

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 004.63

СИНТЕЗ ОБРАТНОГО ФИЛЬТРА ПО МИНИМУМУ КВАДРАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ РАССОГЛАСОВАНИЯ ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ ТРАКТА «ПРЯМОЙ – ОБРАТНЫЙ ФИЛЬТР»*

В.И. Батищев, И.И. Волков, А.Г. Золин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Е-майл: zolin.a.g@gmail.com

Аннотация. На основе анализа известных подходов к синтезу оптимальных алгоритмов реконструкции сигналов, предполагающих использование регуляризирующих процедур при решении некорректных обратных задач, и связанных с этим вычислительных проблем предложен метод построения цифровых фильтров для решения обратных задач восстановления сигналов, временных рядов и изображений с использованием аппроксимационного подхода. Предложен метод построения модели весовой функции обратного фильтра на основе критерия минимума квадратической погрешности рассогласования весовой функции тракта «прямой – обратный фильтр». Сформулирована постановка задачи восстановления смазанных и расфокусированных изображений в космических системах дистанционного зондирования Земли, показана возможность снижения объема вычислений при обработке двумерных массивов данных путем перехода к решению одномерной задачи. Наряду с общим подходом к синтезу обратного фильтра представлен вариант алгоритма с учетом ряда ограничений, налагаемых на весовую функцию обратного фильтра. На основе рассмотренного метода предложен подход к решению задачи восстановления смазанных изображений с известной функцией рассеяния точки. Проведена апробация алгоритмов на модельных примерах и при обработке реальных изображений, полученных при дистанционном зондировании Земли. Для количественной оценки качества восстановления использовалась относительная среднеквадратическая мера различия эталонного и восстановленного сигналов (изображений). Приведенные результаты апробации показывают, что использование данного подхода позволяет уменьшить погрешность восстановления, что дает преимущество при решении задач аппроксимации и восстановления данных.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 18-08-253а, 16-08-00252а).

Виталий Иванович Батищев (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Информационные технологии».

Игорь Иванович Волков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».

Алексей Георгиевич Золин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».

Ключевые слова: КИХ-фильтр, весовая функция, обратный фильтр, реконструкция смазанных изображений.

Введение

В настоящее время при решении задач обработки и интерпретации экспериментальных данных часто возникает необходимость рассмотрения обратной задачи, заключающейся в восстановлении неизвестного входного воздействия по результатам регистрации откликов на выходе средств измерения. В большинстве случаев это задача компенсации искажающего действия аппаратной функции, обеспечивающая улучшение разрешающей способности различного рода измерительных приборов и систем [1, 2]. В случае, когда для обработки доступна только часть искаженного сигнала, без начальных условий, задача становится недоопределенной и, соответственно, некорректной [3, 4].

Примером таких задач являются задачи восстановления смазанных и расфокусированных изображений [5, 6, 7]. Так, в современных космических системах дистанционного зондирования Земли (КСДЗЗ) изображение формируется с помощью устройств с зарядовой связью, работающих в режиме временной задержки и накопления оптического сигнала. Для правильной работы таких приборов необходимо, чтобы скорость космического аппарата была точно согласована с периодом опроса светочувствительной матрицы. На практике такое равенство может нарушаться из-за ошибки вычисления скорости спутника [8]. В результате изображение подстилающей поверхности оказывается смазанным вдоль траектории движения летательного аппарата. Конструктивные особенности светочувствительных элементов позволяют получить параметры функции рассеяния точки. Способы определения параметров смаза представлены в [9, 10]. Полученные в результате несоответствия скоростей искажения имеют одну пространственную составляющую, что позволяет перейти от двумерной задачи к одномерной и существенно снизить объем вычисляемых данных. Решение двумерной задачи восстановления смазанного изображения представлено, например, в [11].

Постановка задачи

Каждая строка полученного с помощью КСДЗЗ смазанного изображения может быть представлена как свертка значений строки исходного изображения $x(m)$ с известной функцией рассеяния точки h_0

$$x_{CM}(m) = \sum_{i=0}^{N_0-1} h_0(i)x(m-i), \quad (1)$$

здесь N_0 – величина весовой функции фильтра – представляет собой величину смаза. Значение h_0 для всех строк одинаково.

Задача реконструкции полученного с помощью (1) изображения сводится к нахождению функции $x'(m)$, в некотором роде близкой к $x(m)$, по имеющимся значениям $x_{CM}(m)$. Отсутствие начальных значений $x_{CM}(m)$ переводит данную задачу в класс обратных некорректно поставленных.

Существующие в настоящее время известные подходы к синтезу оптимальных алгоритмов реконструкции изображений либо требуют для своей реализации априорной информации, которая не всегда доступна, либо сталкиваются с вычислительными проблемами, связанными с некорректностью обратных задач и необходимостью использования регуляризующих процедур [12, 13].

В данной статье рассматривается подход, основанный на построении модели

весовой функции обратного (восстанавливающего) фильтра (рис. 1).

Построение аппроксимационных моделей на базе стохастических функций при решении задач восстановления сигналов и изображений описано в [14].

В представляемом подходе в качестве критерия адекватности модели используется минимум квадратической погрешности рассогласования весовой функции тракта «прямой – обратный фильтр». Синтез обратных КИХ-фильтров на основе критерия моментов представлен в [15].

Решением задачи восстановления изображения будем считать нахождение функции $h()$, представляющей собой весовую функцию обратного фильтра, позволяющего получить с помощью операции свертки оценку восстановленного изображения $x'(m)$:

$$x'(m) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)x_{CM}(m-i). \quad (2)$$

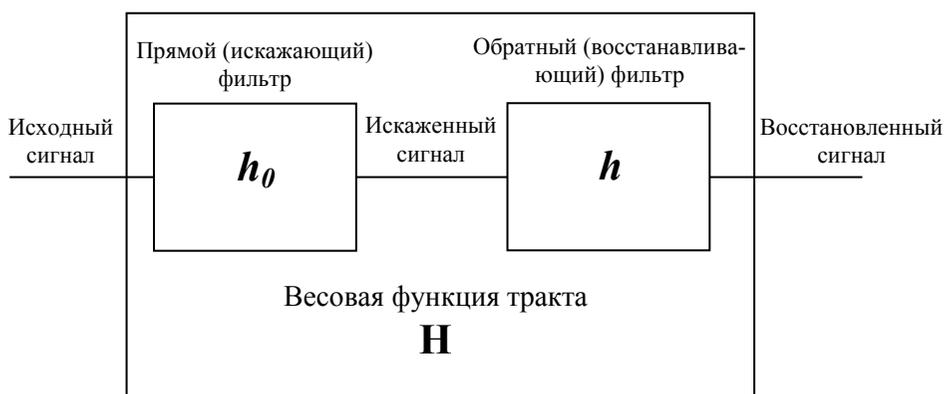


Рис. 1. Тракт «прямой – обратный фильтр»

Рассмотрим случай, когда прямой и обратный фильтры являются КИХ-фильтрами. Весовыми функциями этих фильтров, соответственно, будут $h_0(i)$, $i=0, \dots, N_0-1$ и $h(i)$, $i=0, \dots, N-1$.

Тогда весовая функция тракта «прямой – обратный фильтр» будет равна

$$H(i) = \sum_{v=0}^i h_0(v)h(i-v), \quad (3)$$

$$i = 0, \dots, N + N_0 - 2$$

В идеальном случае должно быть выполнено условие

$$H(i) = \delta(i) \quad (4)$$

$$i = 0, \dots, N + N_0 - 2$$

где $\delta(i)$ – символ Кронекера.

Это условие принципиально выполнено быть не может, потому что обратный фильтр должен быть БИХ-фильтром. Поэтому всегда будет иметь место погрешность, квадратичное значение которой будет равно

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^{N+N_0-1} (H(i) - \delta(i))^2 = (H(0) - 1)^2 + \sum_{i=1}^{N+N_0-1} H(i)^2. \quad (5)$$

При заданном прямом фильтре оно будет зависеть от весовой функции $h(i)$ обратного фильтра и от N .

Связь погрешности восстановления сигнала с квадратичной погрешностью

Неискаженный сигнал $x(m)$ и его восстановленное значение $x'(m)$ связаны между собой соотношением

$$x'(m) = \sum_{i=0}^{N+N_0-2} H(i)x(m-i). \quad (6)$$

Погрешность восстановления равна

$$\mu(m) = x'(m) - x(m),$$

или с учетом (6)

$$\begin{aligned} \mu(m) &= \sum_{i=0}^{N+N_0-2} H(i)x(m-i) - x(m) = \\ &= \sum_{i=1}^{N+N_0-2} H(i)x(m-i) + (H(0) - 1)x(m) = \\ &= \sum_{i=0}^{N+N_0-2} \Psi_i x(m-i) \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\Psi_i = \begin{cases} H(0) - 1 & \text{при } i = 0 \\ H(i) & \text{при } i \geq 1 \end{cases}.$$

В соответствии с неравенством Коши – Буняковского из (7) находим, что

$$\mu^2(m) \leq \sum_{i=0}^{N+N_0-2} \Psi^2(i) \cdot \sum_{i=0}^{N+N_0-2} x^2(m-i),$$

или

$$\mu^2(m) \leq \left((H(0) - 1)^2 + \sum_{i=1}^{N+N_0-2} H^2(i) \right) \sum_{i=0}^{N+N_0-2} x^2(m-i).$$

Принимая во внимание (5), получим

$$\mu^2(m) \leq \varepsilon \sum_{i=0}^{N+N_0-2} x^2(m-i). \quad (8)$$

Отсюда следует, что значение ε должно быть как можно меньшим.

Синтез обратного фильтра по минимуму квадратичной погрешности

Найдем решение данной задачи в частотной области.

Введем в рассмотрение частотные характеристики фильтров

$$\left\{ \begin{array}{l} W_0(j\omega) = \sum_{i=0}^{N_0-1} h_0(i) \exp(-ji\omega\Delta) \\ W(j\omega) = \sum_{i=0}^{N_0-1} h(i) \exp(-ji\omega\Delta) \\ H(j\omega) = \sum_{i=0}^{N+N_0-2} H(i) \exp(-ji\omega\Delta) = W_0(j\omega)W(j\omega) \end{array} \right. \quad (9)$$

С учетом этих соотношений квадратичная погрешность (5) примет вид

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{\Delta}}^{\frac{\pi}{\Delta}} (W(j\omega)W_0(-j\omega) - 1)(W(-j\omega)W_0(j\omega) - 1) d\omega \quad (10)$$

Для обеспечения минимума этой погрешности значения весовой функции обратного фильтра должны исходить из условия

$$\frac{d\varepsilon}{dh(k)} = 0, k = 0, \dots, N-1. \quad (11)$$

Из (8) с учетом (9) находим

$$\frac{d\varepsilon}{dh(k)} = 2 \left(\sum_{v=0}^{N-1} h(v) \frac{\Delta}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{\Delta}}^{\frac{\pi}{\Delta}} |W_0(j\omega)|^2 \cos((k-v)\omega\Delta) d\omega - \frac{\Delta}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{\Delta}}^{\frac{\pi}{\Delta}} W_0(j\omega) \exp(-jk\omega\Delta) d\omega \right) \quad (12)$$

С учетом этого соотношения из (10) находим, что

$$\varepsilon_{\min} = 1 - H(0). \quad (13)$$

Справедливы соотношения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{\Delta}}^{\frac{\pi}{\Delta}} |W_0(j\omega)|^2 \cos(k\omega\Delta) d\omega = \sum_{v=k}^{N_0-1} h_0(v)h_0(v-k) \\ \frac{\Delta}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{\Delta}}^{\frac{\pi}{\Delta}} W_0(j\omega) \exp(-jk\omega\Delta) d\omega = h_0(-k) \end{array} \right.$$

С учетом этих соотношений формула (12) примет вид

$$\frac{d\varepsilon}{dh(k)} = 2 \left(\sum_{v=0}^{N-1} h(v) E_0(|k-v|) - h_0(-k) \right),$$

где

$$E_0(k) = \sum_{v=k}^{N_0-1} h_0(v)h_0(v-k), k = 0, \dots, N_0-1. \quad (14)$$

В итоге для определения значений $h(k)$ необходимо решить систему уравнений:

$$\sum_{v=0}^{N-1} h(v)E_0(|k-v|) = h_0(-k), k = 0, \dots, N-1. \quad (15)$$

Алгоритм решения этой системы уравнений таков:

$$\left\{ \begin{array}{l} g(0,0) = 1 \\ \Psi(0) = E_0(0) \\ g(k,0) = -\frac{1}{\Psi(k-1)} \sum_{p=1}^k g(k-1, p-1)E_0(p), k = 1, \dots, N_0 - 2 \\ g(k,0) = -\frac{1}{\Psi(k-1)} \sum_{p=1}^{N_0-1} g(k-1, p-1)E_0(p), k = N_0 - 1, \dots, N-1 \\ g(k, v) = g(k-1, v-1) + g(k-1, k-1-v)g(k,0), v = 1, \dots, k-1 \\ g(k, k) = 1 \\ \Psi(k) = \Psi(k-1)(1 - g^2(k,0)), k = 1, \dots, N-1 \end{array} \right. \quad (16)$$

$$h(k) = h_0(0) \sum_{q=k}^{N-1} \frac{g(q,k)g(q,0)}{\Psi(q)}, k = 0, \dots, N-1 \quad (17)$$

Вычисляя значение минимальной погрешности из (3), имеем:

$$H(0) = h(0)h_0(0).$$

Подставив сюда $h(0)$ из (17), получаем:

$$H(0) = h_0^2(0) \sum_{q=0}^{N-1} \frac{g^2(q,0)}{\Psi(q)}.$$

Тогда в соответствии с (13) минимальное значение погрешности будет равно

$$\varepsilon_{\min} = 1 - h_0^2(0) \sum_{q=0}^{N-1} \frac{g^2(q,0)}{\Psi(q)}. \quad (18)$$

Для справки приведем еще такие формулы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=0}^{N+N_0-2} H^2(k) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} h(i)h(j)E_0(|i-j|) \\ d \sum_{k=0}^{N+N_0-2} H^2(k) \\ \frac{\quad}{dh(v)} = 2 \sum_{j=0}^{N-1} h(j)E_0(|v-j|) \\ \varepsilon = 1 - 2H(0) + \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} h(i)h(j)E_0(|i-j|) \end{array} \right. \quad (19)$$

Синтез обратного фильтра по минимуму квадратичной погрешности при внесении ряда ограничений, наложенных на его весовую функцию

Исходя из принципов физической реализуемости весовая функция синтезируемого фильтра должна удовлетворять условиям

$$\sum_{i=0}^{N-1} \beta(i, \nu) h(i) = \alpha(\nu), \nu = 0, \dots, p. \quad (20)$$

Так как функции $H(i)$ и $h(i)$ однозначно взаимосвязаны, то условия, наложенные на функцию $H(i)$, могут быть сведены к условиям, наложенным на $h(i)$. Например, если функция $H(i)$ должна удовлетворять условиям

$$\sum_{i=0}^{N+N_0-2} \gamma(i, \nu) H(i) = \alpha(\nu), \nu = 0, \dots, p, \quad (21)$$

то эти условия могут быть записаны в виде (20), где

$$\beta(i, \nu) = \sum_{k=0}^{N_0-1} h_0(k) \gamma(i+k, \nu), \nu = 0, \dots, p. \quad (22)$$

Задачу синтеза обратного фильтра по минимуму квадратичной погрешности с учетом ограничений физической реализуемости, наложенных на его весовую функцию, будем решать методом Лагранжа. Для этого рассмотрим функцию

$$f(h(0), \dots, h(N-1)) = \varepsilon + 2 \sum_{\nu=0}^p A_\nu \sum_{i=0}^{N-1} \beta(i, \nu) h(i),$$

где A_ν – коэффициенты Лагранжа.

Значения $h(i)$ будем определять из условий минимума функции $f(h(0), \dots, h(N-1))$:

$$\frac{df(h(0), \dots, h(N-1))}{dh(k)} = 0, k = 0, \dots, N-1.$$

В результате на основании рассмотренных ранее выводов для обеспечения этих условий получим следующую систему уравнений:

$$\sum_{i=0}^{N-1} h(i) E_0(|k-i|) = h_0(-k) - \sum_{\nu=0}^p A_\nu \beta(k, \nu), k = 0, \dots, N-1.$$

Решив ее, получим

$$h(i) = \sum_{q=i}^{N-1} \frac{g(q, i)}{\Psi(q)} \left(g(q, 0) h_0(0) - \sum_{k=0}^p A_k D(q, k) \right). \quad (23)$$

Здесь

$$D(q, k) = \sum_{\nu=0}^q g(q, \nu) \beta(\nu, k); \quad (24)$$

$g(q, k)$, $\Psi(q)$ – рассмотренные ранее величины.

Подставив $h(i)$ из (23) в (20), получим следующую систему уравнений для определения значений коэффициентов Лагранжа:

$$\sum_{k=0}^p A_k \sum_{q=0}^{N-1} \frac{D(q,v)D(q,k)}{\Psi(q)} = \sum_{q=0}^{N-1} \frac{D(q,v)}{\Psi(q)} g(q,0)h_0(0) - \alpha(v), v=0, \dots, p.$$

Для простоты дальнейших выкладок введем обозначения:

$$\begin{aligned} f(v,k) &= \sum_{q=0}^{N-1} \frac{D(q,v)D(q,k)}{\Psi(q)} \\ F(v) &= \sum_{q=0}^{N-1} \frac{D(q,v)}{\Psi(q)} g(q,0)h_0(0) - \alpha(v) \end{aligned} \quad (25)$$

В этом случае система уравнений примет вид

$$\sum_{k=0}^p A_k f(v,k) = F(v). \quad (26)$$

Алгоритм решения этой системы уравнений будет таким. Сначала по формулам (24) и (25) определим значения $f(v,k)$, $v=0, \dots, p$; $k=0, \dots, v$ и $F(v)$, $v=0, \dots, p$. Затем выполним вычисления по формулам:

$$\begin{cases} E(v,k) = f(v,k) - \sum_{q=0}^{k-1} C(k,q)E(v,q) \\ C(v,k) = \frac{E(v,k)}{E(k,k)} \\ k = 0, \dots, v; v = 0, \dots, p \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} \gamma(v) = F(v) - \sum_{k=0}^{v-1} C(v,k)\gamma(k) \\ v = 0, \dots, p \end{cases}$$

$$A_k = \frac{\gamma(k)}{E(k,k)} - \sum_{v=k+1}^p A_v C(v,k), k = p, \dots, 0$$

Подставив найденные значения A_k в (23), получим искомые значения весовой функции обратного фильтра. Далее по формуле (2) получим значение восстановленного изображения $x'(m)$.

Апробация результатов

Для апробации алгоритма было взято изображение, полученное в процессе дистанционного зондирования Земли. Благодаря конструктивным особенностям регистрирующего аппаратуры изображение имеет 1024 градации серого, что в 4 раза выше значений, принятых в распространенных форматах хранения графических файлов на персональных компьютерах. Из тестового изображения был взят тестовый фрагмент 480 на 285 пикселей, над которым и проводились эксперименты (рис. 2, а).

Каждая строка тестового изображения была обработана фильтром (1) с весовой функцией:

$$h_0 = \frac{1}{N_0}.$$

Таким образом, был выполнен смаз изображения вдоль горизонтальной оси на различное количество пикселей $N_0 = 3, 4, 5, \dots, 10$. Пример полученного смазанного изображения приведен на рис. 2, б.



Рис. 2. Эталонное изображение



Рис. 3. Изображение, смазанное на 10 пикселей

Далее были предприняты попытки восстановления по алгоритмам (16) и (27). Для количественной оценки качества восстановления использовалась относительная среднеквадратическая погрешность (ОСП), вычисляемая по формуле

$$ОСП = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{M-1} (x'(j) - x(j))^2}{\sum_{j=0}^{M-1} x(j)^2}}, \quad (28)$$

где $x(j)$ – значение пикселя строки эталонного изображения;
 $x'(j)$ – значение пикселя строки восстановленного изображения;
 M – количество пикселей в строке.

Данный способ оценки возможен благодаря наличию и эталонного, и восстановленного изображения. Полученная величина показывает степень отклонения результата от исходного изображения. Другие способы оценки качества восстановления изображений приведены, например, в [16].

Значения ОСП смазанных изображений без восстановления приведены в табл. 1.

Таблица 1

ОСП невосстановленных изображений

N_0	3	4	5	6	7	8	9	10
ОСП	0,0505	0,0565	0,0672	0,0743	0,0833	0,0913	0,0974	0,1041

Восстановление изображений по алгоритму (16) и (17) без наложенных ограничений. Анализ формул (14) – (19) показывает, что результат восстановления зависит от значений весовых функций прямого и обратного фильтров: N и N_0 . Некоторые значения погрешности восстановления приведены в табл. 2.

Результаты восстановления по алгоритму (16), 17)

N_0	N	ОСП	N_0	N	ОСП	N_0	N	ОСП
3	3	0,044	5	5	0,0617	7	7	0,062
3	5	0,043	5	9	0,0494	7	13	0,056
3	7	0,043	5	13	0,0602	7	19	0,060
4	4	0,061	6	6	0,0593	8	8	0,075
4	7	0,053	6	11	0,0543	8	15	0,066
4	10	0,060	6	16	0,0539	8	22	0,077

Графики зависимости ОСП от N_0 показаны на рис. 4. При увеличении длины весовой функции обратного фильтра N процесс восстановления становится более неустойчивым (рис. 5), что не позволяет значительно увеличивать N .

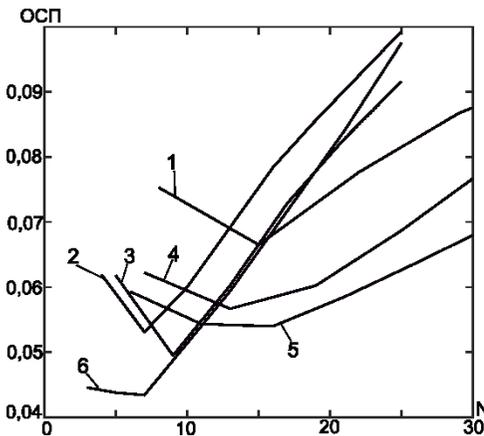


Рис. 4. Зависимость ОСП от N_0 и N :
1 – значение ОСП при $N_0 = 8$; 2 – значение ОСП при $N_0 = 4$; 3 – значение ОСП при $N_0 = 5$; 4 – значение ОСП при $N_0 = 7$; 5 – значение ОСП при $N_0 = 6$; 6 – значение ОСП при $N_0 = 3$

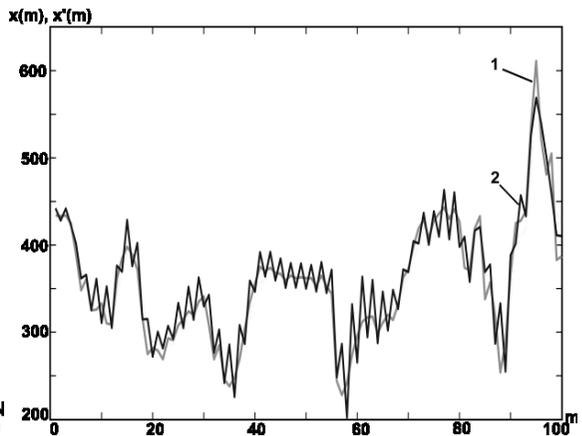


Рис. 5. Фрагмент строки эталонного и восстановленного изображений при $N_0 = 3$:
 $x(m)$, $x'(m)$ – значения пикселей; m – номер пикселя;
1 – восстановленное изображение при $N = 13$;
2 – эталонное изображение

Восстановление изображений по алгоритму (27) с наложенными ограничениями. Для выполнения условий (21) и (22) были выбраны следующие соотношения:

$$H(0) = h(0)h_0(0) = 1;$$

$$\sum_{i=0}^{N+N_0-1} H(i)i^v = \delta(v), v = 0, \dots, p-1;$$

$$\beta(i, v) = \sum_{k=0}^{N_0-1} h_0(k)(i+k)^v.$$

Анализ алгоритма построения весовой функции обратного фильтра (20) – (27) показывает, что результат восстановления зависит от значений весовых функций прямого и обратного фильтров: N и N_0 , а также p из (22). При проведении экспериментов с различными значениями N_0 , N и p наименьшие значения ОСП получались при $N = 2 * p - 1$. Зависимость ОСП от значений N и p показана на рис. 6.

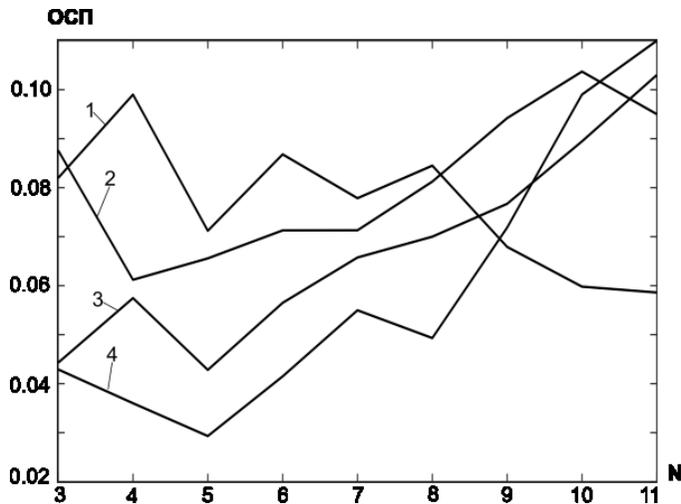


Рис. 6. Зависимость ОСП от N :
 1 – $N_0 = 6$; 2 – $N_0 = 5$; 3 – $N_0 = 4$; 4 – $N_0 = 3$

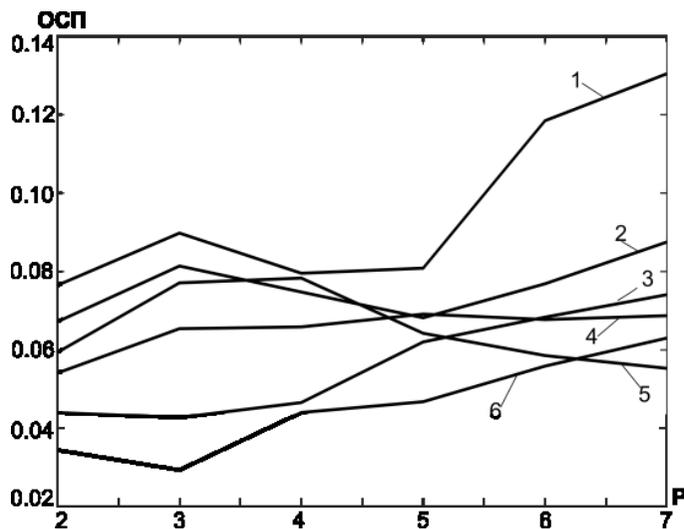


Рис. 7. Зависимость ОСП от порядка модели с различными N_0 :
 1 – $N_0 = 8$; 2 – $N_0 = 5$; 3 – $N_0 = 4$; 4 – $N_0 = 7$; 5 – $N_0 = 6$; 6 – $N_0 = 3$

Некоторые полученные результаты представлены в табл. 3.

Результаты восстановления по алгоритму (27)

N_0	P	ОСП	N_0	P	ОСП	N_0	P	ОСП
3	2	0,034	5	2	0,044	7	2	0,055
3	3	0,044	5	3	0,046	7	3	0,068
3	4	0,054	5	4	0,065	7	4	0,067
4	2	0,029	6	2	0,046	8	2	0,063
4	3	0,042	6	3	0,062	8	3	0,074
4	4	0,065	6	4	0,069	8	4	0,068

Выводы

На основе анализа известных подходов к синтезу оптимальных алгоритмов реконструкции сигналов, основанных на использовании регуляризующих процедур при решении некорректных обратных задач, и связанных с этим вычислительных проблем предложен метод построения цифровых фильтров для решения обратных задач восстановления сигналов, временных рядов и изображений с использованием аппроксимационного подхода.

Сформулирована постановка задачи восстановления смазанных и расфокусированных изображений в космических системах дистанционного зондирования Земли, показана возможность снижения объема вычислений при обработке двумерных массивов данных путем перехода к решению одномерной задачи.

Разработаны и исследованы алгоритмы синтеза обратного фильтра для восстановления сигналов с известной весовой функцией прямого фильтра на основе критерия минимума квадратической погрешности рассогласования весовой функции всего тракта «прямой – обратный фильтр» для реконструкции смазанных изображений.

Проведена апробация алгоритмов на модельных примерах и при обработке реальных изображений, полученных при дистанционном зондировании Земли. Для количественной оценки качества восстановления использовалась относительная среднеквадратическая мера различия эталонного и восстановленного сигналов (изображений). Приведенные результаты апробации (табл. 1, 2, 3) показывают, что использование данного подхода позволяет уменьшить погрешность восстановления и аппроксимации, что дает преимущество при решении задач аппроксимации и восстановления данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клебанов Я.М., Карсаков А.В., Хонина С.Н., Давыдов А.Н., Поляков К.А. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41. – № 1. – С. 30–36.
2. Tokovinin A. DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image / A. Tokovinin, S. Heathcote // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2006. – Vol. 118(846). – Pp. 1165–1175.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979.
4. Engl H.W., Hanke M., Neubauer A. Regularization of Inverse Problems. – Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1996. 322 p.
5. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
6. Сизиков В.С., Римских М.В., Мирджамолов Р.К. Реконструкция смазанных и зашумленных изображений без использования граничных условий // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. –

- № 5. – С. 38–46.
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений: 3-е изд., испр. и доп. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
 8. Кузнецов П.К., Семавин В.И., Солодуха А.А. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – Вып. 37. – С. 150–157.
 9. Егошкин Н.А., Еремеев В.В. Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения земли // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – № 4. – С. 28–32.
 10. Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Мятлов Г.Н., Юдаков А.А. Методика вычисления оценок параметров смаза изображений, получаемых целевой аппаратурой КАН типа «Ресурс» // 7-я Международная научно-техническая конференция «К.Э. Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2017. – С. 344–350.
 11. Волков И.И., Золин А.Г. Решение двумерной обратной задачи восстановления смазанного изображения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – Вып. 39. – С. 223–226.
 12. Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Синтез фильтров для восстановления смазанных изображений с использованием методов регуляризации // Проблемы управления и моделирования в сложных системах (ПУМСС-2013): Труды XV Международной конференции, ИПУСС РАН. – Самара, 2013. – С. 615–618.
 13. Батищев В.И., Золин А.Г., Косарев Д.Н., Романеев А.Е. Аппроксимационный подход к решению обратных задач анализа и интерпретации экспериментальных данных // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2006. – Вып. 40. – С. 57–65.
 14. Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Использование стохастического базиса в задачах восстановления сигналов и изображений // Автометрия. – 2017. – № 4. – С. 127–134.
 15. Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Синтез цифровых КИХ-фильтров для решения задач восстановления сигналов с использованием критерия моментов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – Вып. 36. – С. 98–105.
 16. Avcibas I., Sankur B., Sayood K. Statistical evaluating of image quality measures // Journal of Electronic Imaging. – April 2002. – Vol. 11, № 2. – Pp. 206–223.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2018 г.

SYNTHESIS OF THE REVERSE FILTER ON THE CRITERION OF MINIMUM QUADRATIC ERROR OF THE WEIGHT FUNCTION MISMATCH OF THE PATH «DIRECT – REVERSE FILTER»

V.I. Batishchev, I.I. Volkov, A.G. Zolin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *Based on the analysis of known approaches for the synthesis of optimal signal reconstruction algorithms, involving the use of regularizing procedures in solving incorrect inverse problems, and related computational problems, a method for constructing digital filters for solving inverse problems of signal recovery, time series and images using the approximation approach. A method for developing a model of the weight function of the inverse filter, based on the criterion of the minimum quadratic error of the weight function mismatch of the path "direct - inverse filter". The problem of restoration of blurred and defocused images in space systems of remote sensing of the Earth is formulat-*

*Vitaly I. Batishchev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Igor I. Volkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
A.G. Zolin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

ed, the possibility of reducing the amount of calculations in the processing of two-dimensional data sets by moving to the solution of the one-dimensional problem is shown. Along with a General approach for the synthesis of the inverse filter, a variant of the algorithm with a number of restrictions imposed on the weight function of the inverse filter is presented. On the basis of the considered method, an approach to the problem of restoring blurred images with a known point scattering function is proposed. Approbation of algorithms on model examples and at processing of the real images received at remote sensing of the Earth is carried out. To quantify the quality of recovery, a relative mean square measure of the difference between the reference and recovered signals (images) was used. The results of testing show that the use of this approach allows to reduce the error of recovery, which gives an advantage in solving problems of approximation and data recovery.

Keywords: FIR filter, weight function, reverse filter, reconstruction of blurred images.

REFERENCES

1. Klebanov Ya.M., Karsakov A.V., KHonina S.N., Davydov A.N., Polyakov K.A. Kompensatsiya aberratsij volnovoogo fronta v teleskopakh kosmicheskikh apparatov s regulirovkoj temperaturnogo polya teleskopa // *Komp'yuternaya optika*, 2017, tom 41, № 1, S. 30–36.
2. Tokovinin A. DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image / A. Tokovinin, S. Heathcote // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 2006. – Vol. 118(846). – Pp. 1165–1175.
3. Tikhonov A.N., Arsenin V.YA. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach*. – M.: Nauka, 1979.
4. Engl H.W., Hanke M., Neubauer A. *Regularization of Inverse Problems*. – Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1996. 322 p.
5. Vasilenko G.I., Taratorin A.M. *Vosstanovlenie izobrazhenij*. M.: Radio i svyaz'. 1986. 304 s.
6. Sizikov B.C., Rimskikh M.V., Mirdzhamolov R.K. Rekonstruktsiya smazannykh i zashumlennykh izobrazhenij bez ispol'zovaniya granichnykh uslovij // *Opticheskij zhurnal*. 2009. T. 76. № 5. S. 38–46.
7. Gonsales R., Vuds R. *TSifrovaya obrabotka izobrazhenij 3-e izdanie, ispravlennoe i dopolnennoe*. – M.: Tekhnosfera, 2012. – 1104 s.
8. Kuznetsov P.K., Semavin V.I., Solodukha A.A. Algoritm kompensatsii skorosti smaza izobrazheniya podstilyayushhej poverkhnosti, poluchaemogo pri nablyudenii Zemli iz kosmosa // *Vestnik Sam. GTU*, 2005. № 37. S. 150–157
9. Egoshkin N.A., Ereemeev V.V. Korrektsiya smaza izobrazhenij v sistemakh kosmicheskogo nablyudeniya zemli // *TSifrovaya obrabotka signalov*. 2010. № 4, s. 28–32.
10. Kuznetsov P.K., Martem'yanov B.V., Myatov G.N., YUdakov A.A. Metodika vychisleniya otkonok parametrov smaza izobrazhenij, poluchaemykh tselevoj apparaturoj KAN tipa «Resurs» // 7-ya mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «K.EH. TSiolkovskij – 160 let so dnya rozhdeniya. Kosmonavtika. Radioehlektronika. Geoinformatika». God izdaniya: 2017 Ryazan' S. 344–350.
11. Volkov I.I., Zolin A.G. Reshenie dvumernoj obratnoj zadachi vosstanovleniya smazannogo izobrazheniya // *Vestnik SamGTU*, ser. Tekhnicheskie nauki. 2013, vyp. №39, S. 223–226.
12. Batishhev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G. Sintez fil'trov dlya vosstanovleniya smazannykh izobrazhenij s ispol'zovaniem metodov reguljarsizatsii // *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh (PUMSS-2013): Trudy XV Mezhdunarodnoj konferentsii, IPUSS RAN, Samara, 2013, S. 615–618*.
13. Batishhev V.I., Zolin A.G., Kosarev D.N., Romaneev A.E. Approksimatsionnyj podkhod k resheniyu obratnykh zadach analiza i interpretatsii ehksperimental'nykh dannykh // *Vestnik SamGTU*, ser. Tekhnicheskie nauki. 2006, vyp. № 40, S. 57–65.
14. Batishhev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G. Ispol'zovanie stokhasticheskogo bazisa v zadachakh vosstanovleniya signalov i izobrazhenij // *Avtometriya*, 2017, № 4, S. 127–134.
15. Batishhev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G. Sintez tsifrovyykh KIKH-fil'trov dlya resheniya zadach vosstanovleniya signalov s ispol'zovaniem kriteriya momentov // *Vestnik SamGTU*, ser. Tekhnicheskie nauki. 2012, vyp. № 36, S. 98–105.
16. Avcibas I., Sankur B., Sayood K. Statistical evaluating of image quality measures // *Journal of Electronic Imaging*. – April 2002. – Vol. 11, № 2. – Pp. 206–223.

УДК 519.68

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.В. Машков, А.В. Желонкин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Рассматривается задача разработки программного комплекса для проведения статистического анализа измерительной информации. В процессе создания программного комплекса учитывалась вся совокупность требований, предъявляемых как в целом к информационным системам статистического анализа, так и к программным модулям, выполняющим функции сбора, передачи, обработки, хранения и представления измерительной информации. Система апробирована при проведении экспериментальных исследований низкочастотных вибраций автобуса МАЗ-206067 для оценки степени комфорта водителя и пассажиров. Полученные результаты позволили получить пространственный виброакустический портрет автобуса, многократно превосходящий по объему и детализации данные завода-изготовителя.*

Ключевые слова: *многокомпонентный процесс, аналого-стохастическое квантование, знаковый сигнал, программный комплекс, информационная система статистического анализа, модульный подход.*

Диагностика технического состояния объектов требует обработки измерительной информации. При этом особое внимание уделяется созданию информационных систем статистического анализа (ИССА) измерительной информации, в которых часть измерительных операций, связанных с обработкой данных наблюдаемых сигналов, выполняется программным способом. Для реализации широких функциональных возможностей и удовлетворения требованиям, предъявляемым к подобного рода системам, разработан модульный программный комплекс. При разработке модулей были учтены требования, обусловленные необходимостью оценки влияния программного комплекса на метрологические характеристики ИССА и защиты обрабатываемой, в том числе измерительной, информации от непреднамеренных и преднамеренных изменений.

Для осуществления оперативного комплексного статистического анализа разработаны цифровые методы статистических измерений и соответствующие им быстродействующие алгоритмы [1, 2, 3], которые легли в основу программного обеспечения. Эти методы обеспечивают проведение спектрального анализа, вычисление оценок спектральной плотности мощности, моментов корреляционной функции и гармонического анализа на основе бинарного знакового аналого-стохастического квантования [4, 5].

Последовательное прохождение всех стадий и этапов создания ИССА обеспечило выполнение требований, предъявляемых к программному обеспечению (ПО), функционирующему с использованием средств измерений и компонентов

Андрей Валерьевич Машков, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии».

Александр Викторович Желонкин, студент.

измерительных систем, что, в свою очередь, позволяет говорить о разработанном ПО как о метрологически значимом программном обеспечении (МЗПО). В соответствии с [6, 7] необходимо выделять метрологически значимые и незначимые части в МЗПО. Это предоставляет возможность достижения удобства модификации метрологически незначимых частей ИССА (например, пользовательский интерфейс, подпрограммы, библиотеки, процедуры взаимодействия с операционной средой и периферийными устройствами персонального компьютера) без нарушения его соответствия утвержденному ПО и защиты от случайных или непреднамеренных изменений данных, получаемых из метрологически значимых частей ПО [8–15].

Помимо эффективности, особое внимание было уделено качественной организации структуры ПО, логичности и доступности пользовательского интерфейса, а также возможности расширения системы для наращивания дополнительного функционала по мере необходимости. Эти характеристики в той или иной степени определили архитектуру разработанного программного комплекса, представляющую собой многоуровневую организацию системы, в которой каждый уровень выполняет определенную функцию. Для достижения баланса между функциональностью и сложностью структуры ПО были выделены уровни представления и обработки данных. Уровень представления соответствует метрологически незначимой части ПО и отвечает за графическое представление данных и интерфейс взаимодействия с пользователем. А уровень обработки данных соответствует метрологически значимой части ПО и содержит модули реализации алгоритмов. В свою очередь, каждый из этих уровней реализован на разных языках программирования: уровень представления реализован на сильно типизированном объектно-ориентированном языке программирования Java, а уровень обработки – на статически типизированном языке программирования общего назначения C++.

При разработке программного комплекса ИССА была выбрана модульная парадигма организации структуры ПО, которая позволила обеспечить выполнение таких критериев, как гибкость и расширяемость системы, масштабируемость процесса разработки, заменяемость программных компонентов и возможность их повторного использования [16]. Структура программного комплекса ИССА состоит из следующих основных модулей: модуль визуализации измерительных данных (ИД), модуль реализации алгоритмов спектрального анализа (СА) и конвертор обработки данных между пользовательским интерфейсом и модулем реализации алгоритмов. На рис. 1 представлена модель многоуровневой структуры программного комплекса ИССА.

ПК ИССА позволяет работать в двух режимах путем выбора типа источника данных:

1) режим «Загрузка реального сигнала», который позволяет загрузить реальный сигнал из текстового файла или электронной таблицы формата `xlsx`;

2) режим «Модель реализации случайного процесса», который формирует тестовый сигнал для имитации работы ПК с целью исследования возможностей разработанного алгоритма на основе моделирования многокомпонентного случайного процесса и процедуры бинарного знакового аналого-стохастического квантования.

Режим имитационного моделирования позволяет оценить эффективность работы ПК ИССА для анализа определенного класса процессов.

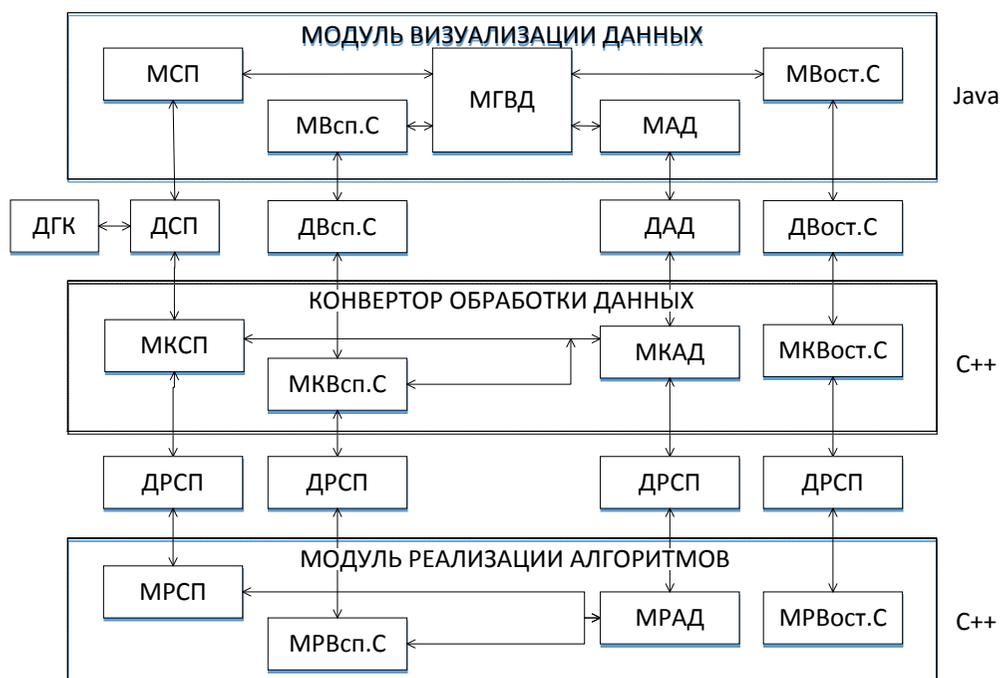


Рис. 1. Модель многоуровневой структуры программного комплекса ИССА

В основе пользовательского интерфейса лежит модуль графической визуализации данных (МГВД), позволяющий отображать полученные результаты обработки сигналов в виде графиков. Данными графической визуализации данных (ДГК) являются следующие переменные:

- тип гармонической компоненты;
- амплитуда;
- частота;
- период;
- фаза.

Модуль многокомпонентного случайного процесса (МКСП) позволяет организовать набор гармонических составляющих для последующей визуализации их сумм или использования в имитации частотного анализа. В качестве данных многокомпонентного случайного процесса (ДСП) выступают следующие переменные:

- нижний предел построения графика;
- верхний предел построения графика;
- шаг построения графика;
- набор гармонических компонент;
- использование постоянной составляющей;
- использование гармонических составляющих;
- значение постоянной составляющей;
- использование шума;
- тип распределения;
- среднее значение распределения;
- отклонение распределения.

Модуль вспомогательного сигнала (МВсп.С) дает пользователю возможность составить список вспомогательных сигналов, которые используются при

выполнении бинарного знакового аналого-стохастического квантования в процессе реализации алгоритмов [17]. В качестве данных вспомогательного сигнала (ДВсп.С) выступают следующие переменные:

- тип сигнала;
- набор гармонических компонент.

Модуль анализа данных (МАД) представляет инструмент частотного анализа полигармонических сигналов в аддитивном шуме на основе бинарного знакового квантования. В качестве данных МАД (ДАД) выступают следующие переменные:

- постоянная составляющая;
- набор гармонических компонент;
- среднее значение распределения;
- отклонение распределения;
- тип алгоритма анализа;
- тип вспомогательного сигнала;
- амплитуда вспомогательного сигнала;
- период вспомогательного сигнала;
- фаза вспомогательного сигнала;
- время проводимого анализа;
- интервал опроса проводимого анализа;
- нижний предел частоты;
- верхний предел частоты;
- максимальная частота;
- количество возвращаемых знакочередований.

Модуль восстановления сигнала (МВост.С) позволяет восстановить гармонические составляющие сигнала после проведения частотного анализа.

Модули многокомпонентного случайного процесса, вспомогательного сигнала, анализа данных и восстановления сигнала связаны со своей реализацией через блок модулей конвертирования данных между языками программирования Java и C++, реализованный на C++. Использование связующего модуля позволяет заменить его при необходимости в дальнейшем для использования под другим графическим интерфейсом или без него.

Как было сказано выше, необходимость реализации модулей визуализации данных и алгоритмов на разных языках программирования вызвана разделением МЗПО на метрологически значимые и незначимые части. Язык Java позволяет создавать модульные программы, исходный код которых может использоваться повторно, имея в своем арсенале разнообразные компоненты отображения данных и пользовательского интерфейса. Метрологически значимые части реализованы в модулях МЗПО, которые выполняют функции обработки, хранения и передачи данных и результатов СА на языке C++, позволившем применить подход многопоточного программирования для повышения производительности обработки данных.

Программное обеспечение приложения, реализующего алгоритмы вычисления спектральных оценок, реализованы на языке C++ в среде разработки Visual Studio 2017 с использованием библиотеки xInt для чтения электронных таблиц формата xlsx, а также механизма Java Native Interface (JNI) для запуска кода под управлением виртуальной машины Java (JVM), который написан на языке C++. Для большей гибкости код, реализующий алгоритмы, разделен на две части:

Core – модуль с реализацией алгоритмов и JavaBridge – модуль преобразования java-объектов в стандартные типы данных языка C++.

Наличие различных функциональных компонентов ПО обусловило разграничение интерфейса МЗПО на интерфейс пользователя и программный интерфейс (ПИ). При проектировании пользовательского интерфейса особое внимание уделено вопросам пространственной распределенности информации – это своего рода качественный признак, определяющий, насколько грамотно спроектированы структура ПО и дружественный пользователю интерфейс. В свою очередь, правильно логически организованная информация обеспечивает удобную и единообразную навигацию как в пределах одного окна, так и в целом по множеству окон и вкладок.

Пользовательский интерфейс системы реализован на языке Java в среде разработки IntelliJ IDEA 2017.1.4 на основе технологии JavaFX. Для удобства все элементы представления вынесены в fxml-разметку, а обработка событий – в контроллеры. Элементы пользовательского интерфейса и схема алгоритма работы программного комплекса ИССА представлены на рис. 2.

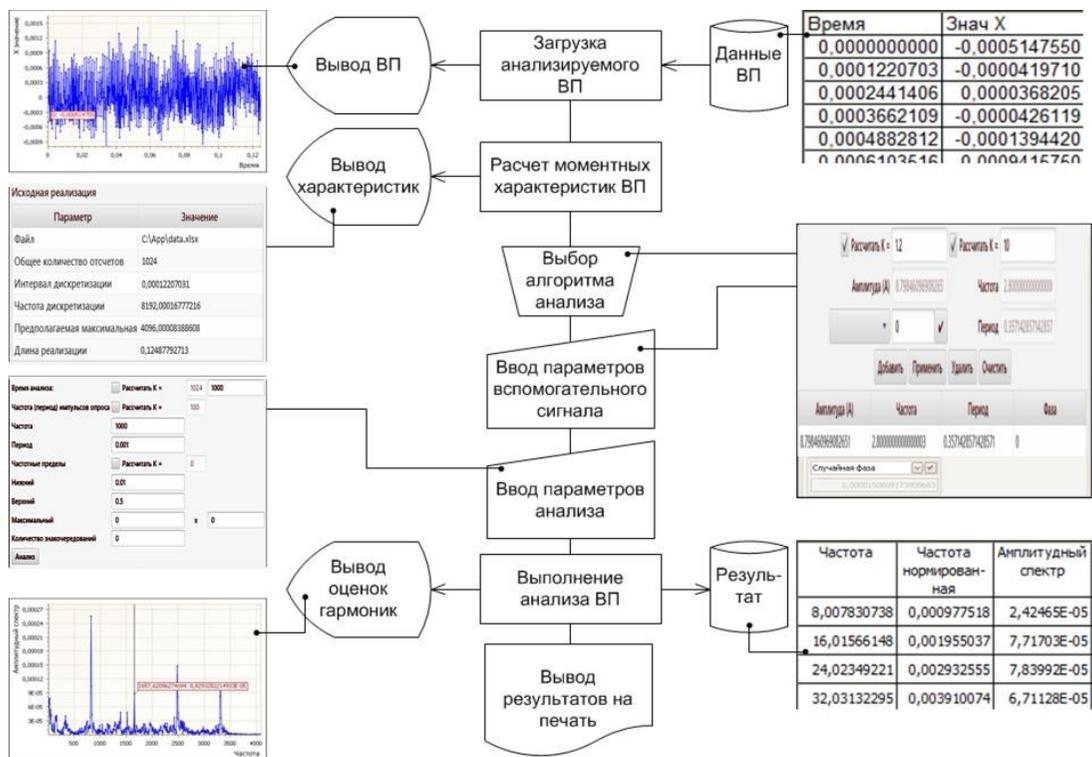


Рис. 2. Пользовательский интерфейс. Схема алгоритма работы программного комплекса ИССА

На начальном этапе работы производится загрузка компонентов анализируемого многокомпонентного случайного сигнала в приложение с возможностью его визуального отображения в виде настраиваемого графика. Далее происходит автоматический пересчет моментных характеристик сигнала с последующим выводом в виде таблицы.

Для проведения анализа многокомпонентного случайного сигнала необходимо выбрать алгоритм анализа, ввести параметры вспомогательного сигнала или использовать автоматически подсчитанные значения. Далее производится ввод параметров производимого анализа, таких как время анализа, интервал опроса, частотные пределы – верхняя граница частоты в спектре и т. д. Затем проходит непосредственно сам анализ многокомпонентного случайного сигнала по выбранному алгоритму. По результатам анализа появляется возможность представить в виде графика такие данные, как амплитудный спектр, амплитудный спектр в децибелах, фазовый спектр и их нормированные величины.

На форме «Сигнал» осуществляются формирование пользователем модели сигнала и инициализация процедуры первичного формирования и накопления массивов цифровых данных наблюдения вибрационных процессов с использованием бинарного знакового аналого-стохастического квантования. Активация позиции «Гармоническая составляющая» позволяет включить/отключить расчет добавленных ниже гармонических компонентов. Кнопки «Добавить», «Применить», «Удалить» и «Очистить», соответственно, добавляют заполненный сигнал в таблицу к вычислениям, применяют введенные данные к выделенному компоненту, удаляют выбранный компонент и очищают таблицу. Активация позиции «Шум» позволяет включить/отключить наличие шума в сигнале. Ниже заполняются среднее значение, дисперсия или среднее квадратичное отклонение, которые между собой пересчитываются, и отклонение. Внизу вкладки задаются границы расчета и шаг аргумента.

С правой стороны расположен модуль отображения графика. Есть возможность выбирать область подробного просмотра с помощью двойного ползунка, выбирать таблицу рассчитанных данных, просматривать вычисленные значения.

На форме «Вспомогательные сигналы» устанавливаются параметры вспомогательных случайных сигналов. Они имеют равномерное распределение в пределах изменения контролируемых процессов и играют роль стохастического порога квантования.

Форма «Анализ», на которой есть возможность задать параметры для выполнения спектрального оценивания, используется для вычисления спектральных оценок в реальном масштабе времени. На этой же форме расположен модуль визуального отображения графической информации. При этом имеется возможность выбора частотного диапазона для детального просмотра спектральных оценок с помощью двойного ползунка. Также выводится таблица численных значений результатов вычислений [18–20].

В реальных условиях работы программный комплекс ИССА был апробирован при проведении экспериментальных исследований низкочастотных вибраций автобуса МАЗ-206067, предназначенного для перевозки пассажиров на городских и пригородных маршрутах средней загруженности [21–24]. Спектральный анализ вибрации проводился в целях оценки степени комфорта водителя и пассажиров и позволил получить пространственный виброакустический портрет автобуса, многократно превосходящий по объему и детализации данные завода-изготовителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Якимов В.Н. Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. – № (7). – С. 1346–1353. 30 ист. ISSN печатной версии 1990-5378.
2. Якимов В.Н. Цифровой гармонический анализ многокомпонентных случайных процессов // Измерительная техника. – 2006. – № 4. – С. 22–26.

3. *Yakimov V.N.* Digital harmonic analysis of multicomponent random processes // *Measurement Techniques*, Publisher: Springer New York, Vol. 49, № 4, pp. 341–347.
4. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
5. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
6. ГОСТ 8.654-2015. Требования к программному обеспечению средств измерения. – Введ. 2015-04-28. – М.: Стандартинформ, 2015. – 8 с.
7. ГОСТ 8.596-2002. Метрологическое обеспечение измерительных систем. – Введ. 2003-03-01. – М.: Стандартинформ, 2003. – 10 с.
8. *Якимов В.Н., Машков А.В.* Программное обеспечение для оперативного спектрального анализа на основе модифицированного коррелограммного метода // *Материалы III Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике»*. 25 мая 2016 г. – Азов: АзовПечать, 2016. – № 1. – С. 157–161.
9. *Якимов В.Н., Машков А.В.* Программное обеспечение измерительной системы для оперативного вычисления оценок спектральной плотности мощности // *Измерение, контроль, информатизация: материалы XVII Международной научно-технической конференции*. 19 мая 2016 г. – Барнаул: Изд-во АлГТУ, 2016. – С. 151–155.
10. *Якимов В.Н.* Цифровое оценивание спектральной плотности мощности на основе знакового стохастического квантования непрерывных процессов // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2001. №12. – С. 60–64.
11. *Якимов В.Н., Горбачев О.В.* Программно-аппаратное обеспечение системы оценки амплитудного спектра многокомпонентных процессов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2013. – № 5. – С. 49–55
12. *Якимов В.Н., Батищев В.И., Машков А.В.* Модульный подход к разработке информационно-измерительной системы цифрового оценивания спектральной плотности мощности // *Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016»*. 25–27 октября 2016 г. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. – С. 84–86.
13. *Якимов В.Н., Машков А.В.* АИС диагностики газоперерабатывающих агрегатов на основе знаковых методов обработки результатов наблюдений с разграничением прав доступа к базе данных // *Актуальные проблемы информационной безопасности. Теория и практика использования программно-аппаратных средств: материалы X Всероссийской научно-технической конференции*. – Самарский гос. техн. универ.; Самара, 24–26 мая 2017 г. – С. 15–18.
14. *Машков А.В.* Автоматизированная информационно-измерительная система технической диагностики параметров газоперекачивающего агрегата // *Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе: Материалы III Междунар. науч.-практ. конф.*, 7–10 июня 2017 г. – Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2017. – Ч. 1. – С. 131–137.
15. *V.N.Yakimov, O.V.Gorbachev*, Firmware of the amplitude spectrum evaluating system for multicomponent processes // *Instruments and Experimental Techniques*, Publisher: Springer US, New York, Vol. 56, No. 5, pp. 540–54
16. ГОСТ 34.601-90. Автоматизированные системы. Стадии создания. – Введ. 1992-01-01. – М.: Стандартинформ, 1992. – 5 с.
17. *Якимов В.Н., Горбачев О.В.* Программное обеспечение системы измерения амплитудных спектров колебательных процессов // *Программные продукты и системы*. – 2013. – № 2. – С. 166–171.
18. *Якимов В.Н., Горбачев О.В.* Программно-аппаратное обеспечение системы оценки амплитудного спектра многокомпонентных процессов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2013. – № 5. – С. 49–55. DOI: 10.7868/S0032816213040289.
19. *Yakimov V.N., Gorbachev O.V.* Firmware of the amplitude spectrum evaluating system for multicomponent processes, *Instruments and Experimental Techniques*, Publisher: Springer US, New York, Vol. 56, No. 5, pp. 540–545, September 2013.
20. *Якимов В.Н., Горбачев О.В.* Измерительная система спектрального анализа вибрационных процессов // *Газовая промышленность*. – 2013. – № 2. – С. 34–37.
21. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Ч. I. Общие требования.
22. ГОСТ 55855-2013. Автомобильные транспортные средства. Методы измерения и оценки общей вибрации.
23. ГОСТ ИСО 10326-1-2002. Вибрация. Оценка вибрации сидений транспортных средств по результатам лабораторных испытаний. Ч. 1. Общие требования.

SOFTWARE OF INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM FOR OPERATIVE SPECTRAL ANALYSIS

A.V. Mashkov, A.V. Zhelonkin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *In paper the problem of software development of the information and measuring system for the operative spectral analysis is considered. While developing the software of the information and measuring system, a modular paradigm for organizing the software structure was chosen, which allowed ensuring the fulfillment of such criteria as flexibility and extensibility of the system, scalability of the development process, replaceability of software components and the possibility of their reuse. The separation of the levels of representation and processing of data in the structure of metrologically significant software allowed separating metrologically significant and insignificant parts and ensuring the protection of measurement information from unintentional and deliberate changes. The system was tested during the pilot studies of low-frequency vibrations of the MAZ-206067 bus for assessing the degree of comfort of the driver and passengers. The obtained results made it possible to obtain a spatial vibro-acoustic portrait of the bus, many times greater than the volume and detail of the manufacturer's data.*

Keywords: *multicomponent process, analog-stochastic quantization, a sign-function signal, operative spectral analysis, software, information-measuring system, multi-level architecture.*

REFERENCES

1. *Yakimov V.N.* Cifrovoy kompleksnyj statisticheskij analiz na osnove znakovogo predstavleniya sluchajnyh processov // *Izvestiya samarskogo nauchnogo centra RAN.* – 2016. – T. 18. № 4(7). – S. 1346–1353. 30 ist. ISSN pechatnoj versii 1990–5378.
2. *Yakimov V.N.* Cifrovoy garmonicheskij analiz mnogokomponentnyh sluchajnyh processov // *Izmeritel'naya tekhnika.* – 2006. – № 4. – S. 22–26.
3. *Yakimov V.N.* Digital harmonic analysis of multicomponent random processes // *Measurement Techniques, Publisher: Springer New York, Vol. 49, № 4, pp. 341–347.*
4. *Marpl-ml. S.L.* Cifrovoy spektral'nyj analiz i ego prilozheniya: Per s angl. – M.: Mir, 1990. – 584 s.
5. *Mirskij G.Ya.* Charakteristiki stohasticheskoy vzaimosvyazi i ih izmereniya. – M.: Energoiz-dat, 1982. – 320 s.
6. GOST 8.654-2015. Trebovaniya k programmnomu obespecheniyu sredstv izmereniya. – Vved. 2015-04-28. – M.: Standartinform, 2015. – 8 s.
7. GOST 8.596-2002. Metrologicheskoe obespechenie izmeritel'nyh sistem. – Vved. 2003-03-01. – M.: Standartinform, 2003. – 10 s.
8. *Yakimov V.N., Mashkov A.V.* Programmnoe obespechenie dlya operativnogo spektral'nogo analiza na osnove modifitsirovannogo korrelogrammnogo metoda // *Materialy` III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye tendencii razvitiya i perspektivy` vnedreniya innovacionnyx texnologij v mashinostroenii, obrazovanii i e'kono-mike».* 25 maya 2016 g. – Azov: AzovPechat', 2016. – № 1. – S. 157–161.
9. *Yakimov V.N., Mashkov A.V.* Programmnoe obespechenie izmeritel'noj sistemy` dlya operativnogo

Andrey V. Mashkov, Senior Lecture.
Alehander V. Zhelonkin, Student.

- vy`chisleniya ocenok spektral'noj plotnosti moshchnosti // *Izmerenie, kontrol', infor-matizaciya: materialy` XVII mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii*. 19 maya 2016 g. – Barnaul: Izd-vo AIGTU, 2016. – S. 151–155.
10. *Yakimov V.N.* Cifrovoe ocenivanie spektral'noj plotnosti moshchnosti na osnove znakovogo stohasticheskogo kvantovaniya nepreryvnyh processov // *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*. – 2013. – № 5. – Pp. 49-55.
 11. V.N.Yakimov, O.V.Gorbachev Programmno-apparatnoe obespechenie sistemy ocenki amplitudnogo spektra mnogokomponentnyh processov // *Pribory i tekhnika eksperimenta* – 2013. – № 5. – Pp. 49-55
 12. *Yakimov V.N., Batishev V.I., Mashkov A.V.* Modul'ny`j podxod k razrabotke informacionno-izmeritel'noj sistemy` cifrovogo ocenivaniya spektral'noj plotnosti moshchnosti // *Metody`, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noj informacii: sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-texn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2016»*. 25–27 oktyabrya 2016g. – Pen-za: Izd-vo PGU, 2016. – S. 84–86.
 13. *Yakimov V.N., Mashkov A.V.* AIS diagnostiki gazopererabaty`vayushhix agregatov na osnove znakovy`x metodov obrabotki rezul'tatov nablyudenij s razgranicheniem prav dostupa k baze danny`x // *Aktual'ny`e problemy` informacionnoj bezopasnosti. Teoriya i praktika ispol'zo-vaniya programmno-apparatny`x sredstv: materialy` X Vserossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii*. – Samarskij gos. tex. univer.; Samara. 24–26 maya 2017 g. – S. 15–18.
 14. *Mashkov A.V.* Avtomatizirovannaya informacionno-izmeritel'naya sistema texnicheskoj diagnostiki parametrov gazoperekachivayushhego agregata // *Aktual'ny`e problemy` nauki i obrazovaniya v sovremennom vuze: Materialy` III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, 7–10 iyunya 2017 g. – Sterlitamak: Sterlitamakskij filial BashGU, 2017. – Ch. 1. – S. 131–137.
 15. V.N.Yakimov, O.V.Gorbachev, Firmware of the amplitude spectrum evaluating system for multi-component processes // *Instruments and Experimental Techniques*, Publisher: Springer US, New York, Vol. 56, No. 5, pp. 540-54.
 16. GOST 34.601-90. Avtomatizirovannye sistemy. Stadii sozdaniya. – Vved. 1992-01-01. – M.: Standartinform, 1992. – 5 s.
 17. *Yakimov V.N., Gorbachev O.V.* Programmnoe obespechenie sistemy izmereniya amplitudnyh spektrov kolebatel'nyh processov // *Programmnye produkty i sistemy*. – 2013. – № 2. – S. 166–171.
 18. *Yakimov V.N., Gorbachev O.V.* Programmno-apparatnoe obespechenie sistemy ocenki amplitudnogo spektra mnogokomponentnyh processov // *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2013. № 5. S. 49–55. DOI: 10.7868/S0032816213040289.
 19. *Yakimov V.N., Gorbachev O.V.* Firmware of the amplitude spectrum evaluating system for multi-component processes, *Instruments and Experimental Techniques*, Publisher: Springer US, New York, Vol. 56, No. 5, pp. 540–545, September 2013.
 20. *Yakimov V.N., Gorbachev O.V.* Izmeritel'naya sistema spektral'nogo analiza vibracionnyh processov // *Gazovaya promyshlennost'*. – 2013. – № 2. – S. 34–37.
 21. GOST 31191.1-2004 (ISO 2631-1:1997). Vibraciya i udar. Izmerenie obshchej vibracii i ocenka ee vozdejstviya na cheloveka. Chast' I. Obshchie trebovaniya.
 22. GOST 55855-2013. Avtomobil'nye transportnye sredstva. Metody izmereniya i ocenki obshchej vibracii.
 23. GOST ISO 10326-1-2002. Vibraciya. Ocenka vibracii sidenij transportnyh sredstv po re-zul'tatam laboratornyh ispytanij. Chast' 1. Obshchie trebovaniya.
 24. GOST ISO 8002-99. Vibraciya. Vibraciya nazemnogo transporta. Predstavlenie rezul'ta-tov izmerenij.

УДК 681.518

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНТРОЛИРУЕМУЮ И СОСЕДНИЕ ЛОПАТКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДАТЧИК

П.Е. Подлипов

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

***Аннотация.** Приводится краткое описание метода измерения радиальных зазоров между торцами лопаток и статорной оболочкой компрессора с использованием одновиткового вихретокового датчика и самокомпенсации температурных воздействий на него. На качественном уровне анализируются влияния на результаты измерения радиальных зазоров соседних лопаток, а также температуры как на контролируемую, так и на соседние лопатки при фиксированном радиальном зазоре. Приводятся результаты вычислительных экспериментов, для проведения которых использована существующая модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента датчика и лопатки. Полученные результаты содержат количественные оценки влияния соседних лопаток и температуры как на контролируемую, так и на соседние лопатки в функциональной зависимости от радиальных зазоров.*

***Ключевые слова:** измерение радиальных зазоров, одновитковый вихретоковый датчик, самокомпенсация температурных воздействий, влияние соседних лопаток, влияние температуры лопаток.*

Введение

Известно, что от радиальных зазоров (РЗ) между торцами лопаток и статорной оболочкой в компрессорах и турбинах газотурбинных двигателей (ГТД) зависят основные показатели надежности и эффективности ГТД. Поэтому проблема измерения РЗ в тяжелых и даже экстремальных условиях (высокие температуры в газоздушном тракте и скорость газового потока, близкая к скорости звука, повышенный уровень вибраций и другие факторы) остается актуальной и в настоящее время.

Известны также методы и средства измерения РЗ, в которых используются одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1, 2]. ЧЭ (как и остальные элементы конструкции ОВТД) выполнен из тех же жаропрочных сталей, что и лопатки, и через установочное отверстие в статорной оболочке вводится в газоздушный тракт, где осуществляется его электромагнитное взаимодействие с торцами лопаток. При этом для коррекции температурных воздействий на ЧЭ и остальные элементы конструкции ОВТД используется дополнительный ОВТД, который через дополнительное установочное отверстие также вводится в газоздушный тракт. Такой способ коррекции широко используется в экспериментальных исследованиях ГТД в стендовых условиях, но из-за дополнительных установочных отверстий в статорной оболочке нежелателен в эксплуатации ГТД для использования в процессе управления и диагностики. Кроме того, для эффективной термодор-

Петр Евгеньевич Подлипов, научный сотрудник.

рекции необходима идентичность характеристик и параметров обоих ОВТД, что затруднительно при существующей технологии их изготовления.

В работах [3, 4] предложен метод измерения РЗ, в котором реализована идея самокомпенсации температурных воздействий на ЧЭ и другие элементы конструкции ОВТД, что является важным аргументом для применения метода в системах управления и диагностики ГТД, поскольку отпадает необходимость в дополнительном ОВТД при термокоррекции и соответствующем установочном отверстии в статорной оболочке для его размещения.

Следует отметить, что для практического применения рассматриваемого метода очень важными представляются всесторонние исследования метода, и в частности влияния различных мешающих факторов. Исследованию влияния одного из них (осевых смещений рабочего колеса) посвящена работа [5]. Настоящая статья является продолжением работ в том же направлении и посвящена исследованию влияния температуры на контролируемую и соседние лопатки.

В статье приводится краткое описание метода измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД. Анализируется на качественном уровне влияние соседних лопаток, а также температуры на контролируемую и соседние лопатки при фиксированном РЗ.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов, для проведения которых использована существующая модель электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки (модель адаптирована к форме и размерам лопаток, применяемых в компрессоре). Полученные результаты содержат количественные оценки влияния соседних лопаток и температуры как на контролируемую, так и на соседние лопатки в виде функциональных зависимостей от РЗ при различных значениях шага установки лопаток на рабочем колесе.

Метод измерения РЗ

На рис. 1 изображены два положения рабочего колеса (РК) компрессора (РК I и РК II) с лопатками 1, 2, ..., n . Там же показана система отсчета $OXYZ$. Начало отсчета (точка O) находится на внутренней поверхности статора и в положении РК I начало отсчета совпадает с геометрическими центрами лопатки 1 и ЧЭ ОВТД. Ось X совпадает с направлением оси РК, ось Y – с направлением его радиуса, а ось Z – с направлением вращения РК (величина РЗ определяется координатой y).

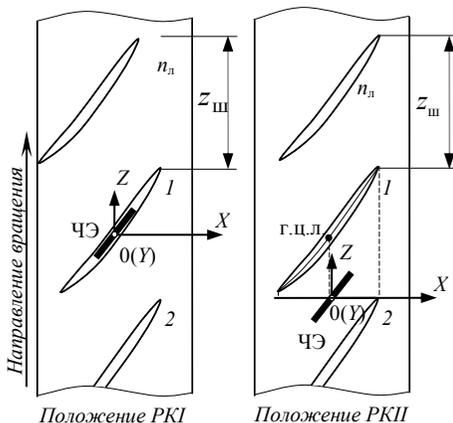


Рис. 1. Размещение ЧЭ ОВТД и система отсчета $OXYZ$

Если предположить, что вращение РК происходит в нормальных температурных условиях, то при отсутствии влияния соседних лопаток (1 и 2) эквивалентная индуктивность ЧЭ, а следовательно, и эквивалентная индуктивность первичной обмотки согласующего трансформатора (СТ) датчика будут иметь максимально возможное значение (L_0) при совпадении центра ЧЭ (точки O) и центра межлопаточного промежутка. Вместе с тем при совпадении центра ЧЭ (и точки O) с центром лопатки (положение РКI) согласно [1, 2, 4] индуктивность уменьшается и становится равной $L_0 - \Delta L_y$, где ΔL_y – изменение эквивалентной индуктивности, связанное с изменением координаты y (РЗ).

При воздействии температуры на элементы конструкции ОВТД (и датчик в целом), как показали исследования, эквивалентная индуктивность СТ возрастает на величину ΔL_θ независимо от положения лопатки относительно ЧЭ ОВТД.

В итоге для первого (РКИ) из двух (РКИ и РКII) рассмотренных положений колеса относительно ЧЭ ОВТД (когда торец контролируемой лопатки находится в зоне чувствительности датчика) эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ можно представить в виде

$$L_{СТ(I)}^2 = L_0 + \Delta L_\theta - \Delta L_y \quad (1)$$

Для второго положения (РКII) (когда в зоне чувствительности датчика торец контролируемой лопатки отсутствует) выражение (1) примет вид

$$L_{СТ(II)}^2 = L_0 + \Delta L_\theta \quad (2)$$

где $L_{СТ(I)}^2$ и $L_{СТ(II)}^2$ – экстремальные значения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ.

Предлагаемый в [4] метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД предусматривает фиксацию $L_{СТ}^2$ в положениях РКИ, РКII и получение разности

$$\Delta L_{СТ}^2 = L_{СТ(II)}^2 - L_{СТ(I)}^2 = \Delta L_y \quad (3)$$

которая не зависит от температурных воздействий на ОВТД (ΔL_θ) и определяется только искомыми изменениями индуктивности первичной обмотки СТ ΔL_y , связанными с РЗ(y).

С учетом влияния соседних лопаток выражения (1), (2) и (3) примут вид

$$L_{СТ(I)}^2 = L_0 + \Delta L_\theta - \Delta L_y - \Delta L_{Сл(I)} \quad (4)$$

$$L_{СТ(II)}^2 = L_0 + \Delta L_\theta - \Delta L_{Сл(II)} \quad (5)$$

$$\Delta L_{СТ}^2 = L_{СТ(II)}^2 - L_{СТ(I)}^2 = \Delta L_y + \Delta L_{Сл(I)} - \Delta L_{Сл(II)} \quad (6)$$

где $\Delta L_{Сл(I)}$ и $\Delta L_{Сл(II)}$ – изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с влиянием соседних лопаток 2 и n_l (положение РКИ), а также 1 и 2 (положение РКII) соответственно (рис. 1) При этом для оценки влияния соседних лопаток можно использовать формулу

$$\delta L_{\text{СЛ}} = \frac{\Delta L_{\text{СЛ(I)}} - \Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{\Delta L_{y, \text{max}}} \cdot 100\% \quad (7)$$

где $\Delta L_{y, \text{max}}$ – максимально возможное изменение ΔL_y , а величина $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}$ намного больше $\Delta L_{\text{СЛ(I)}}$, поскольку ЧЭ ОВТД расположен на расстоянии $z_{\text{ш}}/2$ от соседних лопаток в положении РКII по сравнению с положением РКI.

Результаты исследований температурных воздействий на лопатки, применяемые в турбинах ГТД, показали увеличение эквивалентной индуктивности ЧЭ ОВТД (а следовательно, и первичной обмотки СТ) с увеличением температуры, что связано с увеличением удельного сопротивления материала лопатки, преобладающим над соответствующими изменениями геометрических параметров [6, 7]. Так как в компрессорных лопатках используются те же материалы, то аналогичные результаты можно ожидать и в отношении лопаток, применяемых в компрессорах.

С учетом этого выражения (4), (5) и (6) примут вид:

$$L_{\text{СТ(I)}}^2 = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_y - \Delta L_{\text{СЛ(I)}} + \Delta L_{\text{КЛ0}} + \Delta L_{\text{СЛ0(I)}}, \quad (8)$$

$$L_{\text{СТ(II)}}^2 = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_{\text{СЛ(II)}} + \Delta L_{\text{СЛ0(II)}}, \quad (9)$$

$$\Delta L_{\text{СТ}}^2 = L_{\text{СТ(II)}}^2 - L_{\text{СТ(I)}}^2 = \Delta L_y + \Delta L_{\text{СЛ(I)}} - \Delta L_{\text{СЛ(II)}} - \Delta L_{\text{КЛ0}} + \Delta L_{\text{СЛ0(II)}} - \Delta L_{\text{СЛ0(I)}}, \quad (10)$$

где $\Delta L_{\text{КЛ0}}$, $\Delta L_{\text{СЛ0(I)}}$ и $\Delta L_{\text{СЛ0(II)}}$ – изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с температурными воздействиями на контролируемую лопатку (КЛ) (положение РК I), а также на соседние лопатки (в положениях РКI и РКII соответственно). При этом оценить влияние температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки можно по формуле

$$\delta L_{\text{КСЛ0}} = \frac{-\Delta L_{\text{КЛ0}} + \Delta L_{\text{СЛ0(II)}} - \Delta L_{\text{СЛ0(I)}}}{\Delta L_{y, \text{max}}} \cdot 100\% \quad (11)$$

где вклад $\Delta L_{\text{КЛ0}}$ существенно больше $\Delta L_{\text{СЛ0(II)}}$ и тем более $\Delta L_{\text{СЛ0(I)}}$.

Следует отметить, что выражения (4–11) дают наглядное, качественное представление о влиянии соседних лопаток и температуры на контролируемую и соседние лопатки. При этом предполагается, что преобразуемый параметр РЗ (y) имеет фиксированное значение. Однако эквивалентные индуктивности первичной обмотки СТ в положениях РКI и РКII, равно как и их разность, являются функциями РЗ (y) – $L_{\text{СТ(I)}}^2(y)$, $L_{\text{СТ(II)}}^2(y)$ и $\Delta L_{\text{СТ}}^2(y)$. Функциями РЗ (y) являются также выражения (7, 11) – $\delta L_{\text{СЛ}}(y)$ и $\delta L_{\text{КСЛ0}}(y)$. Но первое из перечисленных семейств функций – это фактически функции преобразования (ФП) ОВТД, а второе семейство – функции влияния (ФВ) мешающих факторов (соседних лопаток и температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки).

Количественные оценки влияния соседних лопаток

Искомые оценки получены с помощью известной модели электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ с торцевой частью турбинной лопатки. Ее описание приведено в работе [8], а исходные данные для моделирования (размеры лопатки и ЧЭ, а также другие параметры) – в работе [9]. Несмотря на принципиальные отличительные особенности лопаток, применяемых в турбине и компрессоре, та же модель может использоваться и для компрессорной лопатки упрощенной формы, близкой к прямоугольной с малой кривизной поверхности пера и отсутствием выступов. В исходные данные были внесены изменения размеров торца лопатки (в соответствии с реальными размерами компрессорной лопатки), а также степени ее кривизны и выступов (уменьшены практически до нуля). При этом все остальные исходные данные оставались неизменными¹.

В результате моделирования (в предположении нормальных температурных условий $\theta = 20^\circ\text{C}$) получена ФП ЧЭ в виде зависимости эквивалентной индуктивности ЧЭ ($L_{\text{ЧЭ}}^2(y)$) в диапазоне изменения РЗ (y) от 0,5 до 2,5 мм. Показано, что функция $L_{\text{ЧЭ}}^2(y)$ монотонно возрастает и при $y \rightarrow \infty$, т. е. при отсутствии лопатки в зоне чувствительности, $L_{\text{ЧЭ}\infty}^2 = 3,657 \cdot 10^{-9}$ Гн.

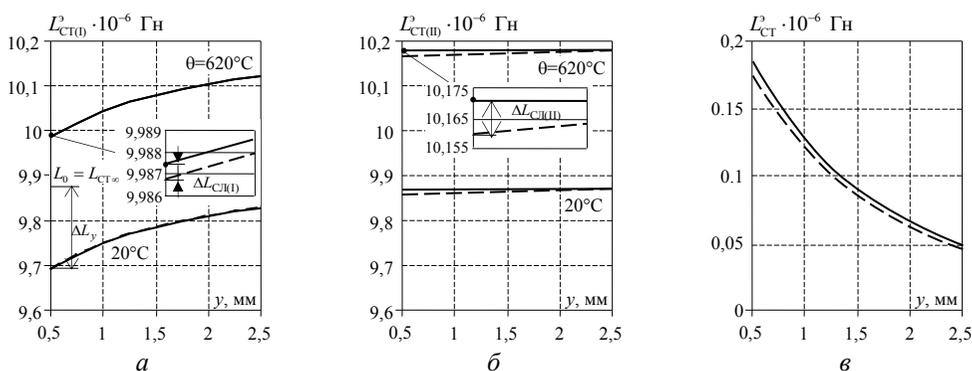


Рис. 2. Семейство ФП $L_{\text{CT}(0)}^2(y, \theta)$ (а) и $L_{\text{CT}(0)}^2(\theta)$ (б) (без учета соседних лопаток – сплошные линии и с их учетом – пунктир), разность ФП $\Delta L_{\text{CT}}^2(y)$ (в) (без учета соседних лопаток – сплошные линии и с их учетом – пунктир)

Далее полученные результаты пересчитываются в первичную обмотку СТ в соответствии с рекомендациями, приведенными в [10], с учетом дополнительных предложений по их совершенствованию. При этом для расчета $L_{\text{CT}\infty}^2$ используется формула $L_{\text{CT}}^2 = n_{\text{т}}^2(kL_{\text{ЧЭ}\infty}^2)$, где $n_{\text{т}} = 30$ – коэффициент трансформации СТ, k – коэффициент, зависящий от индуктивности тоководов (ТВ) ОВТД. Что же касается пересчета результатов моделирования при наличии лопатки в зоне чувствительности ОВТД (в частности функции $L_{\text{ЧЭ}}^2(y)$) в первичную обмотку СТ, то предлагается использовать выражение $L_{\text{CT}}^2(y) = L_{\text{CT}\infty}^2 - \Delta L_y$, где $\Delta L_y = n_{\text{т}}^2(k^* \cdot \Delta L_{\text{ЧЭ}}^2)$,

¹ Для компрессорной лопатки длина хорды, спинки и корыта составила 29 мм; ширина выходной и входной кромок 2,0 мм; выступов в торцевой части лопатки нет (в модели равны нулю); степень кривизны лопатки определяется изгибом ее спинки и корыта относительно центра хорды и составляет 0,1 мм.

а $\Delta L_{\text{ЧЭ}}^2 = L_{\text{ЧЭ}\infty}^2 - L_{\text{ЧЭ}}^2(y)$, k^* – коэффициент, который, как и коэффициент k , зависит от соотношения индуктивностей ТВ и ЧЭ, хотя и может отличаться от него по величине. Для ОВТД из групп одного типоразмера оба коэффициента выбраны равными ($k=k^*=3$) и, что особенно важно, обеспечивают хорошее совпадение приведенных значений ΔL_y ($\Delta L_y / L_{\text{СТ}\infty}^2$), полученных путем моделирования и экспериментально (именно приведенные значения ΔL_y оказывают определяющее влияние на ФП измерительной цепи с включенным в нее ОВТД).

На рис. 2 результаты моделирования (после пересчета) представлены как графики $L_{\text{СТ(И)}}^2$ в зависимости от координаты y (РЗ) при температуре 20 °С (а). С увеличением y $L_{\text{СТ}}^2$ возрастает и при $y \rightarrow \infty$ могло бы достигнуть предельного значения $L_{\text{СТ}\infty}^2 = 9,87 \cdot 10^{-6}$ Гн, которое обозначено на оси ординат (причем $L_{\text{СТ}\infty}^2 = L_0$ в ранее приведенных выкладках). Но именно это значение соответствует эквивалентной индуктивности $L_{\text{СТ(III)}}^2$ в межлопаточных промежутках при отсутствии влияния контролируемой и соседних лопаток. Поэтому на рис. 2, б график $L_{\text{СТ(III)}}^2$ от y – это прямая, параллельная оси Y .

Определение $L_{\text{СТ}}^2(y)$ при номинальной температуре (600...650 °С в компрессоре) осуществлялось с использованием экспериментальных данных, полученных в специальной термокамере для группы ОВТД одного типоразмера. Было показано, что при изменении температуры на 600 °С от нормальной (20 °С) изменения эквивалентной индуктивности СТ составляют 3 % с небольшим отклонением ($\Delta L_0 / L_0 = 0,03$). Поэтому каждая ордината функции $L_{\text{СТ(И)}}^2(y)$ при температуре 20 °С увеличивалась на величину $\Delta L_0 = 0,03L_0$. Аналогичные действия необходимы и в отношении $L_{\text{СТ(III)}}^2(y)$ при нормальной температуре.

Итоги этих операций представлены на рис. 2 а, б как полное семейство ФП ОВТД – $L_{\text{СТ(И)}}^2(y, \theta)$ и $L_{\text{СТ(III)}}^2(\theta)$ при нормальной и номинальной температурах (причем все графики ФП выполнены сплошными линиями).

Разность $L_{\text{СТ(III)}}^2(y) - L_{\text{СТ(И)}}^2(y) = \Delta L_{\text{СТ}}^2(y)$, вычисленная согласно рассматриваемому методу измерения РЗ (y) с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД (ΔL_0), представлена на рис. 2, в и, действительно, не зависит от температурных воздействий на ОВТД, оставаясь неизменной при вычислении $\Delta L_{\text{СТ}}^2$ как при нормальной, так и при номинальной температуре (график $\Delta L_{\text{СТ}}^2(y)$ также выполнен сплошной линией).

В работах [11, 12] приведены описания модели ЭМВ взаимодействия ЧЭ ОВТД не только с контролируемой, но и с соседними лопатками сложной формы, применяемыми в турбинах. Представляется очевидной возможность применения этой модели для исследования влияния соседних лопаток в компрессоре после замены турбинных лопаток теми, что применяются в компрессоре с замкнутой соответствующих исходных данных (такие данные были приведены выше).

Результаты вычислительных экспериментов с учетом влияния соседних лопаток показали незначительное отклонение функции $L_{\text{СТ(И)}}^2$ при выбранном шаге установки лопаток ($z_{\text{ш}}=24$ мм). В масштабной сетке рис. 2, а они практически незаметны. Поэтому в более крупном масштабе функция $L_{\text{СТ(И)}}^2(y)$ (с учетом со-

седних лопаток в окрестности $y=0.5$ мм) вынесена на «аппликацию», где показана пунктиром.

Как и ожидалось, соседние лопатки вызывают уменьшение индуктивности $L_{\text{СТ(II)}}^2$ ($\Delta L_{\text{СЛ(II)}}$ – величина отрицательная). Такой же характер влияния наблюдается и в отношении $L_{\text{СТ(III)}}^2$, однако ее изменения ($\Delta L_{\text{СЛ(III)}}$) возрастают в несколько раз по величине и, что особенно важно, $L_{\text{СТ(III)}}^2$ теряет независимость от y , монотонно возрастая с увеличением y (рис. 2, б).

Влияние соседних лопаток на функцию $\Delta L_{\text{СТ}}^2(y)$ в основном определяет составляющая $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}$, которая уменьшает все ее значения (на рис. 2, в это пунктирная линия).

Полученные ФП с учетом и без учета влияния соседних лопаток (при заданном шаге установки лопаток на РК ($z_{\text{ш}}$)) позволяют дать количественную оценку ФВ:

$$\delta L_{\text{СЛ}}(y) = \frac{\Delta L_{\text{СТ}}(y) - \Delta L_{\text{СТСЛ}}(y)}{\Delta L_{y_{\text{max}}}} \cdot 100\% \quad (12)$$

где $\Delta L_{\text{СТ}}(y)$ и $\Delta L_{\text{СТСЛ}}(y)$ – разностные значения $L_{\text{СТ(III)}}^2(y)$ и $L_{\text{СТ(II)}}^2(y)$ без учета и с учетом влияния соседних лопаток соответственно, а $\Delta L_{y_{\text{max}}}$ – максимально возможное значение $\Delta L_{\text{СТ}}(y)$ (без учета соседних лопаток). При этом необходимо отметить, что выражение (12) отражает суммарное влияние соседних лопаток в обоих положениях РК I и РК II.

На рис. 3, а представлено семейство ФВ $\delta L_{\text{СЛ}}(y)$ при трех значениях шага $z_{\text{ш}} = 18, 24$ и 30 мм и с учетом суммарного влияния соседних лопаток в обоих положениях РК. При $z_{\text{ш}} = 24$ мм максимальное значение $\delta L_{\text{СЛ}}$ составляет около 5,5 %. Оно возрастает до 7,1 % при $z_{\text{ш}} = 18$ мм и снижается до 3,8 % при $z_{\text{ш}} = 30$ мм.

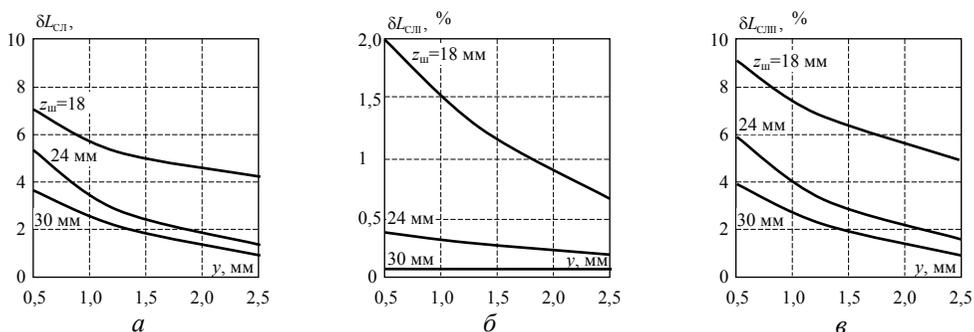


Рис. 3. ФВ соседних лопаток (СЛ) при $z_{\text{ш}}=18, 24, 30$ мм:
 $\delta L_{\text{СЛ}}(y)$ – суммарное влияние СЛ в положениях РК I и РК II (а);
 $\delta L_{\text{СЛ I}}(y)$ – влияние СЛ в положении РК I (б);
 $\delta L_{\text{СЛ II}}(y)$ – влияние СЛ в положении РК II (в)

На рис. 3, б, в представлены ФВ при тех же значениях шага $z_{ш}$, но вычисленные по отдельности – только для соседних лопаток в положении РКІ ($\delta L_{\text{СЛ(І)}}(y)$) и только для соседних лопаток в положении РКІІ ($\delta L_{\text{СЛ(ІІ)}}(y)$). Показано, что влияние соседних лопаток в положении РКІІ многократно превышает его влияние в положении РКІ, причем перепад усиливается с увеличением $z_{ш}$.

Количественная оценка влияния температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки

На качественном уровне представление о влияниях температуры на контролируемую и соседние лопатки дает выражение (11) (разумеется, при фиксированном значении РЗ (y)). Получение же функциональной зависимости $\delta L_{\text{КСЛЮ}}(y)$ возможно на той же модели ЭМВ ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками, если учтены температурные воздействия на те же лопатки. При этом предполагается, что температурные воздействия вызывают изменения удельного сопротивления материала лопаток и их геометрических параметров. Однако результаты исследований, приведенные в работах [6, 7], показали доминирующее влияние температуры на удельное сопротивление, а потому изменения, связанные с геометрическими параметрами лопаток, можно не учитывать.

Методика проведения вычислительных экспериментов аналогична той, что использовалась ранее – моделируются ФП РЗ (y) с учетом влияния соседних лопаток, а затем ФП с учетом не только соседних лопаток, но и температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки, как в положении РКІ, так и в положении РКІІ. Далее определяются разностные значения ФП и определяются ФВ:

$$\delta L_{\text{КСЛЮ}}(y) = \frac{\Delta L_{\text{СТСЛ}}(y) - \Delta L_{\text{СТКСЛЮ}}(y)}{\Delta L_{y \text{ max}}} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где $\Delta L_{\text{СТСЛ}}(y)$ и $\Delta L_{\text{СТКСЛЮ}}(y)$ – разностные значения $L_{\text{СТСЛ(ІІ)}}^3(y)$ и $L_{\text{СТСЛ(І)}}^3(y)$ без учета и с учетом температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки².

На рис. 4, а представлены ФВ температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки в виде $\delta L_{\text{КСЛЮ}}(y)$ в предположении, что шаг установки лопаток на рабочем колесе составляет 18; 24 и 30 мм.

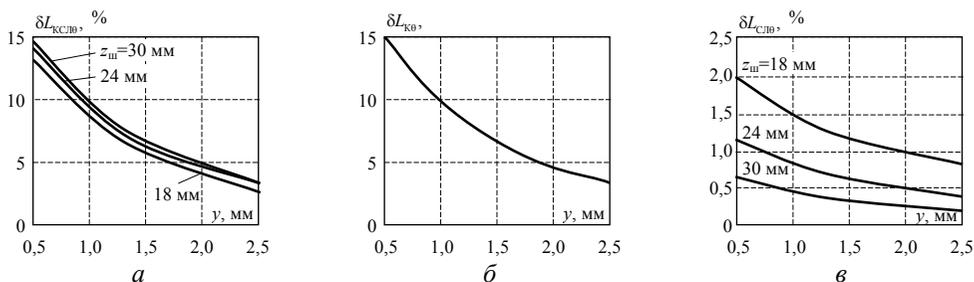


Рис. 4. ФВ температуры на контролируемую и соседние лопатки при $z_{ш} = 18, 24, 30$ мм: $\delta L_{\text{КСЛЮ}}(y)$ (а), $\delta L_{\text{Кв}}(y)$ (б), $\delta L_{\text{СЛЮ}}(y)$ (в)

² Количественные оценки $\Delta L_{\text{СТСЛ}}(y)$ осуществлялись ранее в предыдущей серии вычислительных экспериментов, и их результаты можно использовать в настоящей серии.

Как следует из графиков, изменение шага установки соседних лопаток оказывает незначительное влияние – отклонения не превышают единиц процентов. Можно предположить, что причина тому – доминирующее влияние температурных воздействий на контролируемую лопатку по сравнению с соседними. Для подтверждения этого предположения были проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых определялась ФВ температурных воздействий только на контролируемую лопатку без учета соседних:

$$\delta L_{к0}(y) = \frac{\Delta L_{ст}(y) - \Delta L_{стк0}(y)}{\Delta L_{y\max}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где $\Delta L_{ст}(y)$ и $\Delta L_{стк0}(y)$ – разностные значения $L_{ст(II)}^3(y)$ и $L_{ст(0)}^3(y)$ – без учета и с учетом температурных воздействий только на контролируемую лопатку (при отсутствии соседних лопаток) в положениях РКІ и РКІІ.

На рис. 4, б представлена функция $\delta L_{к0}(y)$, максимальное значение которой достигает примерно 15 %, что действительно полностью подтверждает предположение о доминирующем влиянии температурных воздействий на контролируемую лопатку по сравнению с теми же воздействиями на соседние лопатки.

Вместе с тем данные на рис. 4, а и б позволяют определить ФВ, связанные с суммарным действием температуры на соседние лопатки в положениях РКІ и РКІІ. Результаты расчета в виде функции $\delta L_{сл0}(y)$ представлены на рис. 4, в (при шаге, равном 18, 24 и 30 мм). Даже при минимальном значении $z_{ш}$ (18 мм) не превышает 2 %. При этом необходимо особо отметить, что данные на рис. 4, в в основном определяются влиянием соседних лопаток в положении РКІІ, а влияние соседних лопаток в положении РКІ пренебрежимо мало³.

В работах [11, 12] дано описание возможных способов уменьшения влияния соседних лопаток и температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки. Практически эти способы аналогичны тому, что рекомендовано в работе [1], где предусматривается экспериментальное получение градуировочных характеристик перед началом работы системы измерения. Используемые в системе датчики устанавливаются в специальной термокамере с градуировочным устройством и прибором контроля РЗ. Модернизация устройства заключается в установке не одной, а нескольких лопаток, аналогичных тем, что применяются в компрессоре. Разумеется, и с аналогичным шагом. В рассматриваемом случае можно ограничиться тремя лопатками. Полученные таким образом семейства ГХ при номинальной температуре (они должны соответствовать семействам ФП в положениях РКІ и РКІІ) используются при обработке данных, полученных в процессе эксплуатации системы измерения РЗ.

Заключение

На качественном уровне осуществлен анализ влияния на результат измерения РЗ соседних лопаток, а также температурных воздействий как на контролируемую, так и на соседние лопатки.

Приведены результаты вычислительных экспериментов, для проведения которых использовалась существующая модель электромагнитного взаимодействия

³ Дополнительные исследования, проведенные для $z_{ш} = 24$ мм (такой шаг используется в реально существующих компрессорах), показали, что в положении РКІ максимальные значения $\delta L_{сл0}$ составляют менее 0,1 %, и это более чем на порядок меньше, чем в положении РКІІ.

ЧЭ ОВТД и лопатки (модель предварительно адаптирована к форме и размерам лопаток, применяемых в компрессоре ГТД). Полученные результаты содержат количественные оценки влияния соседних лопаток и температуры как на контролируемую, так и на соседние лопатки в виде функциональной зависимости от РЗ при различных значениях шага установки лопаток на рабочем колесе. Показано, что максимальное значение (7,1 %) влияние соседних лопаток достигает при РЗ 0,5 мм и шаге установки лопаток 18 мм (при этом вклад соседних лопаток в положении РКП многократно превышает вклад соседних лопаток в положении РКЛ).

Показано также, что максимально возможное влияние температуры имеет место при РЗ 0,5 мм (15 %), причем оно определяется в основном температурными воздействиями на контролируемую лопатку (влияние соседних лопаток не превышает 2 % при шаге 18 мм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. – 188 с.
2. 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.
3. Патент РФ № 2639996 RU, МПК G01B 7/14. Способ измерения радиальных зазоров и скорости вращения ротора в турбомашине / Белоухов В.Н., Подлинов П.Е., Секисов Ю.Н. – Оpubл. 26.09.17, Бюл. № 27.
4. Белоухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М. [и др.] Способ измерения радиальных зазоров в газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик // Датчики и системы. – 2018. – № 4. – С. 53–59.
5. Кутейникова М.М., Подлинов П.Е. Влияние осевых смещений рабочего колеса турбомшины на результаты измерения радиальных зазоров при использовании самокомпенсации температурных воздействий на датчик // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – Вып. 4 (56). – С. 76–83.
6. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. [и др.] Анализ влияния температуры на информативные параметры одновитковых вихретоковых датчиков // Автометрия. – 2017. – № 4 (53). – С. 104–111.
7. Кутейникова М.М. Кластерные методы и средства измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине на основе одновитковых вихретоковых датчиков: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.16. – Самара, 2016. – 176 с.
8. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. – С. 627–635.
9. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. – С. 636–641.
10. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлинов П.Е. [и др.] Эквивалентные параметры одновиткового вихретокового датчика в измерительной цепи с импульсным питанием // Датчики и системы. – 2016. – № 2. – С. 27–35.
11. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К. [и др.] Влияние соседних лопаток на измерение радиальных зазоров в турбине // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – № 5. – С. 327–336.
12. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлинов П.Е. [и др.] Моделирование процесса измерения радиальных и осевых смещений торцов рабочих лопаток сложной формы // Автометрия. – 2015. – № 5 (51). – С. 101–112.

Статья поступила в редакцию 17 июня 2018 г.

TEMPERATURE IMPACT ON THE CONTROLLED AND NEIGHBORING BLADES OF THE COMPRESSOR WHEEL DURING MEASURING OF RADIAL CLEARANCES WITH SELF-COMPENSATION OF TEMPERATURE EFFECT ON THE SENSOR

P.E. Podlipnov

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

Abstract. *The brief description of the method for measuring of radial clearances between the blade tips and stator of the compressor, using the single-coil eddy-current sensor with self-compensation of temperature effect on the sensor is given. The quality of neighboring blades effect on the results of radial clearances measuring is presented as well as the effect of temperature influence on controlled and neighboring blades with a fixed radial clearance. The results of computing experiments obtained on the base of existing models of electro-magnetic interaction between a sensitive element and the blade are considered. These results contain quantitative estimates of the neighboring blades effect and temperature effect on the controlled and neighboring blades as a function of radial clearances.*

Keywords: *measuring of radial clearances, single-coil eddy-current sensor, self-correction of temperature impacts, neighboring blades effect, blades' temperature effect.*

REFERENCES

1. Methods and tools of measuring of multidimensional displacements of power plants' constructive elements / Ed. *Sekisov Yu.N., Skobelev O.P.* – Samara: Samara Scientific Center of RAS, 2001. – 188 pp.
2. Cluster methods and tools of measuring of deformation and coordinates of displacements of blade tips in gas-turbine engines / Ed. *Skobelev O.P.* – Moscow: Mashinostroenie, 2011. – 298 pp.
3. Pat. 2639996 RU. Method for measuring radial clearances and rotor speed in turbo-machines / *Belopukhov V.N., Podlypnov P.E., Sekisov Yu.N.* // Bull. No. 27. – 2017.
4. *Belopukhov V.N., Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M. et al.* The method for measuring of radial clearances in gas-turbine engine with self-compensation of temperature effect on single-coil eddy-current sensor // *Sensors & Systems.* – No. 4. – 2018. – 53–59 pp.
5. *Kuteynikova M.M., Podlypnov P.E.* Influence of axial displacements of turbomachine impeller on the results of measurement of radial clearances with the self-compensation of temperature impact on the sensor // *Vestnik SamGTU. Series «Technical Science».* – No 4 (56). – 2017. – 76–83 pp.
6. *Borovik S.Y., Kuteynikova M.M., Sekisov Y.N. et al.* *Optoelectron. Instrument. Proc.* (2017) 53: 395. <https://doi.org/10.3103/S8756699017040124>.
7. *Kuteynikova M.M.* Cluster methods and tools of measuring of radial and axial displacements of blade tips in turbine on the base of single-coil eddy-current sensors: PhD Thesis. – Samara, 2016. 182 pp.
8. *Kuteynikova M.M., Sekisov Yu.N., Skobelev O.P.* The model of electromagnetic interaction between sensitive element of single-coil eddy-current sensor and the end of a blade of complex shape // *Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XV international conference (Samara, June, 25–28, 2013).* – pp. 627–635.
9. *Kuteynikova M.M., Sekisov Yu.N., Skobelev O.P.* The results of simulation of electromagnetic interaction between sensitive elements of single-coil eddy-current sensor (as a part of a cluster) and the end of a blade of complex shape // *Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XV international conference (Samara, June, 25–28, 2013).* – pp. 636–641.

10. *Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M., Podlipnov P.E. et al.* Equivalent parameters of single-coil eddy-current sensor in measuring circuit with pulse supply // *Sensors & Systems*. – No 2. –2016. – pp. 27–35.
11. *Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M., Raykov B.V. et al.* Adjacent blades effect on tip clearance measuring in turbine // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. – No 5. – 2013. – pp. 327–336.
12. *Borovik S.Y., Kuteynikova M.M., Podlipnov P.E. et al.* *Optoelectron. Instrument. Proc.* (2015) 51: 512. <https://doi.org/10.3103/S8756699015050118>