

УДК 531.781.2(088.8)

## МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ДИСКРЕТНО - ФАЗОВОГО МЕТОДА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДЕФОРМАЦИЙ ЛОПАТОК ТУРБОАГРЕГАТОВ

© 2004 А. И. Данилин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Приводится описание одного из вариантов определения методической погрешности оптоэлектронного дискретно-фазового метода определения деформаций лопаток турбоагрегатов с помощью регрессионных математических моделей, построенных на основе теории планирования факторного эксперимента. Рассматривается процесс получения интерполяционных полиномов для описания методической погрешности. Приведены графики для методической погрешности в зависимости от вариаций влияющих факторов и показано, что существуют оптимальные параметры измерительной системы, позволяющие минимизировать методическую погрешность определения деформаций лопаток турбоагрегатов.

При определении деформаций лопаток турбоагрегатов с помощью оптоэлектронного дискретно-фазового метода (ОЭДФМ) измеряется временной интервал между информационным импульсом оптоэлектронного первичного преобразователя (ОЭП) и опорным импульсом вихретокового первичного преобразователя (ВТП) [1]. Импульсы в первом приближении имеют колоколообразную форму. Для выполнения корректных измерений необходимо определить характерные точки импульсов, которые будут являться отсчетными при нахождении временного интервала. Из сущности ОЭДФМ следует, что такими характерными точками должны быть временные отметки, соответствующие амплитудным значениям импульсов. Нахождение амплитудных значений импульсных сигналов аналоговыми способами, например с помощью схем пикового детектирования, не позволяет определять момент времени наступления максимального значения сигнала. При использовании цифровых методов точность нахождения амплитудно-временных значений информационных импульсов в значительной мере определяется быстродействием и разрядностью используемых аналого-цифровых преобразователей, устройствами и программным обеспечением для последующего анализа и сравнения амплитудных отсчетов, выбора среди них максимального значения и привязки его к текущему времени. Поэтому аппаратная реализация такого

функционального узла оказывается громоздкой и дорогостоящей.

Компромиссный вариант основан на аналоговом компарировании по одному уровню переднего и заднего фронтов колоколообразного импульса [2] и последующего использования в качестве характерной точки середины полученного прямоугольного импульса. Временные же интервалы между серединами прямоугольных импульсов легко определяются классическими цифровыми способами. Такой подход оказывается значительно проще и эффективнее с точки зрения компактности аппаратной реализации измерительного блока. Поэтому для построения оптоэлектронных устройств, реализующих дискретно-фазовый метод амплитудных отсчетов, выбора среди них максимального значения и привязки его к текущему времени. Поэтому аппаратная реализация такого функционального узла оказывается громоздкой и дорогостоящей.

Компромиссный вариант основан на аналоговом компарировании по одному уровню переднего и заднего фронтов колоколообразного импульса [2] и последующего использования в качестве характерной точки середины полученного прямоугольного импульса. Временные же интервалы между серединами прямоугольных импульсов легко определяются классическими цифровыми способами. Такой подход оказывается значительно проще и эффективнее с точки зрения

компактности аппаратной реализации измерительного блока. Поэтому для построения оптоэлектронных устройств, реализующих дискретно-фазовый метод определения деформаций лопаток, использовался именно такой вариант, и дальнейшее рассмотрение погрешностей метода ведется с точки зрения точности определения временных интервалов между серединами импульсов ОЭП и ВТП. Источником же методической погрешности является асимметрия колоколообразных импульсов, обусловленная физическими процессами взаимодействия объекта контроля, т. е. торца лопатки, и чувствительных элементов в первичных преобразователях.

Определение середины  $S$  импульса ОЭП - процесс неоднозначный, зависящий от комбинационного соотношения таких факторов, как установочный зазор  $\delta$ , уровень компарирования  $U_k$  и диапазон изменения угловых положений  $\alpha$  торца лопатки. Поэтому при минимизации методической погрешности требуется определить оптимальные значения установочного зазора и уровня компарирования в требуемом диапазоне угловых положений торцов лопаток. Для этого необходимо найти аналитическое задание линии, которая проходит через середины отрезков, соединяющих равные значения на переднем и заднем фронтах импульса. Пусть это будет линия середины импульса (ЛСИ):  $S_{ОЭП} = \varphi(\delta; U_k; \alpha)$ . При нахождении аналитического выражения ЛСИ в качестве исходных будут выступать данные, полученные как экспериментально, так и в результате теоретических расчетов. Поэтому целесообразно воспользоваться методами построения интерполяционных моделей, разработанными в теории планирования факторного эксперимента, с последующим регрессионным анализом полученных зависимостей [3, 4, 5].

Методика нахождения интерполяционного полинома [3] применительно к решению поставленной задачи выглядит следующим образом. Необходимо получить некоторое представление о функции отклика  $S_{ОЭП} = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  - независимые переменные факторы, варьиру-

емые при проведении эксперимента. Для этого искомую функцию отклика аппроксимируют полиномом

$$S_{РОЭП} = b_0 + \sum_1^n b_i x_i + \sum_{i \leq j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_1^n b_{ii} x_i^2 + \dots,$$

где  $S_{РОЭП}$  - полиномиальное выражение ЛСИ;  $b$  - соответствующие коэффициенты регрессионного полинома.

Факторный эксперимент осуществляется с помощью матрицы планирования. В результате кодирования факторов она приобретает стандартную форму. При кодировании факторов осуществляется линейное преобразование факторного пространства с переносом начала координат в центр эксперимента и выбором масштаба по осям в единицах варьирования факторов. Кодирование факторов основано на отношении

$$x_i = \frac{c_i - c_{0i}}{\varepsilon},$$

где  $x_i$  - кодированное значение фактора;  $c_i$  - натуральное значение фактора;  $c_{0i}$  - натуральное значение фактора на нулевом уровне;  $\varepsilon$  - натуральное значение интервала варьирования.

После построения матрицы планирования ее преобразуют в рабочую матрицу, заменяя кодированные значения переменных соответствующими именованными величинами. Затем с помощью рабочей матрицы ведется эксперимент. После получения экспериментальных данных вновь возвращаются к матрице планирования, преобразуя ее в расчетную матрицу. Если модель первого порядка оказалась неадекватной, то переходят к модели второго порядка, расчет коэффициентов регрессии которой осуществляется по формулам [5]

$$b_0 = \frac{A}{N} \left[ 2\lambda^2 (n+2) \sum_u S_u - 2\lambda C \sum_{i=1}^n \sum_u x_{iu}^2 S_u \right];$$

$$b_i = \frac{C}{N} \sum_u x_{iu} S_u; \quad b_{ij} = \frac{C^2}{N\lambda} \sum_u x_{iu} x_{ju} S_u;$$

$$b_{ii} = \frac{A}{N} \left\{ C^2 [(n+2)\lambda - n] \sum_u x_{iu}^2 S_u + \right. \\ \left. + C^2 (1-\lambda) \sum_{i=1}^n \sum_u x_{iu}^2 S_u - 2\lambda C \sum_u S_u \right\};$$

$$A = \frac{1}{2\lambda [(n+2)\lambda - n]}; \quad C = \frac{N}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2};$$

$$\lambda = \frac{nN}{(n+2)(N - n_0)},$$

где  $n$  - число варьируемых факторов;  $n_0$  - число нулевых точек;  $N$  - общее число опытов;  $u$  - номер опыта;  $S_u$  - значение ЛСИ в  $u$ -ом опыте;  $\lambda$  - константа.

Дисперсии адекватности коэффициентов регрессии определяются с помощью следующих выражений [6]:

$$D_{\{b_0\}}^2 = \frac{2 A \lambda^2 (n+2) D_{\{S\}}^2}{N};$$

$$D_{\{b_i\}}^2 = \frac{C D_{\{S\}}^2}{N}; \quad D_{\{b_{ij}\}}^2 = \frac{C^2 D_{\{S\}}^2}{\lambda N};$$

$$D_{\{b_{ii}\}}^2 = \frac{A [(n+1)\lambda - (n-1)C^2 D_{\{S\}}^2]}{N},$$

где  $D_{\{S\}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^m (S_{iu} - S_{cu})^2}{N(m-1)}$  - дисперсия, ха-

рактеризующая ошибку опытов;  $S_{iu}$  - значения ЛСИ в параллельных опытах;  $S_{cu}$  - среднее значение ЛСИ по параллельным опытам;  $m$  - число параллельных опытов.

При проверке адекватности модели второго порядка используются [3] следующие формулы:

$$G_E = \sum_{u=1}^{n_0} (S_{0u} - \bar{S}_0)^2; \quad G_R = \sum_{u=1}^N (S_{cu} - S_{POЭП})^2;$$

$$G_{AD} = G_R - G_E; \quad f_{AD} = N - \frac{(n+2)(n+1)}{2} - (n_0 - 1);$$

$$F_p = \frac{G_{AD} f_E}{G_E f_{AD}},$$

где  $G_E$  - сумма квадратов, связанная с дисперсией, характеризующей ошибку опыта;  $G_R$  - остаточная сумма квадратов;  $G_{AD}$  - сумма квадратов, связанная с дисперсией адекватности модели;  $f_E, f_{AD}$  - соответствующие числа степеней свободы;  $F_p$  - расчетное значение критерия Фишера;  $S_{0u}$  - значения ЛСИ в нулевой точке в  $u$ -ом опыте;  $\bar{S}_0$  - среднее значение ЛСИ по нулевым точкам.

После сравнения расчетного значения критерия Фишера с табличным, при 5 %-ном уровне значимости, делается вывод об адекватности представления функции отклика уравнением регрессии второй степени. Далее проверяется значимость коэффициентов регрессии путем построения доверительных интервалов:  $\pm \Delta b = \pm t D_{\{b\}}$ , где  $t$  - табличное значение критерия Стьюдента с 95 %-ой достоверностью при соответствующем числе степеней свободы;  $D_{\{b\}}$  - дисперсии адекватности соответствующих коэффициентов регрессии.

При нахождении аналитического задания ЛСИ ОЭП линейная модель функции отклика оказалась неадекватной. Поэтому проводилось центральное композиционное планирование второго порядка. Функция отклика аппроксимировалась полиномом второй степени, который имеет вид

$$S_{POЭП} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + \\ + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2.$$

После расчета коэффициентов регрессии получено уравнение

$$S_{\text{РОЭП}} = 10^{-3} [ 677 + 251x_1 + 396x_2 + 0,32x_3 + 144x_1x_2 - 8,5x_1x_3 + 5,25x_2x_3 - 16,9x_1^2 + 2,54x_2^2 - 13,4x_3^2 ]$$

Проверка адекватности модели второго порядка по вышеприведенным формулам показала, что

$$G_E = 1,82 \cdot 10^{-2}; G_R = 6,6 \cdot 10^{-2};$$

$$G_{\text{Ад}} = 4,78 \cdot 10^{-2}; f_{\text{Ад}} = 5; F_p = 2,63.$$

В связи с тем, что табличное значение критерия Фишера  $F_{0,05} = 5,05 > F_p$ , гипотезу об адекватности уравнения с 95 %-ой вероятностью можно считать верной. Результаты определения значимости коэффициентов найденного уравнения регрессии приведены в таблице 1.

Коэффициент регрессии можно считать значимым, если его абсолютное значение больше величины доверительного интервала [4]. Таким образом, в полученном уравнении значимыми с 95 %-ой вероятностью являются все коэффициенты, кроме  $b_3, b_{23}, b_{22}$  (для учета эффекта, обусловленного произведением факторов  $x_1x_3$ , коэффициент  $b_{13} = 8,5$  можно считать значимым в силу его близкого значения к величине соответствующего доверительного интервала  $\Delta b_{ij} = \pm 10,31 \cdot 10^{-3}$ ). Поэтому искомое уравнение преобразуется к виду

$$S_{\text{РОЭП}} = 10^{-3} [ 677 + 251x_1 + 396x_2 + 144x_1x_2 - 8,5x_1x_3 - 16,9x_1^2 - 13,4x_3^2 ]$$

Таблица 1

$D_{\{S\}}^2$	$8,357 \cdot 10^{-5}$	$t=3,182$ для $f=3$	
$D_{\{b_0\}}^2$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$\Delta b_0$	$\pm 11,86 \cdot 10^{-3}$
$D_{\{b_i\}}^2$	$6,12 \cdot 10^{-6}$	$\Delta b_i$	$\pm 7,87 \cdot 10^{-3}$
$D_{\{b_{ij}\}}^2$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$\Delta b_{ij}$	$\pm 10,31 \cdot 10^{-3}$
$D_{\{b_{ii}\}}^2$	$5,81 \cdot 10^{-6}$	$\Delta b_{ii}$	$\pm 7,67 \cdot 10^{-3}$

Это уравнение с кодированными факторами неудобно для интерпретации полученных результатов и практического использования. Преобразуем его к именованным величинам с помощью формул перехода

$$x_1 = \frac{\ln \delta - 1}{0.4}; x_2 = \frac{\alpha - 15}{9}; x_3 = \frac{K_1 - 0.5}{0.2},$$

где  $K_1$  - нормированный уровень компарирования импульса ОЭП,

$$S_{\text{РОЭП}} = 10^{-3} [ -253 + 292 \ln \delta + 4\alpha + 40\alpha \ln \delta - 106K_1 \ln \delta + 441K_1 - 106 \ln^2 \delta - 335K_1^2 ]$$

Методическая приведенная погрешность [6] определения информационного параметра ОЭП при условии, что положение опорной метки соответствует нулевому значению:  $S=0$ , представляется в виде  $\psi = \frac{\Delta S}{S_m}$ ,

$$\psi = \frac{\Delta S}{S_m}$$

где

$$\Delta S = S_1 - S_2 = \varphi(\delta_1; \alpha; K_{11}) - \varphi(\delta_2; \alpha; K_{12});$$

$S_m$  - значение информационного параметра, соответствующее конечной точке диапазона измерений.

Известно, что максимально допустимые уровни вибраций корпуса двигателя НК-12СТ вызывают нестабильность установочных зазоров порядка  $\pm 0,2$  мм. Это приводит к изменению амплитуды сигналов первичных преобразователей на  $\pm (10...15)$  % и, как следствие, к изменению на такую же величину опорных уровней компарирования. Поэтому при расчетах методической приведенной погрешности ОЭДФМ принято:  $\Delta \delta = \delta_1 - \delta_2 = \pm 0,2$  мм - нестабильность установочного зазора;  $\delta = (1...5,5)$  мм - диапазон возможных значений установочного зазора;  $\Delta K_1 = K_{11} - K_{12} = \pm 0,1$  - нестабильность нормированного уровня компарирования;  $K_1 = 0,1...0,8$  - возможные значения нормированного уровня компарирования;  $\Delta \alpha = 0...30^\circ$  - диапазон изменений угловых положений торца лопатки. Тогда выражение

для методической приведенной погрешности запишется в виде

$$\Psi = \frac{\varphi(\delta_1; \alpha; K_{11}) - \varphi(\delta_2; \alpha; K_{12})}{\varphi\left(\frac{\delta_1 - \delta_2}{2}; 30^\circ; \frac{K_{11} - K_{12}}{2}\right)} \cdot 100.$$

Результаты расчетов для значений  $\alpha = 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  приведены на рис. 1.

Для определения общей методической погрешности ОЭДФМ необходимо найти вторую составляющую погрешности, обусловленную алгоритмом обработки аналоговых импульсов ВТП. С этой целью экспериментально были получены трассовые характеристики выходных сигналов преобразователя. Эксперименты проводились с лопаткой, длина которой  $L = 50$  мм, для значений установочных зазоров  $\delta$ , равных (0,5; 2,0; 4,0; 6,0) мм, при угловых положениях торца лопатки  $\alpha$ , равных  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ , и радиусе обмотки ВТП  $R_{ВТП} = 4$  мм. Значения угловых координат  $\gamma$

отсчитывались с помощью нониусного гониометра, выходные напряжения ВТП измерялись цифровым вольтметром. Для примера на рис. 2 приведены нормированные трассовые характеристики импульсов ВТП:  $U/U_{max} = f(\gamma)$  при нескольких фиксированных значениях  $\delta$  и  $\alpha = 20^\circ$ . Нулевое значение текущей абсциссы соответствует местоположению оси ВТП.

На основании экспериментальных трассовых характеристик ВТП рассчитаны середины импульсов с учетом нормировки размерных соотношений лопатки и ВТП:  $S = \gamma_{cp} L / R_{ВТП}$ . По результатам расчетов построены ЛСИ:  $S_{ВТП} = f(K_2)$  для различных уровней компарирования  $K_2$  при фиксированных значениях  $\delta$  и  $\alpha$ . В качестве примера для  $\alpha = 10^\circ$  на рис. 3 приведены графики ЛСИ ВТП.

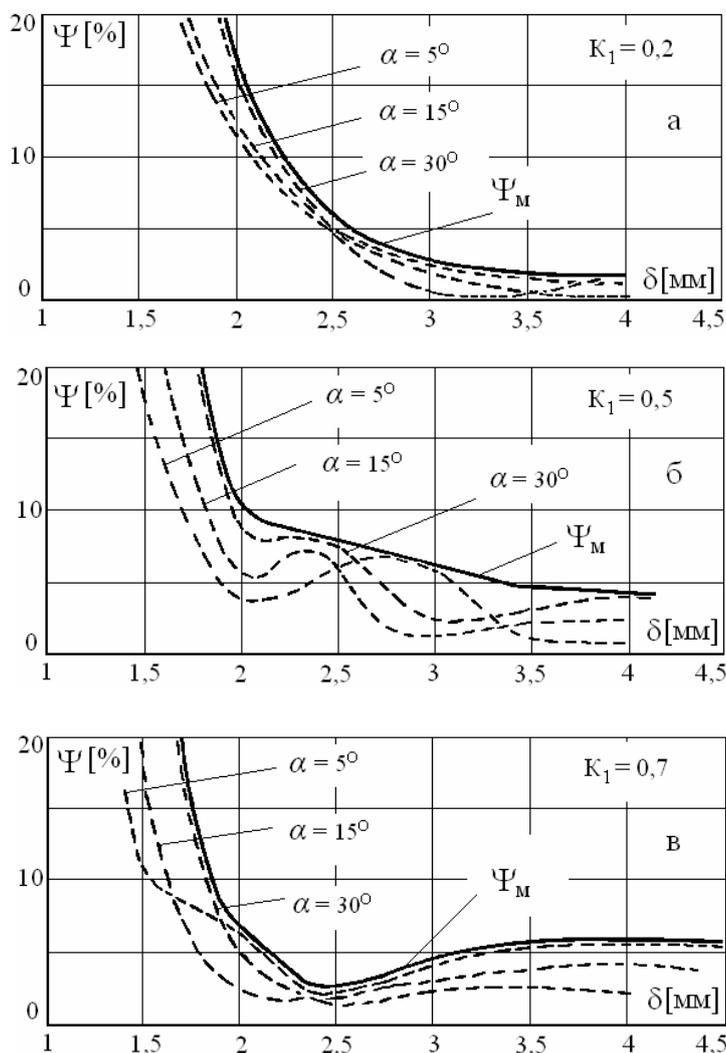


Рис. 1. Методическая приведенная погрешность определения информационного параметра ОЭП: а –  $K_1=0,2$ ; б –  $K_1=0,5$ ; в –  $K_1=0,7$

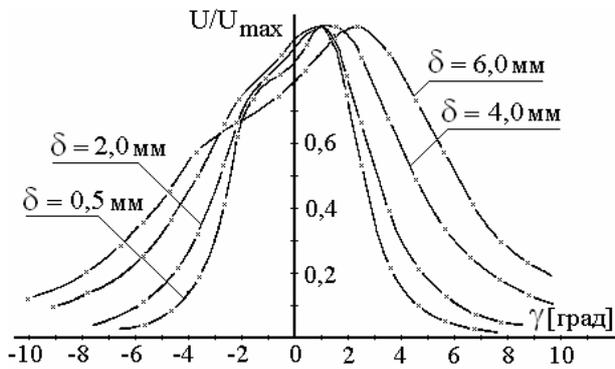


Рис. 2. Нормированные трассовые характеристики импульсов ВТП для фиксированных уст ановочных зазоров и  $\alpha = 20^\circ$

Известно [8], что передаточная характеристика ВТП определяется многими факторами, которые группируются в три основные группы: функциональные, конструктивно-технологические и конструктивные.

К функциональным факторам относятся: рабочая частота возбуждения, электропроводность, магнитная проницаемость, геометрические параметры контролируемого металлоизделия и некоторые другие факторы. В группу конструктивно-технологических параметров рационально объединить плотность и равномерность намотки катушек ВТП, способ намотки, число витков, материал провода обмоток и его характеристики. Конструктивные параметры включают в себя диаметры обмоток ВТП, их ширину, длину и расстояние между ними.

Из перечисленных параметров наибольшее влияние на передаточную характеристику ВТП оказывают конструктивные

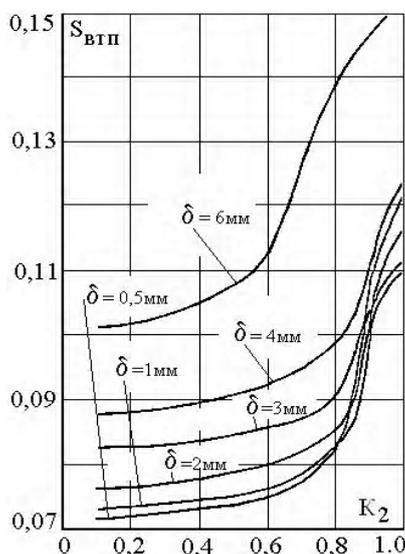


Рис. 3. Линии середин импульсов ВТП для  $\alpha = 10^\circ$

[7, 8]. Таким образом, меняя конструктивные параметры, можно сформировать необходимую передаточную характеристику ВТП [7] с минимальными для конкретных условий абсолютными погрешностями отклонения середин импульсов. Для этого составляется матрица планирования эксперимента [3, 5], в которой указываются факторы и диапазон их изменения. Поиск оптимальных конструктивных соотношений осуществляется на ЭВМ методом ускоренного симплекс-планирования, и результаты экспериментальных работ в этом направлении показывают на возможность уменьшения указанных погрешностей практически до нулевых значений [7].

Информационный параметр, как было определено ранее, заключен между серединами импульсов генерируемых ОЭП и ВТП во время прохождения возле них торца лопатки. Поэтому можно записать

$$S_{инф}(\delta; \alpha; K_1; K_2) = |S_{ОЭП}(\delta; \alpha; K_1)| + |S_{ВТП}(\delta; \alpha; K_2)|.$$

Для нахождения аналитического выражения зависимости  $S_{инф}$  от четырех независимых переменных воспользуемся методами теории планирования факторного эксперимента. В этом случае искомый аппроксимирующий квадратичный полином представляется в виде

$$S_u = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2.$$

Обозначения переменных, уровни и интервалы варьирования факторов сведены в таблицу 2. Рассчитанные коэффициенты аппроксимирующего полинома сведены в таблицу 3.

Проверка адекватности представления искомой зависимости уравнением второй степени показала, что

$$G_E = 5,92 \cdot 10^{-4}; G_R = 3,717 \cdot 10^{-3};$$

$$G_{АД} = 3,125 \cdot 10^{-3}; f_E = 6; f_{АД} = 10;$$

$$F_p = 3,167.$$

Таблица 2

Переменные		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
		$\ln \delta$	$\alpha$	$K_1$	$K_2$
Уровни варьирования	2	1,8	30	0,8	0,8
	1	1,35	22,5	0,65	0,65
	0	0,9	15	0,5	0,5
	-1	0,45	7,5	0,35	0,35
	-2	0	0	0,2	0,2
интервал	$\varepsilon$	0,45	7,5	0,15	0,15

Таблица 3

$b_1$	$273,4 \cdot 10^{-3}$	$b_{11}$	$56,36 \cdot 10^{-3}$	$b_{12}$	$139,9 \cdot 10^{-3}$	$b_{23}$	$-2,31 \cdot 10^{-3}$
$b_2$	$338,7 \cdot 10^{-3}$	$b_{22}$	$-1,389 \cdot 10^{-3}$	$b_{13}$	$0,44 \cdot 10^{-3}$	$b_{24}$	$0,44 \cdot 10^{-3}$
$b_3$	$-4,88 \cdot 10^{-3}$	$b_{33}$	$-2,64 \cdot 10^{-3}$	$b_{14}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$b_{34}$	$-0,688 \cdot 10^{-3}$
$b_4$	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$b_{44}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$b_0$	$658,7 \cdot 10^{-3}$		
$A = 0,49804$		$C = 1,29167$				$\lambda = 0,861$	

Таблица 4

$D_{\{S\}}^2$	$59,2 \cdot 10^{-5}$	$t = 2,447$ для $f = 6$	
$D_{\{b_0\}}^2$	$8,461 \cdot 10^{-5}$	$\Delta b_0$	$\pm 2,25 \cdot 10^{-3}$
$D_{\{b_i\}}^2$	$2,467 \cdot 10^{-5}$	$\Delta b_i$	$\pm 12,2 \cdot 10^{-3}$
$D_{\{b_{ij}\}}^2$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$\Delta b_{ij}$	$\pm 14,9 \cdot 10^{-3}$
$D_{\{b_{ii}\}}^2$	$2,07 \cdot 10^{-5}$	$\Delta b_{ii}$	$\pm 11,1 \cdot 10^{-3}$

В связи с тем, что табличное значение критерия Фишера  $F_{0,05} = 4,06 > F_p$ , гипотезу об адекватности полученной математической модели с 95 %-ной вероятностью можно считать верной. Результаты расчетов дисперсии адекватности коэффициентов, приведенных в таблице 3, сведены в таблицу 4.

Согласно [5] значимыми с 95 %-ой вероятностью являются коэффициенты  $b_0; b_1; b_2; b_{12}; b_{11}$ . Незначимость коэффициентов  $b_3; b_4$  означает, что эффекты, определяемые параметрами  $x_3; x_4$ , и связанные с ними эффекты взаимодействия, не оказывают существенного влияния на получение информационного параметра по сравнению с остальными в диапазоне проведенных экспе-

риментов. Поэтому аппроксимирующий полином можно записать в виде

$$S_u = 10^{-3} [ 659 + 273x_1 + 339x_2 + 140x_1x_2 + 56,4x_1^2 ] .$$

Формулы перехода к значимым натуральным коэффициентам имеют вид

$$x_1 = \frac{\ln \delta - 0,9}{0,45} ; x_2 = \frac{\alpha - 15}{7,5} .$$

После приведения к натуральным величинам полученное уравнение представляется следующим образом:

$$S_{pu} = 10^{-3} [ 219,67 - 515,38 \ln \delta + 7,85\alpha + 41,46\alpha \ln \delta + 278,32 \ln^2 \delta ] .$$

Тогда выражение для методической приведенной погрешности определения информационного временного интервала можно представить в следующем виде:

$$\psi = \frac{\varphi(\delta_1; \alpha) - \varphi(\delta_2; \alpha)}{\varphi\left(\frac{\delta_1 - \delta_2}{2}; 30^\circ\right)} \cdot 100.$$

Проведенный количественный анализ методической приведенной погрешности для системы ОЭП-ВТП в диапазоне  $\alpha: (5...30)^\circ$  и  $\delta: (0...5)$  мм, представленный в виде графиков на рис. 4, показывает, что минимальное значение погрешности (около 1 %) достигается при  $\delta = 2,25$  мм.

Таким образом, рассмотренный подход к определению методической погрешности ОЭДФМ позволяет на основе экспериментально-расчетных параметров исследуемой системы получать аналитические выражения необходимых зависимостей, оценивать вклад и значимость каждого параметра в формирование методической точности измерительной системы. Полученные результаты позволяют

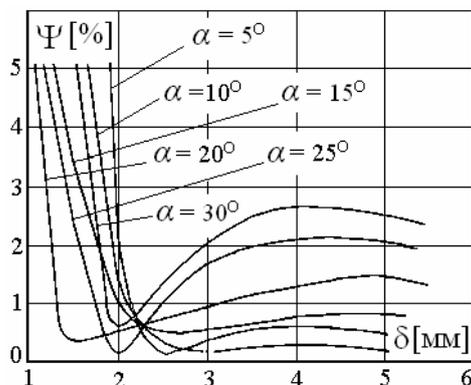


Рис. 4. Методическая приведенная погрешность определения информационного параметра в системе ОЭП-ВТП

сделать вывод о том, что основными факторами, влияющими на точность формирования информационного параметра в системе ОЭП-ВТП, являются нестабильность установочного зазора  $\delta$  и угловое положение  $\alpha$  торца лопатки.

#### Список литературы

1. А. с. 1450531 СССР. Способ определения деформаций лопаток вращающегося колеса турбомашин и устройство для его осуществления / В. А. Медников, А. И. Данилин (СССР). Оpubл. Бюл. № 33, 1998 г.
2. А. с. 1332258 СССР. Компаратор / В. А. Медников, А. И. Данилин, В. А. Антропов (СССР). Оpubл. Бюл. № 31, 1987 г.
3. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. - 279 с.
4. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1975. - 119 с.
5. Тихомиров В. Б. Математические методы планирования эксперимента при изучении нетканых материалов. М.: Легкая индустрия, 1968. - 155 с.
6. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. - 262 с.
7. Данилин А. И., Макарычев Ю. И., Медников В. А. Выбор и оценка влияния факторов, определяющих передаточную характеристику электромагнитных первичных преобразователей: Тез. докл. VII областной НТК. Куйбышев, 1985. С. 109.
8. Соболев В. С., Шкарлет Ю. М. Накладные и экранные датчики. М.: Наука, 1967. - 139 с.

## METODICAL ERROR OF THE OPTICAL-ELECTRONIC DISCRETE-PHASE METHOD OF TURBOMACHINE BLADES DEFORMATION MEASUREMENT

© 2004 A. I. Danilin

Samara State Aerospace University

The article describes one of the variants to determine methodical error of the optical-electronic discrete-phase method of turbomachine blade deformation measurement with the aid of regressive mathematical models based on the factor experiment planning theory. The process of obtaining interpolation polynomials for the description of methodical error is considered. Graphs of methodical error as a function of variations of the factors that influence it are given. Optimal parameters of the measuring system which make it possible to minimize the methodical error in measuring turbomachine blade deformations are shown to exist.