

В. Н. Белопухов, канд. техн. наук, науч. сотр., bvnsam@mail.ru,

С. Ю. Боровик, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., borovik@iccs.ru,

М. М. Кутейникова, науч. сотр., kuteynikova@iccs.ru,

П. Е. Подлипнов, мл. науч. сотр., pepodlypnov@yandex.ru,

Ю. Н. Секисов, д-р техн. наук, зав. лаб., sekisov@iccs.ru,

О. П. Скобелев, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., borovik@iccs.ru,

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, г. Самара

Измерение радиальных зазоров с повышенной чувствительностью в расширенном диапазоне осевых смещений рабочего колеса турбины

Приводится описание системы измерения радиальных зазоров (РЗ) и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах современных и перспективных газотурбинных двигателей. В системе предусмотрена возможность применения как известного, так и вновь разработанного кластерного метода измерения, обеспечивающего повышенную чувствительность к РЗ в расширенном диапазоне изменений осевых смещений торцов лопаток. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований — метрологических показателей и проверки работоспособности прототипа системы с кластером высокотемпературных одноритмовых вихретоковых датчиков, чувствительные элементы которых выполнены в виде отрезка проводника.

Ключевые слова: турбина, лопатки сложной формы, радиальные и осевые смещения, одноритмовый вихретоковый датчик, система измерения, экспериментальные исследования

Введение

Известен метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной кривизной поверхности пера, применяемых в турбине (сечение такой лопатки плоскостью, перпендикулярной ее оси, имеет явно выраженную серповидную форму, а плоскостью, параллельной оси, — U-образную форму за счет выступов в торцевой части). В системе отсчета $OXYZ$, начало которой (точка O) расположено на внутренней поверхности статора, радиальным смещениям соответствует координата y и радиальный зазор (РЗ), осевым — координата x , смещениям в направлении вращения рабочего колеса — координата z [1].

Метод предусматривает использование двух одноритмовых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника, которые входят в состав распределенного кластера (РК), смещенного в сторону хвостовой части лопатки. При этом ЧЭ развернуты на угол $30...60^\circ$ против часовой стрелки относительно оси Z , что в процессе вращения рабочего колеса и прохождения лопаткой ЧЭ сопровождается уменьшением его индуктивности до минимального значения, которое в рассматриваемом методе принято считать информативным. Оба датчика включаются в дифференциальную измерительную цепь (ИЦ) с импульсным питанием, приближенным дифферен-

цированием и АЦП на выходе [2]. В свою очередь, включение ИЦ в состав системы обеспечивает получение информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток (координат y (РЗ) и x). Описание технических и программных средств такой системы, а также результаты ее экспериментальных исследований приведены в работе [1] и в развернутом виде в работах [3—5].

Вместе с тем, при изучении полученных результатов, а также в процессе анализа задач, связанных с измерением РЗ и решаемых разработчиками перспективных газотурбинных двигателей (ГТД), была выявлена необходимость повышения чувствительности к изменениям РЗ (y) и расширения диапазона изменений осевых смещений (x), что оказалось возможным во вновь разработанном кластерном методе [6, 7]. От известного метода (*meth 1*) вновь разработанный (*meth 2*) отличается смещением РК ОВТД в сторону головной части лопатки, а также разворотом ЧЭ на 60° по часовой стрелке относительно оси Z до "квазипараллельности" боковой поверхности пера. При вращении рабочего колеса и прохождении лопаткой ЧЭ из-за наличия выступов в торцевой части лопатки наблюдается два минимума индуктивности ЧЭ. Один из них — наименьший, принято считать информативным.

Представляется очевидным при реализации *meth 2* в технических и программных средствах сис-

темы измерения использовать те же принципы построения (структуру и алгоритмы), что являлись базовыми в реализации *meth 1* [1, 4, 5].

Однако следует особо отметить, что известные достоинства *meth 2* нельзя считать препятствием к применению *meth 1*. В частности, это касается результатов исследований, которые приведены в работе [8], показавших, что повышение чувствительности к изменениям РЗ при использовании *meth 2* может сопровождаться увеличением влияния мешающих факторов, в том числе температуры, изменяющейся в широком диапазоне, и это может стать причиной дополнительных погрешностей. Поэтому при разработке системы измерения, реализующей *meth 2*, предусматривалась возможность использования также и *meth 1*.

В статье приводится описание технических и программных средств системы измерения РЗ и осевых смещений торцов лопаток, применяемых в турбине. При этом в системе предусмотрено использование как *meth 1*, так и *meth 2* (по выбору). Рассматриваются также результаты экспериментальных исследований — метрологические показатели прототипа системы и его работоспособность.

Технические и программные средства системы

Система обеспечивает измерение радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и повышенной кривизны поверхности пера (координат y (РЗ) и x соответственно). Содержит нестандартные и стандартные технические средства (ТС, рис. 1).

Нестандартные ТС включают РК из двух ОВТД (ОВТД₁ и ОВТД₂), предназначенных для использования в турбинах. Предполагается, что в отличие от известных конструкций датчиков [1] в ОВТД₁ и ОВТД₂ встроены по две термопары (ТП₁₁, ТП₁₂ и ТП₂₁, ТП₂₂ соответственно), предназначенные для термокоррекции температурных воздействий на ЧЭ датчиков [9, 10]. К нестандартным ТС относится также преобразователь (ПР), представляющий собой ИЦ с приближенным дифференцированием, включающую преобразователи "ток—напряжение", масштабирующий усилитель и микросхему десятиразрядного АЦП [1]. ПР встроен в линию связи между РК ОВТД и устройством предварительной обработки данных, причем данные с выхода АЦП передаются в виде параллельного кода.

В состав стандартных ТС входит устройство предварительной обработки цифровых данных — встраиваемый модуль STM32F4Discovery на базе микроконтроллера STM32F407VGT6B [11]. Их отличительные особенности: 32-битное ядро Cortex-M3, 1 Мбайт памяти программ, 192 Кбайт ОЗУ, 16-канальный 12-разрядный АЦП, 12-разрядный цифро-

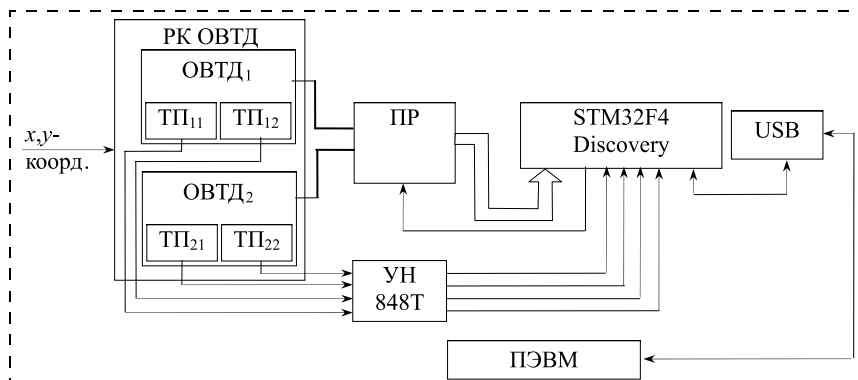


Рис. 1. Технические средства системы измерения

аналоговый преобразователь (ЦАП), набор таймеров общего назначения с расширенными функциями, последовательные коммуникационные интерфейсы UART, достаточное число дискретных портов ввода-вывода¹. Все сигналы доступны на внешних разъемах модулей. Для связи с ПЭВМ верхнего уровня по каналу USB модули дооснащены преобразователями интерфейсов UART ↔ USB.

Для нормализации сигналов от термопар ТП₁₁, ТП₁₂ и ТП₂₁, ТП₂₂ использовано стандартное многоканальное устройство нормализации (УН) 848Т фирмы Rosemount, с выхода которого напряжения поступают на входы АЦП модуля STM32.

Конструктивно модуль STM32 и преобразователь UART ↔ USB смонтированы на кросс-плате. Плата имеет размеры, рекомендуемые стандартом DIN 43880 для размещения в типовых корпусах, закрепляемых на DIN-рейку.

Программное обеспечение (ПО) имеет двухуровневую структуру и ориентировано на реализацию в системе измерения обоих методов (*meth 1* и *meth 2*). На нижнем уровне реализованы алгоритмы предварительной обработки и сжатия цифровых кодов [12, 13], а ПО верхнего уровня традиционно обеспечивает имплементацию алгоритмов управления системой, аппроксимации цифровых кодов и поиска экстремальных значений [12, 14], вычисления искомых координат x и y [15, 16], а также осуществляет конфигурирование системы, оперативное отображение и архивирование измерительной информации.

ПО нижнего уровня содержит секции настройки блока внутреннего тактирования микроконтроллера STM32F407VGT6, инициализации периферийного оборудования и контроллера прерываний, измерения значения постоянной составляющей и уровня шума, сортировки и сжатия входного потока данных, обслуживания последовательного порта приема-передачи данных. Взаимодействие с перифе-

¹ В работе [1] приводится описание устройства аналогичного назначения — модуля STM32 VL Discovery, который, однако, выполнен на базе микроконтроллера с меньшими объемами памяти и скоростью обработки данных (микроконтроллер STM32 F100 RBT6).

рийными устройствами проводится в виде прямого обращения к соответствующим регистрам.

Начало процесса пороговой обработки входного потока при вращении рабочего колеса инициируется подачей команды от ПЭВМ верхнего уровня. При получении этой команды выполняется сортировка отсчетов входного потока в целях выделения полезных сигналов от ИЦ, а также запускаются операции сжатия по адаптивным порогам [13]. Подготовленный таким образом массив полезных кодов дополняется информацией о числе отсчетов и контрольной сумме, а затем передается через последовательный порт UART в ПЭВМ верхнего уровня и становится доступным для дальнейшей обработки.

ПО верхнего уровня системы реализовано в виде SDI-приложения под управлением MS Windows и предполагает отображение информации в значительно более расширенном виде, чем того требует применение системы в реальных условиях измерения. Это было связано с необходимостью проверки работоспособности всех этапов сбора и обработки экспериментальных данных на рабочих режимах функционирования системы и отладки разработанного алгоритмического обеспечения.

По команде оператора для заданной конфигурации эксперимента (объем анализируемой выборки кодов, реализуемый метод измерения (*meth 1* или *meth 2*), режим обработки данных, способ аппроксимации выборок кодов и др.) осуществляется программный запуск процесса измерения, который начинается с формирования стартового импульса для внешних систем предварительной обработки цифровых кодов. Далее сформированный ПО нижнего уровня упакованный массив кодов с результатами измерений передается в ПЭВМ, где происходит его дальнейшая обработка, включая выделение лопаток, нахождение экстремумов, привязка результатов к конкретным лопаткам на рабочем колесе, вычисление искомых x , y -координат смещений торцов лопаток и усреднение результатов по заданному числу оборотов.

Результаты измерений в виде графиков зависимостей экстремумов кодов C_1 и C_2 от номера оборота, вычисленных радиальных и осевых смещений торцов лопаток выводятся на экран монитора. Кроме того, предусмотрена возможность вывода служебной информации, содержащей число элементов сжатого и несжатого массивов данных, коэффициент сжатия, СКО и еще ряд промежуточных сведений, включая оценки систематической и случайной составляющих погрешности измерения. Накопленные результаты измерений автоматически сохраняются в памяти системы в виде текстовых файлов и доступны для дальнейшего анализа и обработки с помощью стороннего ПО.

Результаты экспериментальных исследований

Приводятся результаты экспериментальных исследований прототипа системы измерения ради-

альных и осевых смещений (x , y -координат), в которой реализованы *meth1* и *meth2*. При этом первоначально рассматриваются метрологические показатели в статическом состоянии объекта измерения (контролируемой лопатки), а затем оценивается работоспособность системы в динамике (в процессе вращения контролируемой и соседних лопаток).

Метрологические показатели. Исследуются наиболее значимые показатели — систематические и случайные составляющие погрешностей.

В работе [17], посвященной кластерным методам и средствам измерения многомерных смещений торцов лопаток, предлагается аппроксимация семейства градуировочных характеристик (ГХ), полученных экспериментально, полиномиальными функциями нескольких переменных, которые в дальнейшем используются для расчета искомых координат методом Ньютона. Однако применение метода возможно только в тех случаях, когда ГХ монотонны в диапазонах изменений искомых координат. Между тем семейства ГХ (зависимости цифровых кодов АЦП на выходе ИЦ ($C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$), как правило, монотонны в системе, реализующей *meth1*. А это означает, что согласно работе [19] аппроксимированные ГХ можно использовать как "опорные" для определения систематической составляющей погрешности, которая находится как разность кодов, полученных экспериментально ($C_э$) и после аппроксимации ($C_а$) при заданных значениях координат x и y ²:

$$\Delta C = C_э - C_а. \quad (1)$$

Семейство ГХ определяется экспериментально с помощью трехкоординатного градуировочного устройства, оснащенного механическими индикаторами часового типа с разрешающей способностью 10 мкм [19]. Индикаторы контролируют перемещение лопатки, закрепленной на подвижной платформе³. Методика получения ГХ предусматривала предварительную установку заданных координат x и y , ручной поиск экстремального значения кода C_1 (по координате Z), полученного после операции усреднения на нижнем уровне системы и выведенного на цифровой индикатор (усреднение устраняет случайную составляющую погрешности). Далее процедура повторяется для новых значений координаты x в диапазоне ее изменения (при неизменном значении y), а затем и для всех остальных значений координат y .

Аналогичным образом определяются и коды C_2 . Полученные результаты представлены в табл. 1 и использовались как исходные данные для опреде-

² Следует отметить, что в такой редакции систематическая составляющая — это фактически погрешность аппроксимации.

³ Лопатка в целом аналогична тем лопаткам, которые использовались в экспериментах, результаты которых приведены в работе [1], но отличается шириной и высотой выступов.

ления аппроксимирующей функции — степенного полинома с двумя переменными (x, y) вида

$$C = f(x, y) = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J A_{i,j} x^i y^j, \quad (2)$$

где $A_{i,j}$ — коэффициенты, I, J — степени полинома.

На рис. 2 в графическом виде представлены результаты аппроксимации — полиномиальная функция $C_{a1}(x, y)$ (степень $I = 3, J = 9$)⁴.

Там же представлены функции C_{a2} при тех же значениях степени полинома.

Приведенная систематическая составляющая погрешности имеет вид

$$\delta_C = \frac{\Delta C}{\Delta C_{\max}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где ΔC определяется с помощью выражения (1), $\Delta C_{\max} = 512$ — максимально возможное изменение кода в ИЦ, причем ΔC вычисляется по кодам C_1 и C_2 при координатах x и y в "узлах"

табл. 1 и кодам C_{a1} и C_{a2} при тех же значениях координат. Результаты расчета функций $\delta_{C1}(x, y)$ и $\delta_{C2}(x, y)$ представлены на рис. 3.

Из графиков рис. 3 следует, что погрешности δ_C невелики, и их максимальные значения не превышают 0,06 %. Вместе с тем, известно, что погрешности аппроксимации при использовании степенных полиномов в промежутках между "узлами" могут быть существенно больше, чем в самих "узлах".

Чтобы дать количественную оценку таким погрешностям, были проведены дополнительные эксперименты, в ходе которых определялись значения кодов C_1 и C_2 при координатах x и y , выбранных в центрах промежутков между соответствующими координатами, приведенными в табл. 1. Затем для тех же координат были вычислены коды C_{a1} и C_{a2} , погрешности ΔC и δC (выражения (2), (1) и (3) соответственно). Графики $\delta_{C1}(x, y)$ и $\delta_{C2}(x, y)$ изображены на рис. 4, и, как видно из графиков, максимальное значение приведенной погрешности не превышает 0,4 %.

Далее рассматриваются результаты оценки систематической составляющей погрешности ИЦ в системе,

Таблица 1

Семейство ГХ $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ (meth1)

$C_1(x, y)$				$C_2(x, y)$			
x, мм	y, мм			x, мм	y, мм		
	0,5	1	1,5		0,5	1	1,5
−1	631	579	550	−1	407	443	464
−0,8	629	578	549	−0,8	411	446	465
−0,6	627	576	549	−0,6	416	449	467
−0,4	624	574	547	−0,4	421	452	469
−0,2	622	573	546	−0,2	426	454	470
0	619	572	545	0	431	457	472
0,2	616	570	544	0,2	435	460	474
0,4	612	568	543	0,4	441	463	476
0,6	609	565	541	0,6	446	466	477
0,8	605	563	540	0,8	450	468	479
1	600	561	539	1	454	471	481

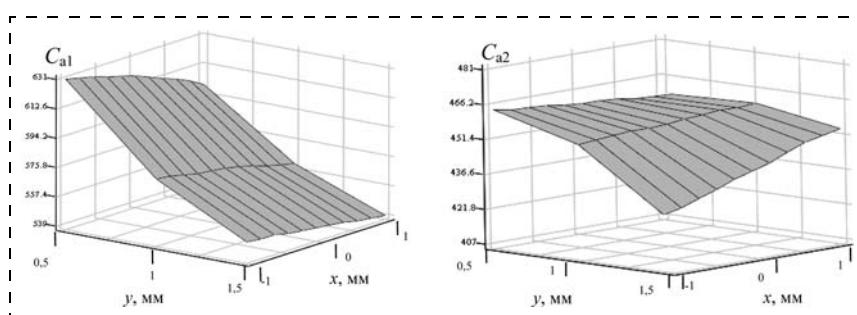


Рис. 2. Аппроксимирующие функции $C_{a1}(x, y)$ и $C_{a2}(x, y)$ (meth1)

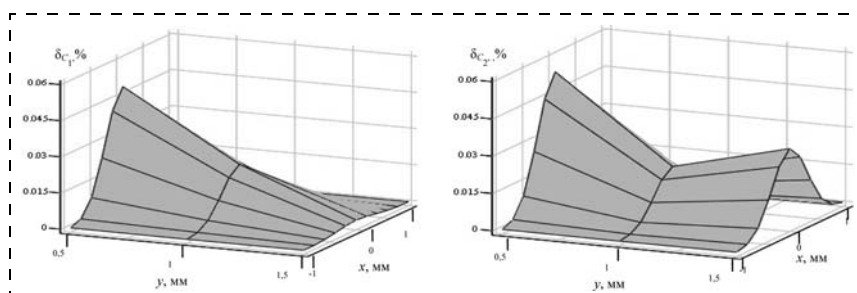


Рис. 3. Систематические составляющие погрешностей $\delta_{C1}(x, y)$ и $\delta_{C2}(x, y)$, вычисленные в "узлах" табл. 1 (meth1)

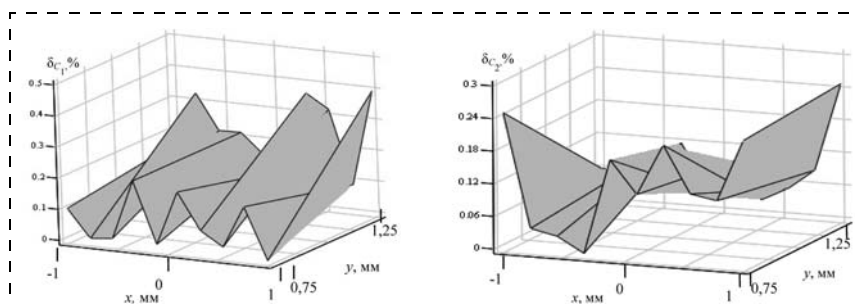


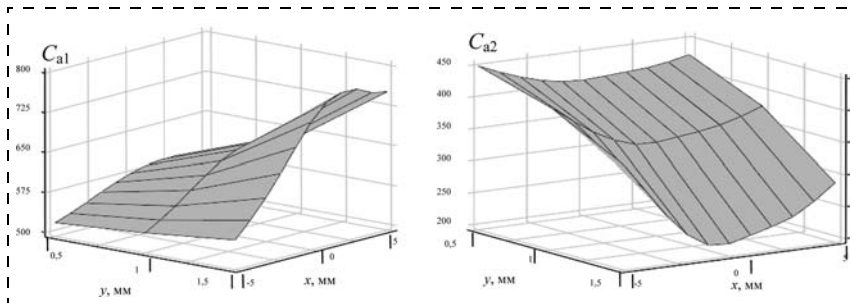
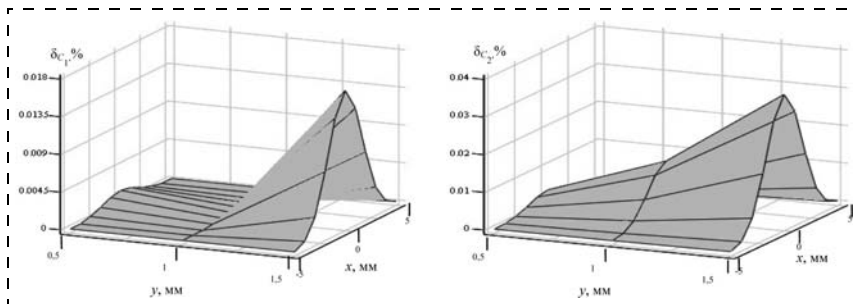
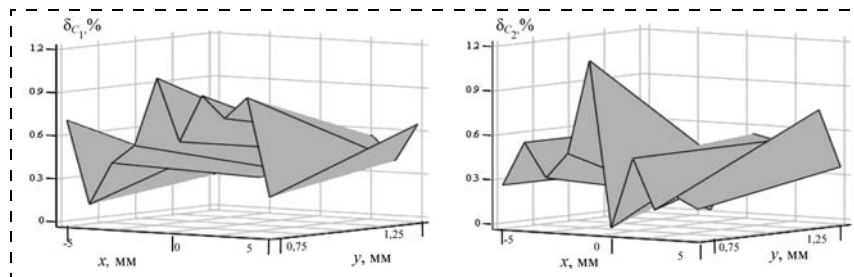
Рис. 4. Приведенные составляющие систематических погрешностей $\delta_{C1}(x, y)$ и $\delta_{C2}(x, y)$, вычисленные в промежутках между "узлами" табл. 1 (meth1)

⁴ Числовые значения коэффициентов полинома $A_{i,j}$ здесь не приводятся.

Таблица 2

Семейство ГХ $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ (*meth2*)

$C_1(x, y)$				$C_2(x, y)$			
$x, \text{ мм}$	$y, \text{ мм}$			$x, \text{ мм}$	$y, \text{ мм}$		
	0,5	1	1,5		0,5	1	1,5
-5	548	530	518	-5	358	416	450
-4	578	547	528	-4	315	392	436
-3	612	566	540	-3	271	369	424
-2	651	588	553	-2	236	352	414
-1	692	609	564	-1	215	341	408
0	732	628	574	0	213	340	406
1	761	641	581	1	222	344	408
2	773	646	584	2	231	348	410
3	772	646	584	3	242	354	412
4	758	640	582	4	262	363	417
5	752	635	579	5	287	375	424

Рис. 5. Аппроксимирующие функции $C_{a1}(x, y)$ и $C_{a2}(x, y)$ (*meth2*)Рис. 6. Приведенные составляющие систематических погрешностей $\delta_{C1}(x, y)$ и $\delta_{C2}(x, y)$, вычисленные в "узлах" (*meth2*)Рис. 7. Приведенные составляющие систематических погрешностей $\delta_{C1}(x, y)$ и $\delta_{C2}(x, y)$, вычисленные в промежутках между "узлами" (*meth2*)

реализующей *meth2*. Как отмечалось в работе [7], семейство ГХ на уровне первичного преобразователя в виде зависимостей индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ от координат x и y не монотонны, а потому немонотонны и зависимости кодов АЦП на выходе ИЦ от тех же координат. Но это означает, что применение метода Ньютона невозможно, и для вычисления координат x и y в работах [15, 16] предлагается алгоритм, свободный от указанного ограничения.

Как показано в работе [20], точность вычисления координат x и y тем выше, чем меньше шаг изменений координат в экспериментах по определению семейства ГХ ИЦ и системы измерения. Но это увеличивает трудоемкость процедуры градуировки и временных затрат, которые в конечном счете могут оказаться неприемлемыми, например в практике экспериментальных исследований ГТД.

В связи с этим одним из возможных путей преодоления подобных трудностей является аппроксимация ГХ, полученных с достаточно большим и приемлемым для пользователей шагом, с последующим использованием аппроксимированных функций для нового табличного представления ГХ со сколь угодно малым шагом для дальнейшего расчета искомых координат.

Вместе с тем, наличие аппроксимирующей функции позволяет найти систематические составляющие погрешности, применяя действия, аналогичные тем, что использовались выше в предположении реализации *meth1*.

Семейство ГХ ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$) для *meth2* представлено в табл. 2.

Полученные результаты использовались как исходные данные при определении аппроксимирующих функций, в качестве которых, как и в случае с *meth1*, выбран полином в виде выражения (2)⁵.

Данные табл. 2, а также полученная аппроксимирующая функция (рис. 5) позволяют найти (с помощью выражений (1)–(2)) приведенные значения систематической составляющей погрешности в "узлах" табл. 2. Графики погрешностей $\delta_{C1}(x, y)$ и $\delta_{C2}(x, y)$ приведены на рис. 6.

Как следует из графиков, максимальные значения δ_{C1} и δ_{C2} не превышают 0,04 %.

⁵ Числовые значения степени полинома $C_{a1}(x, y)$ остаются без изменений, а коэффициенты $A_{i,j}$ также не приводятся.

Чтобы найти погрешности в промежуточных точках табл. 2, проводится дополнительный эксперимент, аналогичный тому, что предпринимался для *meth1*. Его результаты в графическом виде представлены на рис. 7.

Из графиков видно, что максимальные значения погрешностей δ_{C_1} и δ_{C_2} не превышают 1,2 %.

Эксперименты по оценке случайной составляющей погрешности проводили в статике при фиксированных позициях лопатки относительно датчиков. Объем выборки определялся объемом буферной памяти. Коды АЦП регистрировали в режиме непрерывного импульсного питания ИЦ и оценивали их разброс (отклонение кодов от средних значений).

На рис. 8 в качестве примера представлен фрагмент выборки объемом 105 кодов (C_1) (при использовании *meth2*). Там же в увеличенном масштабе изображен разброс кодов C_1 . Анализ показал, что большая часть кодов не вышла за пределы разброса в ± 2 единицы. Среднеквадратическое отклонение (СКО) составило 1,03. Его относительное значение, приведенное к диапазону изменений выходных кодов (512), составляет около 0,2 %.

Аналогичные эксперименты были проведены для кодов C_2 , а также для кодов C_1 и C_2 , применительно к *meth1*. СКО незначительно отличалось (0,93), а его относительное значение также можно считать приблизительно равным 0,2 %.

Оценка работоспособности. Приводится краткое описание имитатора объекта, обеспечивающего вращательное движение лопаток относительно ОВТД₁ и ОВТД₂ в составе РК, что позволяет дать оценки работоспособности технических и программных средств прототипа системы в целом и, в частности, программ, реализующих алгоритмы предварительной обработки информации, вычисления экстремальных значений кода, а также радиальных и осевых смещений торцов лопаток. Имитатор объекта содержит имитатор рабочего колеса (ИРК) и имитатор статора (ИС). ИРК представляет собой диск с тремя турбинными лопатками, одна

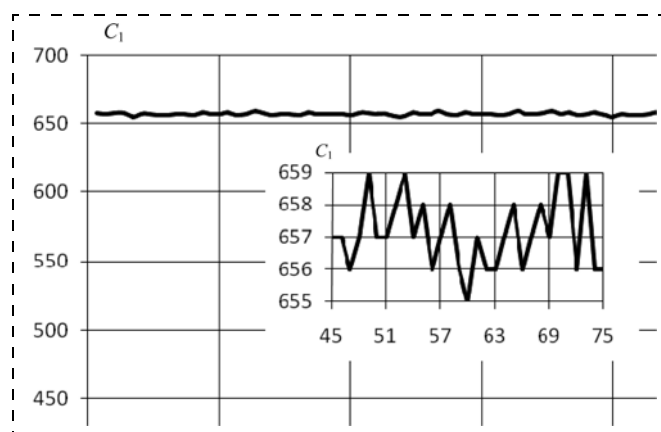


Рис. 8. Фрагменты выборки кодов при $x = -2$, $y = 0,5$ мм (*meth2*)

из которых использовалась в метрологических экспериментах, две остальные подобны первой по форме и размерам. Лопатки размещены на диске с угловым шагом 120° . Электрический привод обеспечивает вращение диска с регулируемой скоростью (от 60 до 1000 мин⁻¹). ИС представляет собой крепежное устройство для РК (ОВТД₁ и ОВТД₂) с механизмом перемещения обоих датчиков в направлении осей X и Y , причем контроль этих перемещений осуществляется индикаторами часового типа с разрешающей способностью до 0,01 мм. Топология размещения ЧЭ ОВТД в составе РК и их ориентация относительно оси Z (направление вращения ИРК) соответствует *meth1* или *meth2* (в зависимости от выбора).

Оценку работоспособности алгоритмов предварительной обработки информации и вычисления экстремальных значений кодов проводили в динамике, т.е. в процессе вращения ИРК в течение одного периода. При этом предполагалось использование только метода *meth2*, поскольку результаты аналогичных исследований для *meth1* были представлены в работе [1]. Радиальные и осевые смещения были установлены с помощью соответствующих индикаторов (0,8 мм (y), -2 мм (x)) и оставались неизменными в течение эксперимента при постоянной скорости вращения (500 мин⁻¹).

На рис. 9 представлены результаты эксперимента — это зависимости кодов на выходе АЦП в течение полного оборота ИРК (при прохождении каждой из трех лопаток ЧЭ обоих датчиков) от номера отсчета (N), соответствующего текущему времени (частота импульсного питания ИЦ постоянна и ее период $T_{\Pi} = 9 \cdot 10^{-6}$ с). Коды остаются постоянными в межлопаточном пространстве (без учета шумовой составляющей). Избыточность, связанная с этими кодами, устраняется в процессе предварительной обработки (рис. 9, а), завершает которую адаптивное сжатие (рис. 9, б). Перечисленные операции позволяют уменьшить объем данных, передаваемых на верхний уровень, почти на порядок.

Отличительной особенностью зависимостей $C(N)$ при использовании в системе *meth2* (по сравнению с *meth1*) является наличие двух экстремумов, один из которых — информативный (при прохождении лопаткой ЧЭ ОВТД₁ — C_1 , ЧЭ ОВТД₂ — C_2). На рис. 10 показана зависимость $C(N)$ в области экстремума в увеличенном масштабе, где отчетливо видна помеха. Дополнительное увеличение масштаба (см. "аппликацию") позволяет определить экстремальное значение кода (659) и продемонстрировать аппроксимацию параболой, проходящей через 3 точки [12] — экстремум и точки ниже экстремума на примерно 8 единиц (эти точки обведены штриховой линией). При этом разность между экстремальными значениями составляет менее единицы кода (менее 1 %). Представляется очевидным, что выявленный разброс экстремальных значений кодов, связанный с помехами, может быть

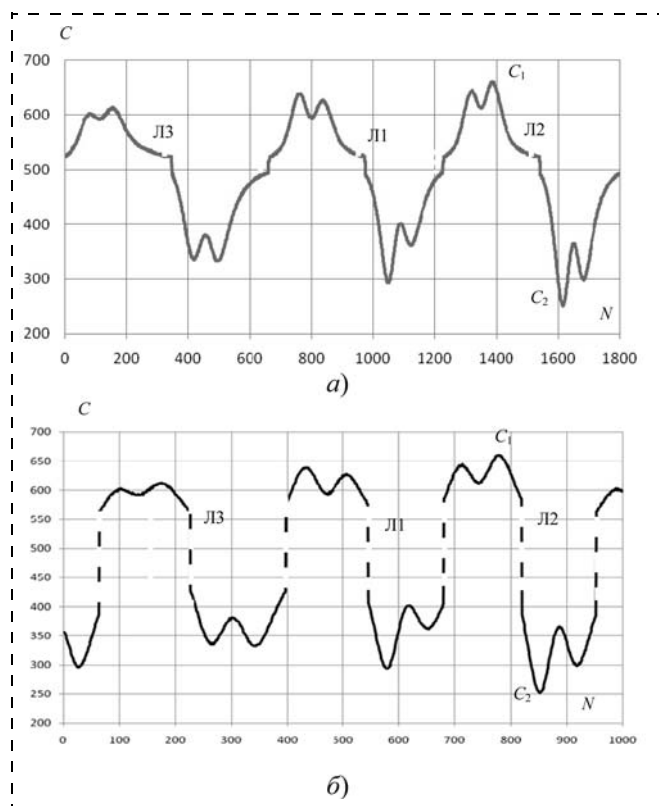


Рис. 9. Устранение избыточности кодов в межлопаточном пространстве (а) и применение адаптивного сжатия (б) (*meth2*)

существенно уменьшен, если использовать предусмотренное в системе усреднение данных за несколько оборотов ИРК. Можно ожидать, что даже четырех оборотов достаточно для уменьшения погрешности примерно в два раза, а 20 оборотов — более чем в четыре.

Оценки работоспособности системы в целом и алгоритма вычислений радиальных и осевых смещений торцов лопаток, в частности, являются итоговыми и, как и предыдущие, проводятся дважды — в предположении использования в системе *meth1* и *meth2*.

Если нет необходимости в учете влияния соседних лопаток, то, как отмечалось в работе [21], до-

статочно одной лопатки при наличии градуировочного устройства, обеспечивающего линейные перемещения лопатки по трем координатам (x , y , z) и их измерения. При этом предполагается, что диаметр рабочего колеса турбины достаточно велик, чтобы считать траекторию вращения торцов лопаток в направлении оси Z на отрезке длиной 20...30 мм практически линейной. Тогда при дополнительном условии применения аналогичных лопаток на рабочем колесе можно воспользоваться метрологически состоятельными семействами ГХ, полученными ранее (табл. 1, 2) в рабочем режиме системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток. Однако ИРК имеет сравнительно небольшой диаметр (около 215 мм), и на указанном выше отрезке траекторию вращения нельзя считать линейной, а потому применение имеющихся семейств ГХ не представляется возможным.

Вместе с тем, в ИС предусмотрена возможность контролируемых индикаторами перемещений в направлении осей X и Y относительно ИРК, а следовательно, и относительно торцов установленных на нем лопаток. Если при этом ИРК будет приведен во вращение и торцы лопаток будут периодически проходить зону чувствительности обоих датчиков в направлении оси Z , а система измерения обеспечит фиксацию экстремальных значений кодов C_1 и C_2 с их выводом пользователю, то имитатор объекта (с ИРК и ИС в его составе) можно использовать, в частности, как своеобразное градуировочное устройство для получения семейств ГХ. В то же время необходимо подчеркнуть, что изготовление ИРК и ИС осуществлялось на лабораторном оборудовании по упрощенным технологиям без какой-либо официальной аттестации, гарантирующей метрологическую состоятельность результатов экспериментов с применением имитатора объекта. Это означает, что в настоящей работе вопросы, связанные с точностью средств измерения и обработки данных, ограничены материалами теоретических исследований, изложенных в работах [20, 22], а также экспериментальными исследованиями систематической и случайной составляющей погрешностей ИЦ в данной статье.

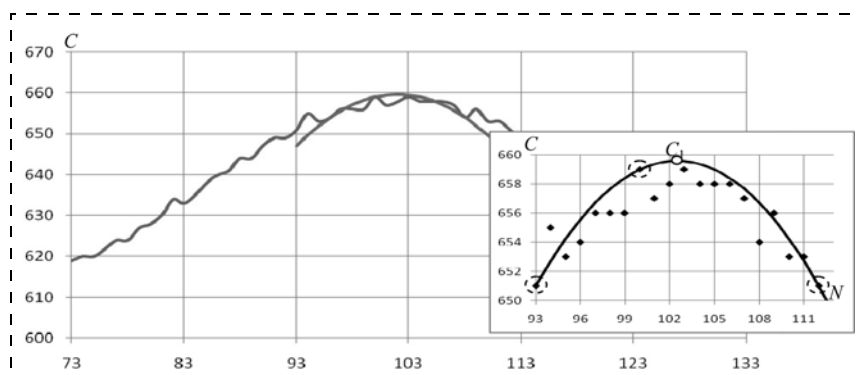


Рис. 10. Функция $C_1(N)$ и ее экстремальные значения с использованием аппроксимации и без нее (*meth2*)

Что же касается имитатора объекта, то его применение может быть связано только с оценками работоспособности аппаратно-программных средств системы, включая завершающую программу, реализующую алгоритм вычисления координат смещения торцов лопаток.

Методика решения такой задачи предполагает ряд последовательных операций: получение семейства ГХ с помощью имитатора объекта (в динамике, т.е. при вращении ИРК), ввод полученных ГХ в систему (как исходных данных для расчета x , y -координат), установку и ввод тестовых зна-

Разность заданных и вычисленных значений координат, выраженная в процентах от диапазонов их изменений

Метод	Заданные промежуточные значения координат										
	у, мм	$\bar{x}$									
		−0,9	−0,7	−0,5	−0,3	−0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
<i>meth1</i>	1,0	2,5	3,5	6,7	8,9	10,9	5,4	11,4	12,0	—	—
		3,75	3,75	3,75	2,5	2,5	1,25	1,25	1,25	—	—
<i>meth2</i>	1,0	1,12	0,88	0,02	−0,12	2,4	1,6	−1,64	−0,2	0,32	−2,14
		5,5	4,0	2,5	2,5	2,5	1,0	5,0	2,5	−1,0	9,25

чений координат x и y , а также их сравнение с полученными результатами вычислений тех же координат.

Для получения семейства ГХ с помощью индикаторов осуществлялась установка заданных значений координаты x в диапазонах 2 мм с шагом 0,2 мм (*meth1*) и 10 мм с шагом 1 мм (*meth2*), а координаты y — в диапазоне 0,8 мм (от 0,8 до 1,6 мм с шагом 0,4 мм) для обоих методов⁶. Для каждой пары из возможных сочетаний координат x и y в указанных диапазонах в процессе вращения ИРК для лопатки под номером 2 (Л2) определялись экстремальные значения кодов — максимум C_1 (рабочий ОВТД₁) и минимум C_2 (рабочий ОВТД₂) при использовании программ предварительной обработки кодов АЦП, поиска экстремальных значений и их усреднения на 20 оборотах ИРК. Полученные семейства ГХ-*meth1*, как и ожидалось, монотонны, а ГХ-*meth2* немонотонны. Но характер изменений функций $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ аналогичен тем, что представлены в табл. 1, 2 и на рис. 2, 5. Поэтому ни в графическом, ни в табличном виде ГХ-*meth1* и ГХ-*meth2* здесь не представлены. Однако в табличном виде данные обеих разновидностей семейств ГХ вводятся в систему для использования в программе, реализующей вычисление x , y -координат.

Далее в соответствии с предложенной методикой осуществляется подготовка тестовых значений координат x и y . С помощью индикаторов устанавливаются значения x и y , которые являются промежуточными между значениями, использованными при получении семейств ГХ-*meth1* и ГХ-*meth2* (между "узлами" таблиц ГХ).

Приводится во вращение ИРК, проводится измерение, и полученные в цифровом виде результаты с помощью программ предварительной обработки, поиска и вычисления экстремальных значений и их усреднения на 20 оборотах, а также программы вычисления x, y -координат, рассчитываются координаты x и y .

В табл. 3 в предположении использования в системе как *meth1*, так и *meth2* приводятся результаты исследований разности заданных и вычисленных в

системе координат, выраженных в процентах от диапазонов их изменений (2 мм — *meth1* и 10 мм — *meth2*).

При этом по вертикали расположены заданные промежуточные значения координаты y (1,0 мм как для *meth1*, так и *meth2*). По горизонтали одной строкой представлены заданные промежуточные значения x -координаты, выраженной в относительных

единицах ($\bar{x} = \frac{x_{\text{зп}}}{0,5(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})}$), где $x_{\text{зп}}$ — заданное

промежуточное значение (−0,9; −0,7...+0,5 для *meth1*, а также −4,5; −3,5; ... +4,5 для *meth2*), а $x_{\text{max}} = +1,0$ мм $x_{\text{min}} = -1,0$ мм для *meth1* и $x_{\text{max}} = +5,0$ мм, $x_{\text{min}} = -5,0$ мм для *meth2*). Вычисленные значения разности, расположенные в "клетках" табл. 3, соответствуют парам выбранных тестовых значений заданных координат x и y , причем в тонированной части каждой "клетки" размещены разности заданных и вычисленных x -координат, а в нетонированных — y -координат. Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что разность заданных тестовых и вычисленных значений для *meth1* по координате y (РЗ) не превышает 3,75 %, по координате x (осевое смещение) — 12 %, для *meth2* по y — не более 5,5 % (если не считать единичное значение разности около 10 %), а по x — менее 2,4 %.

По тем же семействам ГХ, полученным в динамике на лопатке Л2, проведены измерения на лопатках Л1 и Л3. Результаты измерений с использованием *meth2* показали, что Л1 сдвинута относительно Л2 по координате x примерно на 1 мм, а по координате y — около 0,8 мм в сторону увеличения. Тот факт, что РЗ Л1 больше по сравнению с Л2 также заметен и на рис. 9 по соотношению экстремальных значений кодов. Кроме того, как следует из рис. 9, отличие экстремальных значений кодов Л2 и Л3 настолько велико, что коды, соответствующие Л3, выходят за пределы семейства ГХ, полученного на Л2, и это может свидетельствовать о недопустимо большом РЗ, позволяя диагностировать нештатную ситуацию.

Заключение

Разработаны технические и программные средства системы, а также ее прототип. В состав техни-

⁶ Минимальный РЗ (0,8 мм) увеличен по соображениям безопасности, чтобы избежать касания ЧЭ ОВТД торцами лопаток на ИРК в процессе его вращения.

ческих средств системы входят ОВТД, ориентированные на применение в турбинах. В ОВТД, в свою очередь, введены дополнительные ТП для коррекции погрешности измерения температуры ЧЭ датчиков, а в устройстве предварительной обработки данных АЦП (на выходе ИЦ с приближенным дифференцированием) использован микроконтроллер. В состав ПО включены новые разработки, реализующие алгоритмы адаптивного сжатия данных, поиска экстремальных значений кодов или их вычисления при использовании аппроксимирующих функций, алгоритм вычисления x , y -координат, а также вспомогательные программы поддержки функционирования системы в двух режимах, реализующих *meth1* и *meth2* (по выбору пользователя).

Проведены экспериментальные исследования прототипа системы измерения для оценки метрологических показателей (в статическом режиме) и работоспособности системы (в динамике). Даны количественные оценки наиболее значимых показателей — систематической и случайной составляющих погрешности. Разработан и изготовлен имитатор объекта, который предназначен для оценки работоспособности аппаратно-программных средств системы, включая завершающую программу, реализующую алгоритм вычисления координат смещения торцов лопаток (x , y). Предложена методика такой оценки, предусматривающая ряд последовательных операций — получение ГХ с помощью имитатора объекта (в динамике, т.е. в процессе вращения ИРК), ввод табличных данных о ГХ (как исходных данных для расчета искоемых координат), установку и ввод тестовых значений x , y -координат, а также их сравнение с полученными результатами вычислений тех же координат. Предложенная методика обеспечила вполне достоверную оценку работоспособности всех компонентов аппаратно-программных средств и системы в целом.

Список литературы

- Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. В., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 10. С. 38—46.
- Беленький Л. Б., Кутейникова М. М., Логвинов А. В., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Устройство для измерения многокоординатных смещений торцов лопаток / Патент 2525614 РФ. 2014. Бюл. 23.
- Беленький Л. Б., Белоухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Технические средства и программное обеспечение системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XV Междунар. конф., Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. С. 655—662.
- Белоухов В. Н., Боровик С. Ю. Алгоритм предварительной обработки данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XV Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. С. 646—649.
- Белоухов В. Н., Боровик С. Ю. Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XV Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. С. 650—654.
- Кутейникова М. М., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Способ измерения радиальных зазоров и осевых смещений торцов рабочих лопаток турбины / Патент 2556297 РФ. 2015. Бюл. № 19.
- Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Автометрия. 2015. № 3. С. 104—112.
- Белоухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипов П. Е., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Система измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в газозоудном тракте турбины // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVIII Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2016.
- Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Способ уменьшения температурной погрешности измерения многокоординатных смещений торцов лопаток одновитковым вихретоковым преобразователем / Патент 2519844 РФ. 2014. Бюл. № 17.
- Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Погрешность измерения температуры чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика в каналах термокоррекции системы сбора информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и метод ее уменьшения // Вестник СамГТУ, Сер. "Технические науки". 2012. № 3 (35). С. 43—49.
- STM32F405xx, STM32F407xx: URL: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf> (дата обращения 06.06.2016).
- Белоухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М. Алгоритмы функционирования систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 4.
- Белоухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипов П. Е. Предварительная обработка данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы на основе адаптивного алгоритма // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVII междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2015. С. 677—678.
- Белоухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М. Определение экстремума функции изменения кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVII междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2015. С. 679—680.
- Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2010. С. 323—327.
- Кутейникова М. М. Вычисление координат смещения торцов лопаток в системе измерения радиальных зазоров // Управление большими системами: Матер. X Всеросс. школы-конференции молодых ученых. Т. 3. Уфа: УГАТУ. 2013. С. 157—161.
- 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.
- РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014.
- 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.
- Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Погрешности алгоритма вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы в системах измерения радиальных зазоров в турбине // Вестник СамГТУ. Сер. "Технические науки". 2016. № 2.
- Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипов П. Е., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Моделирование процесса измерения радиальных и осевых смещений торцов рабочих лопаток сложной формы // Автометрия. 2015. № 5. С. 101—112.
- Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Погрешности дискретизации в системах измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины // Вестник СамГТУ, Сер. "Технические науки". 2016. № 3.

Measurement of the Radial Clearances with a Heightened Sensitivity in an Extended Range of the Axial Displacements of the Turbine Engine Disk

V. N. Belopukhov, Researcher, bvnsam@mail.ru, **S. Yu. Borovik**, Leading Researcher, borovik@iccs.ru✉, **M. M. Kuteynikova**, Researcher, kuteynikova@iccs.ru, **P. E. Podlipnov**, Junior Researcher, pepodlypnov@yandex.ru, **Yu. N. Sekisov**, Head of Laboratory, sekisov@iccs.ru, **O. P. Skobelev**, Chief Researcher, borovik@iccs.ru, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, 443020, Russian Federation

Corresponding author: **Borovik Sergey Yu.**, D. Sc. (Tech.), Leading Researcher, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, 443020, Russian Federation, e-mail: borovik@iccs.ru

Received on July 21, 2016
Accepted on August 12, 2016

The article presents a description of the hard-and-software tools of the system for measurement of the complex shaped blade tips' radial clearances and axial displacements. The blades of a complex shape are used in modern and promising gas turbine engines. System's hardware consists of high-temperature single-coil eddy-current sensors with additional thermocouples for sensitive elements' temperature error correction and front-end data processing module with ADC at the output of the measurement circuit and a microcontroller. The system's software consists of operation algorithms of a new generation, which ensure an adaptive data compression, code samples' approximation and information values searching, calculation of x, y-coordinates of the blade tips' displacements and other service algorithms. Experimental research of the prototype of the measurement system was realized. The main aim of the research was to evaluate the metrological characteristics of the system's prototype in a static mode and its operativeness in a dynamic mode. The quantitative estimations of the most significant indexes, the methodical and random error fractions, were provided. An object simulator was developed. It was intended for evaluation of the operativeness of the measurement system's hard-and-software tools. The principles of such evaluation are offered. These principles ensure several step-by-step operations, such as obtaining of the calibration characteristics in the dynamic mode during a simulator wheel rotation; setting of them in the system memory as the initial data for the further target coordinates' calculation; setting of the test values of x, y-coordinates and their comparison with the previously calculated values.

Keywords: turbine, irregular shaped blades, radial clearances, axial displacements, eddy-current single-coil sensor, distributed cluster of sensors, measurement system, experimental results, metrological characteristics, operativeness evaluation

For citation:

Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. Measurement of the Radial Clearances with a Heightened Sensitivity in an Extended Range of the Axial Displacements of the Turbine Engine Disk, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 246–256.

DOI: 10.17587/mau.18.246-256

References

1. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Raykov B. V., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Izmerenie radial'nykh zazorov mezhdu statorom turbiny i tortsami lopatok slozhnoy formy s pomoshch'yu odnovitkovykh vikhretokovykh datchikov (Measuring of radial clearances between turbine stator and tips of blades with irregular shape by the instrumentality of single-coil eddy-current sensors), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 10, pp. 38–46 (in Russian).
2. **Belen'kiy L. B., Kuteynikova M. M., Logvinov A. V., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Ustroystvo dlya izmereniya mnogokoordinatnykh smeshcheniy tortsov lopatok (The blade tips' multiaxis displacements measuring device), Patent 2525614 RF, 2014, Byul. 23 (in Russian).
3. **Belen'kiy L. B., Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Tekhnicheskie sredstva i programmnoe obespechenie sistemy izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy i skorosti vrashcheniya lopatochnogo koleasa (Hardware and software tools of the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements and a blade wheel rotation speed), *Proc. of XV Internat. Conf. (Samara, June, 25–28, 2013) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 655–662 (in Russian).
4. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu.** Algoritm predvaritel'noy obrabotki dannykh kodov v sisteme izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy (Algorithm for preliminary data processing in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements), *Proc. of XV Internat. Conf. (Samara, June, 25–28, 2013) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 646–649 (in Russian).
5. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu.** Algoritm poiska ekstremal'nykh znacheniy kodov v sisteme izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy

lopatok slozhnoy formy (Algorithm for codes' extremum calculation in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements), *Proc. of XV Internat. Conf. (Samara, June, 25–28, 2013) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 650–654 (in Russian).

6. **Kuteynikova M. M., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Sposob izmereniya radial'nykh zazorov i osevykh smeshcheniy tortsov rabochikh lopatok turbiny (Method for measurement turbine blade tips' radial clearances and axial displacements), Patent 2556297 RF, 2015, Byul. № 19 (in Russian).

7. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Method for measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, May 2015, vol. 51, issue 3, pp. 302–309 (in Russian).

8. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Sistema izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok v gazovozdushnom trakte turbiny (System for measuring radial and axial displacements of blade tips in turbine gas-air section), *Proc. of XVIII international conference (Samara, September, 20–25, 2016) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, 2016 (in Russian).

9. **Belen'kiy L. B., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Sposob umen'sheniya temperaturnoy pogreshnosti izmereniya mnogokoordinatnykh smeshcheniy tortsov lopatok odnovitkovym vikhretokovym preobrazovatelem (Method for decreasing temperature error during measurement blade tips' multiaxis displacements by the means of single-coil eddy-current transducer), Patent 2519844 RF, 2014, Byul. № 17 (in Russian).

10. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Pogreshnost' izmereniya temperatury chuvstvitel'nogo elementa odnovitkovogo vikhretokovogo datchika v kanalakh termokorrektssii sistemy sbora informatsii o mnogokoordinatnykh smeshcheniyakh tortsov lopatok i metod ee umen'sheniya (Temperature measuring error of single-coil eddy-current sensor's sensitive element in thermo correction channels of system for data acquisition about blade tips' multi-axial displacements and method for it decreasing), *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2012, no. 3 (35), pp. 43–49 (in Russian).

11. **STM32F405xx, STM32F407xx**: URL: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>

12. Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M. *Algoritmy funkcionirovaniya sistem izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy* (Operation algorithms of systems for measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips), *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2016, no. 4 (in Russian).
13. Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E. *Predvaritel'naya obrabotka dannykh kodov v sisteme izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy na osnove adaptivnogo algoritma* (Preliminary data processing in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements on the base of adaptive algorithm), *Proc. of XVII international conference (Samara, June, 22–25, 2015) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 677–678 (in Russian).
14. Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M. *Opreделение ekstremuma funktsii izmeneniya kodov v sisteme izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy* (Codes' function extremum calculation in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements), *Proc. of XVII international conference (Samara, June, 22–25, 2015) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 679–680 (in Russian).
15. Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N. *Algoritm vychisleniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok* (The algorithm for calculation of blade tips radial clearances and axial displacements), *Proc. of XII international conference (Samara, June, 21–23, 2010) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 323–327 (in Russian).
16. Kuteynikova M. M. *Vychislenie koordinat smeshcheniya tortsov lopatok v sisteme izmereniya radial'nykh zazorov* (Calculation of blade tips' displacements in system for radial clearances measurement), *Upravlenie bol'shimi sistemami: Materialy X Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh*, vol. 3, Ufa, Publishing house of UGATU, 2013, pp. 157–161 (in Russian).
17. Skobelev O. P. ed. *Klasternye metody i sredstva izmereniya deformatsii statora i koordinat smeshcheniy torcov lopatok i lopastei v gazoturbinykh dvigatelyakh* (Cluster methods and tools for measuring of stator deformations and coordinates of blade tips displacements in gas-turbine engines), Moscow, Mashinostroenie ("Mechanical engineering"), 2011, 298 p. (in Russian).
18. RMG 29-2013 GSI. *Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya* (Metrology. Basic terms and definitions), Moscow, Standartinform, 2014 (in Russian).
19. Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. ed. *Metody i sredstva izmereniya mnogomernykh peremeshcheniy elementov konstruktsii silovyykh ustanovok* (Methods and tools for measuring of multi-dimensional displacements of power-plant constructional elements), Samara, Samarskiy nauchnyy centr RAN (Samara scientific center of Russian academy of sciences), 2001, 188 p. (in Russian).
20. Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. *Pogreshnosti algoritma vychisleniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy v sistemakh izmereniya radial'nykh zazorov v turbine* (Errors of calculation algorithm or radial and axial displacement of complex shaped blade tips in the systems for measurement radial clearances in turbine), *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2016, no. 2 (in Russian).
21. Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. *Modeling the process of measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips*, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, September 2015, vol. 51, iss. 5, pp. 512–522.
22. Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. *Pogreshnosti diskretizatsii v sistemakh izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok rabocheho koleasa turbiny* (Sampling errors in the systems for measuring radial and axial displacements of blades tips of turbine wheel), *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2016, no. 3 (in Russian).

УДК 53.083.9

DOI: 10.17587/mau.18.256-263

А. Ю. Будко¹, Ph. D., руководитель обр. программы

"Мехатроника и робототехника" ЮФУ, aptem_budko@mail.ru,

М. Ю. Медведев¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф, medvmihal@sfedu.ru,

Р. Ю. Будко¹, аспирант института приборостроения и нанoeлектроники ЮФУ, raisa-budko@yandex.ru,

П. В. Ивашин², Ph. D., начальник НИО-4 ТГУ, ivashinpv@rambler.ru,

А. Я. Твердохлебов², инженер НИО-4 ТГУ, andr.tverd@gmail.com,

Д. Н. Герасимов³, Ph. D., доц., gerasimovdn@mail.ru, **В. В. Рахманов**⁴, Ph. D., доц., rahmanov@inbox.ru,

¹Южный федеральный университет,

²Тольяттинский государственный университет,

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет

информационных технологий, механики и оптики,

⁴Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания по сигналу ионного тока¹

Рассматриваются вопросы контроля параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания и исследования сигнала электропроводности пламени. Предложен метод контроля параметров процесса сгорания на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока, отличающийся повышенной устойчивостью результатов расчета к возмущениям сигнала, происходящим в результате межцикловых вариаций и флуктуаций процесса сгорания. Приведены результаты экспериментального исследования по оценке возможностей предложенного метода в сравнении с пьезокерамическим датчиком давления сгорания. Показана возможность высокоточного контроля максимального давления сгорания, углового положения пика давления и коэффициента избытка воздуха на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, процесс сгорания, электропроводность пламени, ионный ток, интегральная характеристика сигнала ионного тока, контроль параметров, угловое положение пика давления

¹ Работа выполнена при частичной поддержке:

1) гранта РФФИ "Новые методы анализа ионных токов как инструмент исследования и оптимизации работы ДВС" (теоретические исследования);

2) гранта ЮФУ "Теория и методы энергосберегающего управления распределенными системами генерации, транспортировки и потребления электроэнергии" (экспериментальные исследования).