

УДК 681.518.2

С. Ю. Боровик, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев, В. В. Тулупова

(Самара)

**ИЗМЕРЕНИЕ И ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ МНОГОМЕРНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ТОРЦОВ ЛОПАТОК В ПРОЦЕССЕ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА**

Рассматриваются методы измерения и процедуры вычисления координатных составляющих многомерных перемещений торцов лопаток в процессе вращения ротора лопаточной силовой установки. Показано расположение чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера, обеспечивающих процесс измерения. Приведена структурно-функциональная схема, иллюстрирующая одновременные (параллельные) аналоговые и последующее аналого-цифровое преобразования сигналов датчиков, а также дана графическая интерпретация процедур вычисления радиальных, осевых и угловых смещений торцов лопаток.

Введение. В работах [1–3] обоснована проблема измерения многомерных перемещений элементов конструкции в лопаточных и поршневых силовых установках и, в частности, показано, что в лопаточных силовых установках в процессе вращения ротора торцы лопаток совершают многомерные перемещения (радиальные, осевые, угловые смещения и изгибы в направлении вращения), происходят радиальные деформации и осевые смещения колеса ротора и т. п. Для измерения многомерных перемещений элементов конструкции силовых установок предлагается использовать электромагнитный метод, реализуемый с помощью одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника [4]. Предполагается, что в зоне измерений расположены несколько ОВТД, образующих кластер, с определенной ориентацией ЧЭ по отношению к элементу конструкции, например торцам лопаток. Число ОВТД в кластере определяется числом координатных составляющих (КС) в выбранной системе отсчета. В зону измерений вводятся также дополнительные датчики, регистрирующие параметры состояния среды и, в первую очередь, температуру, которая достигает 1200 °С в турбинах лопаточных силовых установок. Экспериментально определяются семейства градуировочных характеристик как функции КС и параметров среды, которые вводятся в память системы измерений, аппроксимируются (интерполируются), а при поступлении сигналов с кластера ОВТД и датчиков состояния среды путем совокупной обработки [5] обеспечивается получение измерительной информации отдельно по всем КС.

Вместе с тем описание процесса измерения КС многомерных перемещений, изложенные в [1–3], отличаются высокой степенью обобщенности и имеют концептуальный характер без какой-либо детализации и конкретиза-

ции. В то же время методы измерения КС многомерных перемещений конкретных элементов конструкции существенно зависят от особенностей силовой установки, специфики этих элементов и условий их работы. Что касается лопаточных силовых установок, то известна лишь одна публикация [6], в которой на уровне изобретения приведено описание метода измерения двух КС – радиального и осевого смещений торцов лопаток. При этом достаточно очевидна возможность использования аналогичных [6] приемов в расположении ОВТД и процедур вычисления КС для организации процесса измерений и вычислений другими методами, отличающимися числом и наименованием КС. Такие методы нашли отражение в некоторых источниках (в отчетах НИР и докладах авторов), но до сих пор не опубликованы в широкой печати.

Настоящая статья призвана восполнить существующий пробел. В ней на основе единого подхода к организации процесса измерений и вычислений рассматриваются методы измерения радиального смещения (радиального зазора (РЗ) между торцом лопатки и статором); радиального и осевого смещений (РЗ и ОС); радиального, осевого и углового смещений (РЗ, ОС и УС) торцов лопаток, т. е. одной, двух и трех КС соответственно. Предполагается, что реализация методов измерения перечисленных КС ориентирована на использование существующих аппаратно-программных средств, предназначенных для измерения РЗ и обеспечивающих преобразование сигналов ОВТД за один период вращения ротора [7].

Методы измерения КС. На рис.1, *a* схематично в двух проекциях изображены колесо ротора с лопатками, ЧЭ датчика, закрепленного на статоре, и система отсчета (X, Y, Z), начало координат которой (точка O) совмещено с центром чувствительного элемента. РЗ характеризует смещение торца лопатки по оси Y относительно ЧЭ и начала координатных осей. Штриховыми линиями показаны возможные ОС торца лопатки по координате X . Предполагается, что изгибные смещения (ИС) лопатки по оси Z (рис.1, *b*) и УС относительно оси Y (рис.1, *c*) незначительны и ими можно пренебречь.

Пусть измеряется РЗ (Y) в условиях, когда ОС отсутствуют ($X = 0$). Тогда до появления лопатки в зоне чувствительности ОВТД индуктивность датчика имеет наибольшее значение. Лопатка с номером i при вращении колеса входит в зону чувствительности датчика, и его индуктивность за счет возникновения вихревых токов в лопатке уменьшается. Когда центры торца лопатки и ЧЭ совместятся, индуктивность ОВТД будет минимальной (рис. 2).

С учетом принятых ограничений ($X = 0, Z = 0, \varphi = 0$) индуктивность

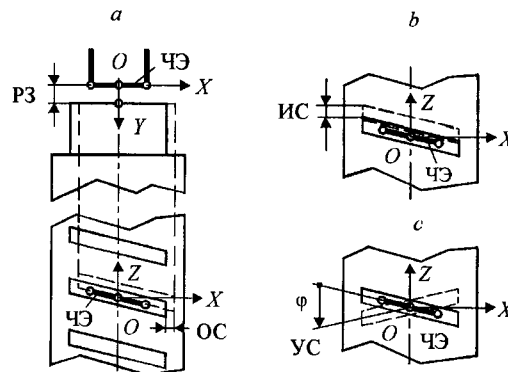
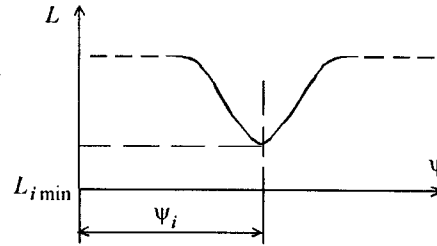


Рис. 1. Смещения торцов лопаток: радиальные и осевые (а), изгибные (b), угловые (с)

Рис. 2. Зависимость индуктивности ОВТД от угла поворота ротора ψ

($L_{i \min}$) будет зависеть только от РЗ (Y) и окружающей температуры:

$$L = f(Y, \Theta), \quad (1)$$



где L соответствует $L_{i \min}$, Θ – температура среды, окружающей ЧЭ. С увеличением Y функция (1) возрастает в рабочем диапазоне, ограниченном значениями Y_p , при любых значениях Θ .

Если теперь предположить, что измеряемой координатой является ОС (X) лопатки (см. рис. 1, *a*), величина РЗ остается постоянной ($Y = \text{const}$), ИС и УС отсутствуют ($Z = 0, \varphi = 0$), то индуктивность ОВТД будет зависеть только от ОС и температуры Θ .

Аналогично выполняются измерения ИС (Z) и УС (φ) (см. рис. 1, *b, c*), и если не учитывать перемещения ротора относительно его оси, то перечисленные измерения РЗ, ОС, ИС, УС можно считать однокоординатными.

Пусть теперь торцы лопаток в процессе вращения ротора смещаются одновременно и в радиальном, и в осевом направлении. В этом случае индуктивность ОВТД зависит от двух КС (X, Y) и измерение одним датчиком невозможно. Для измерения двух КС необходим кластер, содержащий, по крайней мере, два ОВТД. Чувствительные элементы датчиков должны быть расположены параллельно и на расстояниях по осям координат, не превышающих границ рабочих диапазонов (Y_p, X_p), с таким расчетом, чтобы контролируемая лопатка всегда находилась между ЧЭ обоих датчиков (рис. 3, *a*).^{*} В отличие от выражения (1) уравнения преобразования датчиков в составе кластера могут быть представлены в виде системы

$$\begin{aligned} L_1 &= f_1(X, Y, \Theta), \\ L_2 &= f_2(X, Y, \Theta). \end{aligned} \quad (2)$$

Если же торцы лопаток в процессе вращения ротора смещаются не только в радиальном и осевом направлениях, но одновременно наблюдаются и угловые смещения, то индуктивность ОВТД будет зависеть от трех КС (X, Y, φ) и для их измерения необходим кластер, включающий, как минимум, три ОВТД. Один из возможных вариантов размещения ЧЭ датчиков, не

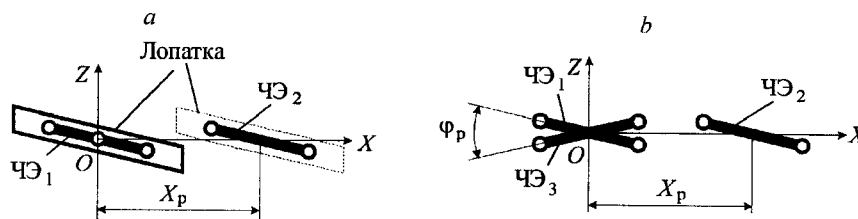


Рис. 3. Кластеры ОВТД: размещение ЧЭ при измерении РЗ и ОС (*a*), РЗ, ОС и УС (*b*)

^{*} На рис. 3, *a* ось Y , перпендикулярная плоскости $X-Z$, совмещена с началом координат и не показана (как и рабочий диапазон Y_p).

учитывающий их конструктивных особенностей и габаритных ограничений, представлен на рис. 3, *b*. Предполагается, что границы рабочих диапазонов не превышают Y_p , X_p и φ_p . Система уравнений преобразования датчиков имеет вид

$$\begin{aligned} L_1 &= f_1(X, Y, \varphi, \Theta), \\ L_2 &= f_2(X, Y, \varphi, \Theta), \\ L_3 &= f_3(X, Y, \varphi, \Theta). \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогичный подход к выбору числа ОВТД в составе кластера, их размещению в зоне измерений и ориентации ЧЭ по отношению к торцам лопаток сохраняется при других комбинациях КС и изменении их числа.

Структурно-функциональная схема. Преобразования и обработка сигналов ОВТД осуществляются с помощью аппаратно-программных средств, структурно-функциональная схема которых представлена на рис. 4, причем в отношении наиболее значимых преобразований и процедур обработки сохраняется преемственность с теми, которые применяются в известных однокоординатных системах измерений [3, 7].

Использование указанной схемы обеспечивает формирование импульсов питания измерительных схем (мостов Блумлейна, включающих ОВТД одного или нескольких кластеров), в которых одновременно (параллельно) осуществляются преобразование изменений индуктивностей датчиков (выражения (1)–(3)) в амплитуды напряжений (U_{m1}, U_{m2}, \dots), преобразование амплитуд в постоянное напряжение (U_1, U_2, \dots), коммутация и аналого-цифровые преобразования (коды $C1, C2, \dots$). Схема предусматривает также первичную цифровую обработку, включающую вычисление физических значений КС многомерных перемещений с температурной коррекцией результатов, а также вторичную обработку – накопление, хранение и представление полученных результатов. Для формирования импульсов питания, сигналов управления и для первичной обработки используются сигналы индукционного датчика частоты вращения ротора, которые предварительно преобразуются в код C_T , соответствующий периоду T_0 вращения ротора. Сигналы термомпар, горячие спаи которых размещены вблизи чувствительных элементов ОВТД, преобразуются в цифровые коды C_Θ и используются для температурной коррекции.

Работа схемы поддерживается двумя группами алгоритмов. Первая связана со сбором, преобразованием и выделением информативного сигнала, вторая – с вычислением КС (РЗ, ОС и УС).

В алгоритмах первой группы предусмотрены процедуры определения периода вращения ротора, вычисления шага дискретизации с формированием последовательности импульсов питания датчиков и управления аналоговым и аналого-цифровым преобразованиями. В результате функционирования алгоритмов в памяти фиксируются значения кодов, соответствующие минимальным значениям индуктивностей ОВТД кластера при прохождении лопаток в зоне измерений ЧЭ датчиков [7].

Процедуры вычисления КС. Как уже отмечалось, вычисление КС торцов лопаток предусматривает использование семейств градуировочных характеристик измерительных каналов, полученных экспериментально и размещенных заранее в устройствах памяти. В случае вычисления РЗ и ОС каждое семейство градуировочных характеристик представляет собой зависи-

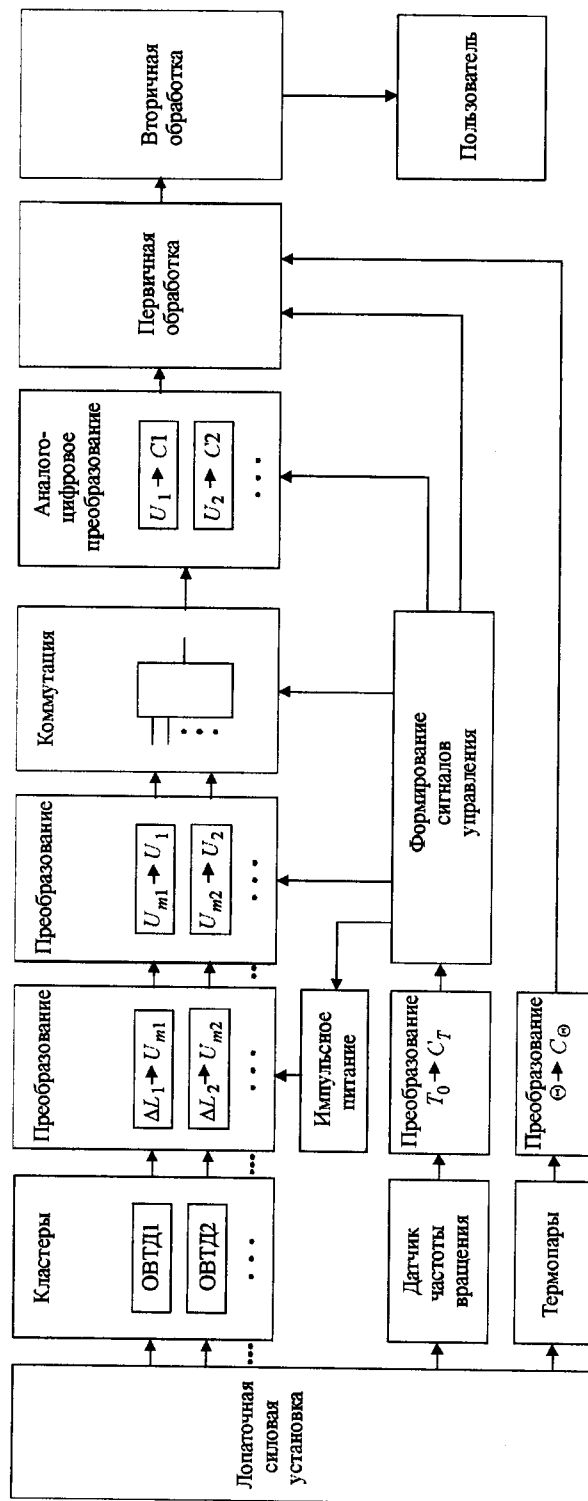


Рис. 4. Структурно-функциональная схема

мость кода ($C1$ или $C2$) от $P3(Y)$ и $OC(X)$ при фиксированных значениях температуры ЧЭ ОВТД (Θ) и выражено в форме таблицы, полученной для 8–10 значений $P3$, OC и температуры в диапазонах их изменений.

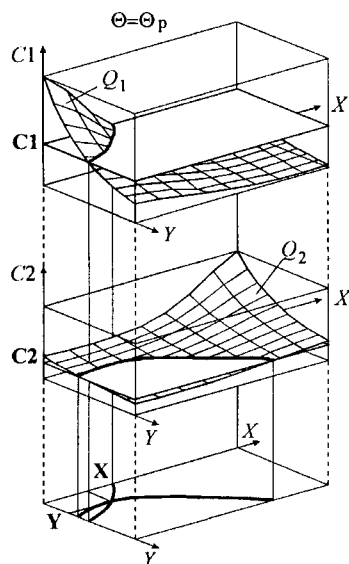
Вычислению $P3$ и OC предшествует процедура температурной коррекции, предусматривающая определение градуировочных характеристик измерительных каналов каждого датчика кластера при рабочей температуре ЧЭ датчика (Θ_p) по результатам измерения температуры и исходным семействам градуировочных характеристик, полученным экспериментально при фиксированных температурах.

Процедура вычисления $P3$ и OC сводится к решению системы уравнений в виде аппроксимированных (интерполированных) градуировочных характеристик измерительных каналов при рабочих температурах по найденным значениям кодов в каждом канале. При этом для получения решения используются геометрическая интерпретация градуировочных характеристик в трехмерном пространстве, геометрическое представление измеренных значений кодов и численный метод, базирующийся на методе секущих Ньютона [8].

После завершения алгоритма сбора, преобразования и выделения информативного сигнала в памяти сохраняются пары цифровых отсчетов (коды $C1$, $C2$) на каждую лопатку, которые соответствуют индуктивностям датчиков, входящих в состав кластера (ОВТД1 и ОВТД2). Кроме того, по окончании процедуры температурной коррекции в память вносятся вычисленные при рабочей температуре Θ_p градуировочные характеристики измерительных каналов с ОВТД1, ОВТД2, которые образуют систему уравнений

$$\begin{aligned} C1 &= F_1(X, Y), \\ C2 &= F_2(X, Y). \end{aligned} \quad (4)$$

Решение системы (4) для найденных кодов $C1$, $C2$ позволяет определить искомые координаты X , Y (OC , $P3$) для каждой лопатки. Если обратиться к геометрической интерпретации решения системы (4), то зависимости кода C



от $P3$ и OC для каждого датчика являются поверхностями Q_1 , Q_2 (рис. 5). С учетом размещения ЧЭ ОВТД1 и ОВТД2 (см. рис. 3) значению кода $C1$ на поверхности Q_1 соответствует некоторое множество точек X , Y , расположенных на линии пересечения Q_1 с плоскостью $C1$. Аналогично коду $C2$ соответствует линия пересечения плоскости $C2$ с поверхностью Q_2 . Проекция этих линий на плоскости $X-Y$ (см. рис. 5) пересекаются. Координаты точки пересечения, которые находятся указанным численным методом после ряда итераций, являются решением системы (4) и представляют собой результат измерений $P3$ и OC (Y и X).

Рис. 5. Графическая интерпретация вычислений $P3$ и OC

В процессе измерения РЗ (X), ОС (Y) и УС (φ) после завершения алгоритмов сбора, преобразования и выделения информативного сигнала в памяти фиксируются тройки цифровых отсчетов (коды $C1$, $C2$, $C3$) на каждую лопатку, которые соответствуют индуктивностям L_1, L_2, L_3 (3) датчиков в составе кластера (ОВТД1, ОВТД2, ОВТД3). Кроме того, по окончании процедуры термокоррекции (аналогичной рассмотренной) в память вносятся вычисленные при рабочей температуре Θ_p градуировочные характеристики измерительных каналов с ОВТД1, ОВТД2, ОВТД3, которые образуют систему уравнений

$$\begin{aligned} C1 &= F_1(Y, X, \varphi), \\ C2 &= F_2(Y, X, \varphi), \\ C3 &= F_3(Y, X, \varphi). \end{aligned} \quad (5)$$

Решение системы (5) позволяет для найденных кодов $C1$, $C2$, $C3$ определить значения X , Y , φ для каждой лопатки.

Если обратиться к геометрической интерпретации решения системы (5), то зависимости кода C от РЗ, ОС и УС для каждого из датчиков могут быть представлены объемами, в которых каждая точка имеет некоторую условную «плотность», количественно равную измеренному коду сигнала ОВТД (на черно-белом графике она могла бы быть представлена зависимой от величины кода степенью затемненности объемов). В рабочей области перемещений лопатка находится в зоне чувствительности трех ОВТД и, следовательно, при геометрическом совмещении объемов каждая его точка будет характеризоваться тремя значениями кодов. Можно утверждать, что при определенных ограничениях в отношении градуировочных характеристик тройке измеренных кодов в объеме отградуированного пространства будут соответствовать координаты X , Y , φ , являющиеся единственным решением системы (5).

При вычислении X , Y , φ для выбранной лопатки исходными данными являются коды сигналов датчиков $C1$, $C2$ и $C3$, а также градуировочные характеристики, полученные для рабочих температур Θ_p аналогично ранее рассмотренным при вычислении РЗ и ОС.

В плоскости $\varphi = \varphi_k = \text{const}$ уравнения системы (5) будут определяться только координатами X , Y . Это дает возможность по аналогии с «двухкоординатной» процедурой представить каждое уравнение в виде поверхностей Q_1, Q_2, Q_3 . При попарном рассмотрении Q_1, Q_2 и Q_2, Q_3 с помощью «двухкоординатной» процедуры определяются точки $X.L, Y.L$, принадлежащие линии L и являющиеся решением системы уравнений

$$\begin{aligned} C1 &= F_1(X, Y, \varphi_k), \\ C2 &= F_2(X, Y, \varphi_k). \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично находятся $X.L2, Y.L2$, принадлежащие линии $L2$ и являющиеся решением системы уравнений

$$\begin{aligned} C2 &= F_2(X, Y, \varphi_k), \\ C3 &= F_3(X, Y, \varphi_k). \end{aligned} \quad (7)$$

Перечисленные операции выполняются для всех значений φ , выбранных при градуировке ($\varphi_1, \varphi_2, \dots$). Полученные значения X, Y при φ_1 представляют

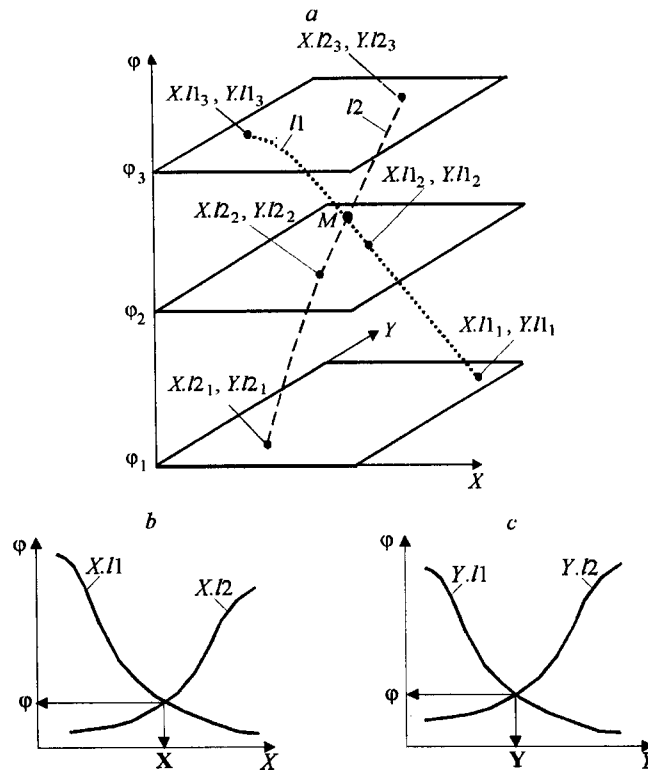


Рис. 6. Графическая интерпретация вычислений РЗ, ОС и УС: *a* – решения систем (6) и (7), линии *L1* и *L2* соответственно; *b* – проекции линий *L1* и *L2* на координатную плоскость $\varphi - X$; *c* – на координатную плоскость $\varphi - Y$

собой координаты $\varphi_1, X.П_1, Y.П_1$ и $\varphi_1, X.Л_1, Y.Л_1$ двух точек (рис. 6, *a*) на плоскости φ_1 и являются решениями соответственно систем (6) и (7). Аналогичные действия выполняются при $\varphi_2, \varphi_3, \dots$. Через пары точек $X.П_1, Y.П_1$ и $X.Л_1, Y.Л_1, X.П_2, Y.П_2$ и $X.Л_2, Y.Л_2, \dots$, лежащих на плоскостях $\varphi_1, \varphi_2, \dots$, могут быть проведены линии *L1* и *L2*, на которых лежат все значения X, Y, φ , удовлетворяющие соответственно системам (6) и (7).

Решением системы (5) будут координаты точки пересечения линий *L1* и *L2* (*M*), которые одновременно являются результатом измерения X, Y, φ . Они определяются как координаты точки пересечения проекций линий *L1, L2* на плоскостях $\varphi - X$ и $\varphi - Y$ (рис. 6, *b, c*) с помощью метода, аналогичного рассмотренному и также базирующегося на методе секущих Ньютона.

Заключение. Рассмотренные методы измерений и процедуры вычислений РЗ и ОС реализованы в системе, предназначенной для испытаний газотурбинных двигателей. Их работоспособность подтверждена при апробации системы в лабораторных и стендовых условиях, а эффективность – результатами метрологических экспериментов [3]. Полученные оценки погрешностей составляют около 7 % при изменениях РЗ и ОС в диапазонах 0–3 и 0–2 мм соответственно и изменении температуры до 900 °С. Меньшие погрешности характеризуют однокоординатные измерения: в том же диапазоне изменения РЗ они не превышают 4 %. Напротив, с увеличением числа КС до трех (РЗ, ОС и УС) и более можно ожидать увеличения погрешностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Хритин А. А. Система измерения многомерных перемещений, базирующаяся на знаниях // Распределенная обработка информации: Тр. VI Междунар. семинара. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 295.
2. Васин Н. Н., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Интеллектуализация системы измерения координатных и оценки факторных составляющих многомерных перемещений элементов конструкции силовых установок // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. Междунар. конф. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 1999. С. 242.
3. Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Системы измерений многомерных перемещений элементов конструкций лопаточных и поршневых силовых установок // Изв. Самар. науч. центра РАН. 1999. № 1. С. 77.
4. Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Хритин А. А. Вихретоковые датчики зазоров с чувствительными элементами в виде отрезка проводника // Приборы и системы управления. 1996. № 8. С. 27.
5. Вострокнутов Н. Г., Евтихийев Н. Н. Информационно-измерительная техника (теоретические основы). М.: Высш. шк., 1997.
6. Пат. 2138012 РФ. Способ измерения параметров движения лопаток ротора турбомашин /С. Ю. Боровик, С. Н. Игонин, Ю. Н. Секисов и др. Заявл. 01.11.96; Опубл. 20.09.99, Бюл. № 26.
7. Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. и др. Метод и средства измерения радиальных зазоров в газотурбинных двигателях при нестационарных режимах // Автоматика. 1998. № 3. С. 108.
8. Бронштейн И. Н., Семендяев Н. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М.: Наука, 1986.

*Институт проблем управления
сложными системами РАН,
E-mail: borovik@iccs.samara.ru*

*Поступила в редакцию
13 января 2000 г.*