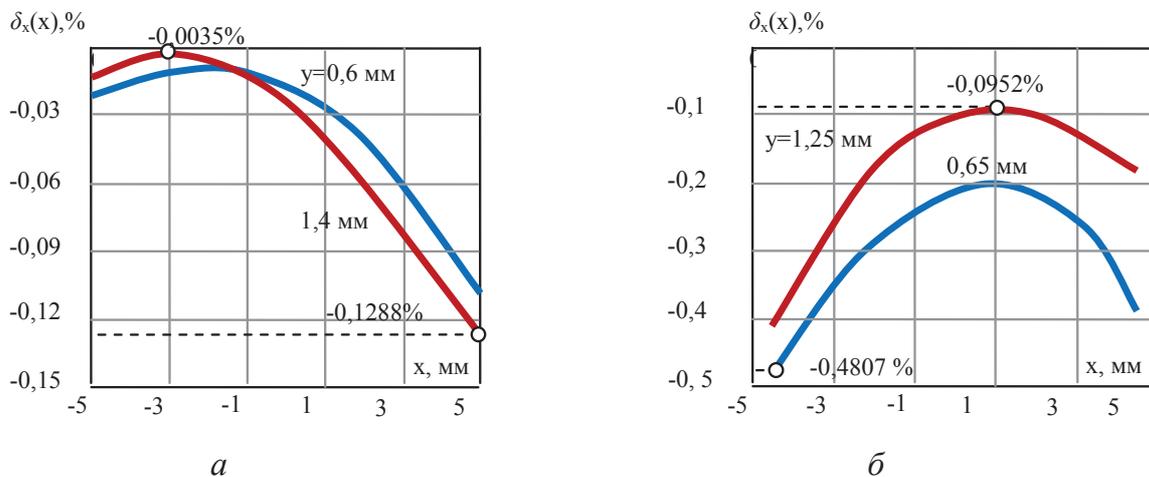


Рис. 4. Семейства $\delta_x(x)$ при $y = \text{const}$ и $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм (а), а также $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,3$ мм (б)

Из всего множества проведенных вычислительных экспериментов на рис. 4 представлены всего лишь два семейства $\delta_x(x)$. Первое из них (а) – для y , равного 0,6 и 1,4 мм при $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм; второе (б) – для y , равного 0,65 и 1,25 мм при $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,3$ мм. Общим для обоих семейств $\delta_x(x)$ (как, впрочем, и для всех остальных, оставшихся «за кадром») является одинаковый характер изменения δ_x по координате x , проявляющийся в наличии перегиба и экстремального значения на каждой из функций (наличие экстремальных значений кодов характерно и для семейств ФП и ГХ, представленных на рис. 2 и 3). При этом большая часть из множества исследованных погрешностей δ_x имеет отрицательный знак, в т. ч.

и те, что представлены на рис. 4.

Следует отметить, что отличительная особенность семейств $\delta_x(x)$, представленных на рис. 4, – это одинаковые значения погрешности δ_x для двух значений функции $\delta_x(x)$ при y , равном 0,6 и 1,4 мм (точка пересечения обеих функций).

Следует также отметить, что на рис. 4 обозначены границы изменения погрешностей для каждого из представленных семейств $\delta_x(x)$. Эти значения погрешностей размещены в табл. 1 наряду с теми значениями, которые были получены в вычислительных экспериментах при всех ранее перечисленных значениях $x_{ш}$, $y_{ш}$.

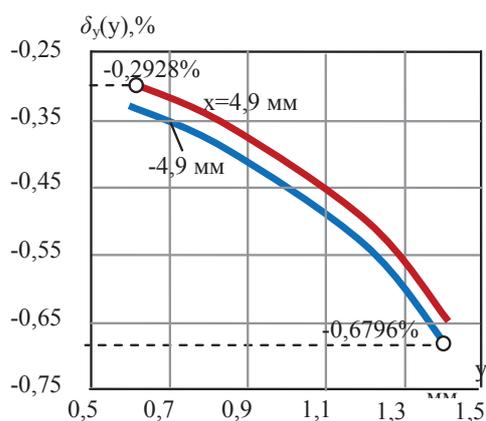
Таблица 1

Граничные значения погрешностей δ_x , %

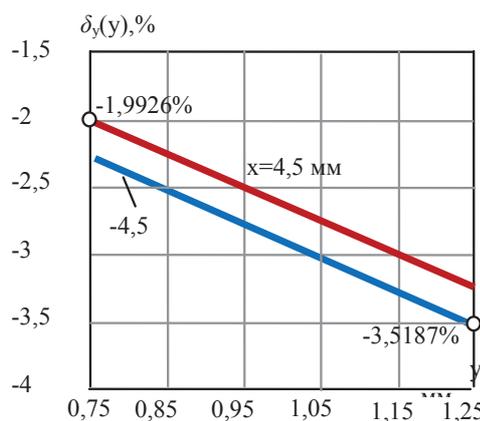
$y_{ш}$, мм	$x_{ш}$, мм			
	0,2	0,3	0,5	1
0,1	-0,0392	-0,0529	-0,1282	-0,4533
	-0,0051	-0,008	-0,0043	0,05858
0,2	-0,1288	-0,1206	-0,1607	-0,4853
	-0,0035	-0,0128	-0,0289	-0,022
0,3	-0,2538	-0,2428	-0,2611	-0,4807
	-0,0011	-0,0139	-0,0434	-0,0952
0,5	-0,7165	-0,6894	-0,6836	-0,6602
	0,01795	0,00269	-0,0412	-0,1642

Как и ожидалось, с увеличением шага $x_{ш}$ и $y_{ш}$ до 1 мм и 0,5 мм соответственно погрешности δ_x по модулю (без учета знака) остаются менее 1,0 % (рассматриваемые значения δ_x расположены по диагонали таблицы и тонированы).

Далее в рамках первой серии исследовались погрешности δ_y в зависимости от координаты y ($\delta_y(y)$) при постоянных значениях координаты x ($x=\text{const}$) для тех же значений шага $x_{ш}$, $y_{ш}$ и в той же последовательности, в которой определялись погрешности δ_x .



а



б

Рис. 5. Семейства $\delta_y(y)$ при $x = \text{const}$ и $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм (а), а также $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,5$ мм (б)

На рис. 5 представлены семейства $\delta_y(y)$ при x , равном -4,9 и +4,9 мм, $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм (а), а также при x , равном -4,5 и +4,5 мм, $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,5$ мм (б).

На обоих графиках погрешность δ_y отрицательна и возрастает по модулю

с увеличением y , причем такой характер изменений сохраняется во всех остальных вычислительных экспериментах, проводимых в оставшихся сочетаниях $x_{ш}$, $y_{ш}$ (за исключением значений $x_{ш} = 1,0$ мм, $y_{ш} = 0,1$ мм знак погрешности δ_y остается отрицательным).

Следует отметить также монотонный характер изменений погрешности $\delta_y(y)$, что соответствует характеру изменений кодов от y на графиках семейства ГХ прототипа и ФП на рис. 2 и 3.

Количественные оценки погрешностей δ_y (по результатам вычислительных экспериментов, проведенных в полном объеме) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Граничные значения погрешностей δ_y , %

$y_{ш}$, мм	$x_{ш}$, мм			
	0,2	0,3	0,5	1
0,1	-0,1825	-0,1824	-0,1803	-0,1533
	-0,0636	-0,0545	-0,021	0,11724
0,2	-0,6796	-0,6797	-0,6785	-0,6567
	-0,2928	-0,2865	-0,2552	-0,1277
0,3	-1,2707	-1,2715	-1,273	-1,2655
	-0,6955	-0,693	-0,6637	-0,5477
0,5	-3,5319	-3,5276	-3,5273	-3,5187
	-2,101	-2,1091	-2,0813	-1,9926

Как видно из таблицы, погрешность δ_y при выбранном значении $y_{ш}$ незначительно зависит от $x_{ш}$. Напротив, при выбранном $x_{ш}$ погрешность δ_y существенно возрастает (примерно до 3,5 % по модулю). При этом указанный рост δ_y наблюдается при всех выбранных значениях $x_{ш}$ (0,2; 0,3; 0,5; 1,0 мм).

Полученные результаты вычислительных экспериментов серии 1 могут иметь важную практическую значимость при выборе шага в процессе экспериментального получения семейства ГХ и соответствующих ГТ при заданных погрешностях вычисления искомых координат. Пусть (к примеру) δ_y и δ_x не могут быть больше 1 %. Тогда по данным табл. 2 $y_{ш}$ не может превышать 0,2 мм (при любом значении $x_{ш}$ – от 0,2 мм до 1 мм включительно). При этом согласно табл. 1 δ_x также не превышает 1 % при тех же значениях $x_{ш}$, $y_{ш}$.

Методика проведения вычислительных экспериментов серии 2 в целом аналогична серии 1, но отличается тем, что исследуется распределение погрешностей δ_x^* и δ_y^* только в границах одной ячейки, т. е. в пределах $x_{ш}$, $y_{ш}$ ГТ.

При этом исследуются $\delta_x^*(x)$ при постоянстве координаты y , соответствующей центру выбранной ячейки ($y_{ц}$) и с заданным шагом $x_{ш}^*$, равным, например, десятой части $x_{ш}$ ГТ ($x_{ш}^* = 0,1 \cdot x_{ш}$). Кроме того, исследуется $\delta_y^*(y)$ при постоянстве координаты x , соответствующей центру выбранной ячейки ($x_{ц}$) и с заданным шагом $y_{ш}^*$, выбранным, например, равным $0,1 \cdot y_{ш}$ ГТ. На рис. 6 представлены погрешности $\delta_x^*(x)$ (а) и $\delta_y^*(y)$ (б), полученные в результате вычислительных экспериментов в ячейке ГТ с координатами ее центра $x_{ц} = -3,5$ мм, $y_{ц} = 0,75$ мм и шагами $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,5$ мм.

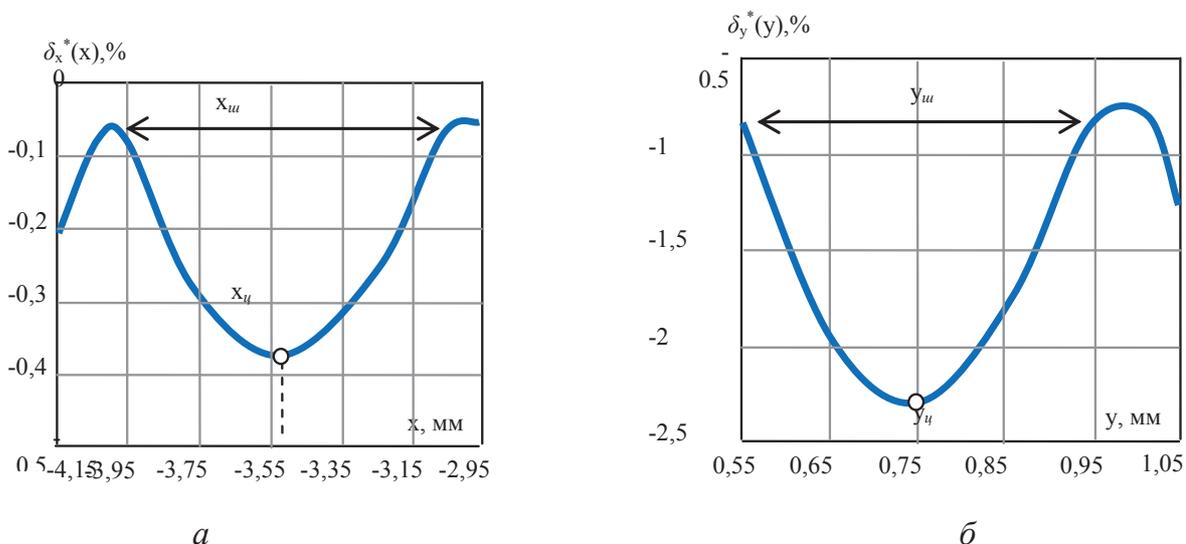


Рис. 6. Распределение погрешности $\delta_x^*(x)$ и $\delta_y^*(y)$ в границах выбранной ячейки ГТ

Как и ожидалось, погрешности δ_x^* и δ_y^* достигают максимума в центре ячейки и стремятся к нулю на ее гранях.

Заключение

Дано графическое представление погрешностей алгоритма вычисления координат x , y смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах. Для исследований таких погрешностей и их количественной оценки осуществлен выбор семейства ФП в виде зависимостей кодов от координат x , y , заданных аналитически, которые используются для получения ГТ с варьируемыми значениями шага ($x_{ш}$ и $y_{ш}$). При этом важным условием выбора являлось подобие семейству ГХ, полученных экспериментально, которое, в свою очередь, выбрано из множества семейств ГХ по нескольким критериям подобия.

Показано, что при изменении $x_{ш}$ в пределах от 0,2 до 1 мм и $y_{ш}$ от 0,1 до 0,5 мм погрешность вычисления по координате x возрастает, но остается менее 1 %. В тех же диапазонах изменений $x_{ш}$ и $y_{ш}$ погрешность вычисления y -координаты при выбранном $y_{ш}$ незначительно зависит от $x_{ш}$ и, напротив, при выбранном $x_{ш}$ существенно возрастает примерно до 3,5 %, причем указанный рост наблюдается при всех выбранных значениях $x_{ш}$.

Проведены дополнительные исследования распределения погрешностей вычисления координат x , y внутри «ячеек» ГТ. При выбранном шаге, составляющем малые доли $x_{ш}$ и $y_{ш}$, показано, что погрешности возрастают до максимального значения в центре «ячейки» и уменьшаются до нуля на ее границе.

Полученные количественные оценки погрешностей вычисления координат x , y имеют важную практическую значимость при экспериментальном получении семейства ГХ, когда указанная погрешность не должна превышать допустимых значений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Н.Д., Данильченко В.П., Резник В.Е. Управление радиальными зазорами в турбокомпрессорах авиационных ГТД. – Самара: Самар. авиац. и-т, 1991. – 109 с.
2. Прокопец А., Ревзин Б., Рожков А. Необходимость диагностирования радиальных зазоров в проточной части газотурбинных двигателей // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 4. – С. 5–7.
3. Lattime S., Steinetz B. Turbine Engine Clearance Control Systems: Current Practices and Future Directions // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, Indiana, July 7-10. – 2002.
4. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых уста-

- новок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.
5. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Под общ. ред. О.П. Скобелева. – М.: Машиностроение, 2011. – 298 с.
 6. Волков Е.А. Численные методы: Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2008. – 248 с.
 7. Тулунова В.В., Филимонов Р.В. Алгоритмические и программные средства аппроксимации градуировочных характеристик систем измерения полиномиальными функциями нескольких переменных // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. III Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2001. – С. 573–577.
 8. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной чувствительностью и в расширенном диапазоне // Автометрия. – 2015. – № 3. – С. 104–112.
 9. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2010. – С. 323–327.
 10. Кутейникова М.М. Вычисление координат смещения торцов лопаток в системе измерения радиальных зазоров // Управление большими системами: Материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Т. 3. – Уфа: УГАТУ, 2013. – С. 157–161.

Статья поступила в редакцию 24 мая 2016 г.

COMPLEX SHAPED BLADES TIPS' RADIAL AND AXIAL DISPLACEMENTS CALCULATION ERRORS IN THE SYSTEMS FOR MEASURING OF RADIAL CLEARANCES IN TURBINE

S.Yu. Borovik, M.M. Kuteynikova, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

Analytically given conversion function set as a digital code dependence on coordinate displacements in radial and axial direction is considered. Experimentally obtained set of calibration characteristics similar to conversion function set is considered, too. Conversion functions are used for construction of calibration charts with given subintervals in radial and axial directions. These calibration charts are used for quantitative estimation of the errors of calculation algorithms. The estimate results in dependence of subintervals in both directions are given. The results of errors' distribution investigation inside of the calibration chart's cell with side dimension equals to given subintervals are considered, too.

Keywords: *complex shaped blades, single-coil eddy-current sensor, conversion function, calibration grid, errors.*

This work was supported by grant #14-08-00802 from the Russian Foundation for Basic Research.

Sergey Y. Borovik (Dr. Sci. (Techn.)), Leading Researcher.

Marina M. Kuteynikova, Research fellow.

Yuriy N. Sekisov (Dr. Sci. (Techn.)), Head of Laboratory

Oleg P. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Chief Scientist.