

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ОДНОВИТКОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА В КАНАЛАХ ТЕРМОКОРРЕКЦИИ СИСТЕМЫ СБОРА ИНФОРМАЦИИ О МНОГОКООРДИНАТНЫХ СМЕЩЕНИЯХ ТОРЦОВ ЛОПАТОК И МЕТОД ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ¹

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук»
443020, г. Самара, ул. Садовая, 61
E-mail: borovik@iccs.ru

Приведен анализ температурной погрешности в канале термодатчика системы сбора информации о координатах смещения торцов лопаток. Получены количественные оценки этой погрешности и предложен метод ее уменьшения. Рассматривается один из возможных вариантов реализации предлагаемого метода.

Ключевые слова: канал термодатчика системы, распределенный кластер из двух одновитковых вихретоковых датчиков, температурная погрешность, модель передачи тепла, метод уменьшения погрешности.

Введение. Известно, что в системах сбора измерительной информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток в компрессорах и турбинах газотурбинных двигателей (ГТД) используются кластеры одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1, 2]. В частности, при необходимости сбора измерительной информации о радиальных и осевых смещениях кластер содержит два ОВТД, ЧЭ которых через установочные отверстия в статорной оболочке вводятся в электромагнитное взаимодействие с торцами лопаток. Система отсчета OXYZ жестко связана со статорной оболочкой, а ее начало (точка O) находится на внутренней поверхности статорной оболочки (как и обращенные к лопаткам поверхности ЧЭ). При этом радиальным смещениям соответствует координата y , определяющая важный параметр компрессора и турбины – радиальный зазор (РЗ), осевым смещениям – координата x , а вращение лопаточного колеса происходит в направлении координатной оси Z .

Выходные параметры ЧЭ (величины индуктивностей), которые определяются изменениями радиальных и осевых смещений (координатами x и y), преобразуются в цифровые коды², а затем решается система уравнений

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №11-08-01032а).

² Фиксация цифровых кодов может осуществляться в моменты прохождения замками лопаток геометрического центра (г.ц.) сосредоточенного кластера ОВТД, в моменты прохождения замками г.ц. и виртуального г.ц. в распределенном кластере ОВТД (РК ОВТД) либо в моменты времени, соответствующие минимальным значениям индуктивностей в РК ОВТД [2, 3].

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

Марина Михайловна Кутейникова, инженер.

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

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

$$\begin{cases} C_1 = f_1(x, y), \\ C_2 = f_2(x, y), \end{cases} \quad (1)$$

полученная на основе градуировочных характеристик (ГХ) измерительных каналов ЧЭ₁ и ЧЭ₂, найденных экспериментально и введенных в систему сбора заранее, а также текущих значений кодов C_1 и C_2 в тех же каналах датчиков в составе кластера [2, 3].

Однако ЧЭ ОВТД, находясь в газозвдушном тракте, подвергаются существенным температурным воздействиям – до 650 °С в компрессоре и 1500 °С в турбине, что является причиной значительных температурных изменений индуктивности ЧЭ и, как следствие, соответствующих изменений искомым координат.

Поэтому при получении измерительной информации о радиальных и осевых смещениях производится термокоррекция, предусматривающая экспериментальное определение семейств ГХ во всем диапазоне температур (Θ)

$$\begin{cases} C_1 = f_1(x, y, \Theta), \\ C_2 = f_2(x, y, \Theta), \end{cases} \quad (2)$$

а также измерение текущих значений температуры ЧЭ с помощью термопар (ТП), встроенных в ОВТД [1]. В системе предусмотрены также специальные каналы термокоррекции, в которых осуществляется нормализация сигналов ТП, преобразование в код, расчет физических значений с последующим приведением уравнений (2) к виду (1) и вычисление координат x и y с учетом текущих значений температуры [2]. Необходимо отметить, что горячий спай (ГСп) встроенной в датчик ТП находится на расстоянии около 5 мм от ЧЭ внутри тоководов (ТВ), соединяющих ЧЭ с объемным витком согласующего трансформатора (СТ), который размещен с внешней стороны статорной оболочки в зоне низких температур. В существующих системах сбора информации о координатах смещения торцов лопаток принято, что температура среды в газозвдушном тракте ($\Theta_{\text{ср}}$) равна температуре ЧЭ ($\Theta_{\text{ЧЭ}}$) и равна температуре ГСп ТП ($\Theta_{\text{ТП}}$), т. е. $\Theta_{\text{ср}} = \Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП}}$, причем это равенство сохраняется как в процессе градуировки, так и на рабочих режимах компрессора и турбины. Между тем представляется очевидным, что большой температурный перепад между средой в газозвдушном тракте и внешней по отношению к статорной оболочке воздушной средой создает тепловой поток в ТВ и, как следствие, температурный перепад на участке между ЧЭ и ГСп ТП, который определяет погрешность измерения температуры в канале термокоррекции.

Анализ литературных источников показывает отсутствие каких-либо количественных оценок таких погрешностей, и настоящая статья призвана устранить существующий пробел. Кроме того, в статье предлагается метод уменьшения выявленных погрешностей и возможность его реализации.

Погрешность измерения температуры. На рис. 1 дано схематическое и существенно упрощенное изображение ОВТД, удобное для анализа теплообмена между элементами конструкции датчика и окружающей средой. Здесь, в частности, два сосных цилиндрических ТВ, разделенных тонким слоем высокотемпературного диэлектрика, представлены как один цилиндр с внутренним радиусом r_1 и внешним r_2 . Кроме того, конструктивные особенности ОВТД и способ крепления датчика таковы, что в установочном отверстии существует воздушный зазор между ТВ и статорной оболочкой, который сводит к минимуму теплообмен между ними. Поэтому можно считать, что тепловой поток (q) не имеет каких-либо потерь по ТВ от ЧЭ до СТ в соответствии с моделью, приведенной на рис. 2.

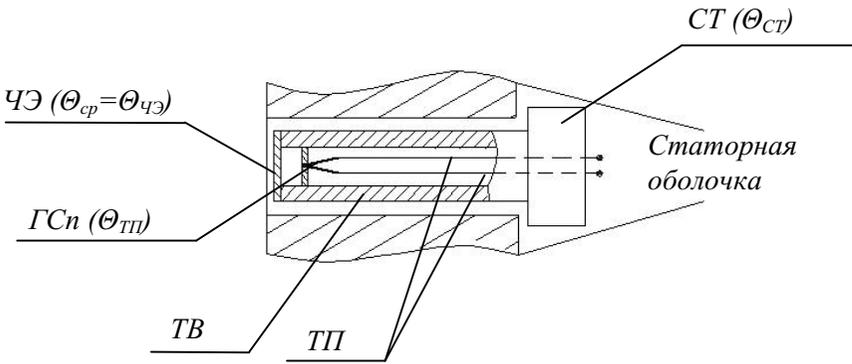


Рис. 1. Схематическое изображение ОВТД со встроенной ТП



Рис. 2. Модель передачи тепла в ТВ

Тогда выражение для теплового потока можно представить в виде

$$q = \frac{\Theta_{\text{ЧЭ}} - \Theta_{\text{СТ}}}{R}, \quad (3)$$

где R – тепловое сопротивление ТВ, которое можно представить суммой тепловых сопротивлений от ЧЭ до ГСп ТП (R_1) и от ГСп до СТ (R_2), т. е. $R=R_1+R_2$. Тепловой поток q , проходящий через тепловое сопротивление R_1 , создает на нем температурный перепад $\Delta\Theta_{R_1} = q \cdot R_1$, который определяет погрешность (Δ) измерения температуры $\Theta_{\text{ЧЭ}}$ ($\Theta_{\text{ср}}$). Используя выражение (3), искомую погрешность представим как

$$\Delta = \Delta\Theta_{R_1} = \frac{\Theta_{\text{ЧЭ}} - \Theta_{\text{СТ}}}{R_1 + R_2} \cdot R_1. \quad (4)$$

Если $\Theta_{\text{ЧЭ}}$ изменяется в диапазоне от $\Theta_{\text{ЧЭmin}}$ до $\Theta_{\text{ЧЭmax}}$, то, обозначив в выражении (4) температурный перепад $\Theta_{\text{ЧЭ}} - \Theta_{\text{СТ}} = \Delta\Theta$, можно получить приведенную погрешность в виде

$$\delta = \frac{\Delta}{\Theta_{\text{ЧЭmax}} - \Theta_{\text{ЧЭmin}}} = \frac{\Delta\Theta}{\Theta_{\text{ЧЭmax}} - \Theta_{\text{ЧЭmin}}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что δ зависит от температурного перепада $\Delta\Theta$, который определяется не только изменениями $\Theta_{\text{ЧЭ}}$ ($\Theta_{\text{ср}}$), но и изменениями температуры $\Theta_{\text{СТ}}$, причем изменения могут быть весьма существенными в турбинах, где СТ, как правило, находится не на открытом воздухе вне статорной оболочки, а под кожухом в замкнутом пространстве. При этом величина первого множителя в выражении (5) может изменяться от 0 до 1.

Второй множитель ($R_1/(R_1+R_2)$) всегда меньше 1, и его величина зависит от конструкции и размеров ТВ. Для упрощенного варианта ТВ (см. рис. 1) тепловые сопротивления

$$R_1 = \frac{l_1}{\lambda \cdot S}, R_2 = \frac{l_2}{\lambda \cdot S}, \quad (6)$$

где l_1, l_2 – длины рассматриваемых участков ТВ, $S = \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2)$ – площадь сечения, а λ – коэффициент теплопроводности материала ТВ.

После подстановки R_1, R_2 (6) в выражение (5) можно записать

$$\delta = \frac{\Delta\Theta}{\Theta_{\text{ЧЭ max}} - \Theta_{\text{ЧЭ min}}} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Если изменения $\Delta\Theta$ происходят во всем диапазоне, а $l_1 \approx 0.1 \cdot l_2$ [1], то приведенная погрешность δ не превышает 10 %. В реальных конструкциях ОВТД с более тщательным учетом их особенностей и размеров погрешность может оказаться выше (до 20 % и более).

Метод уменьшения температурной погрешности. Предлагаемый метод уменьшения рассмотренной температурной погрешности предусматривает применение дополнительной ТП, встроенной в датчик, ГСп которой размещается в конце ТВ в месте контакта с вторичным витком СТ. Метод предусматривает также расчет температуры ЧЭ ($\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ср}}$) с помощью модели передачи тепла в ТВ и измеренных значений температур в точках размещения ГСп обеих ТП. Модель передачи тепла в ТВ датчика с двумя встроенными ТП приведена на рис. 3.



Рис. 3. Модель передачи тепла в ТВ с двумя встроенными ТП

Очевидно, что в соответствии с моделью передачи тепла (рис. 3) можно записать, что температура ЧЭ определяется температурой, измеренной ТП₁ ($\Theta_{\text{ТП1}}$), и перепадом температур между ЧЭ и ГСп ТП₁, т. е. перепадом температур на тепловом сопротивлении R_1 ($\Delta\Theta_{R1}$):

$$\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП1}} + \Delta\Theta_{R1} = \Theta_{\text{ТП1}} + q \cdot R_1. \quad (8)$$

При этом тепловой поток q можно вычислить по перепаду температур на тепловом сопротивлении R_2 , найденному в результатах измерений ТП₁ и ТП₂:

$$q = \frac{\Theta_{\text{ТП2}} - \Theta_{\text{ТП1}}}{R_2}. \quad (9)$$

С учетом (9) выражение (8) примет вид

$$\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП1}} + (\Theta_{\text{ТП2}} - \Theta_{\text{ТП1}}) \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (10)$$

или, с учетом формул (6),

$$\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП1}} + (\Theta_{\text{ТП2}} - \Theta_{\text{ТП1}}) \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (11)$$

Один из возможных вариантов технических средств системы, обеспечивающей получение информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток (x -, y -координатах), в котором реализуется предлагаемый метод, представлен на рис. 4.

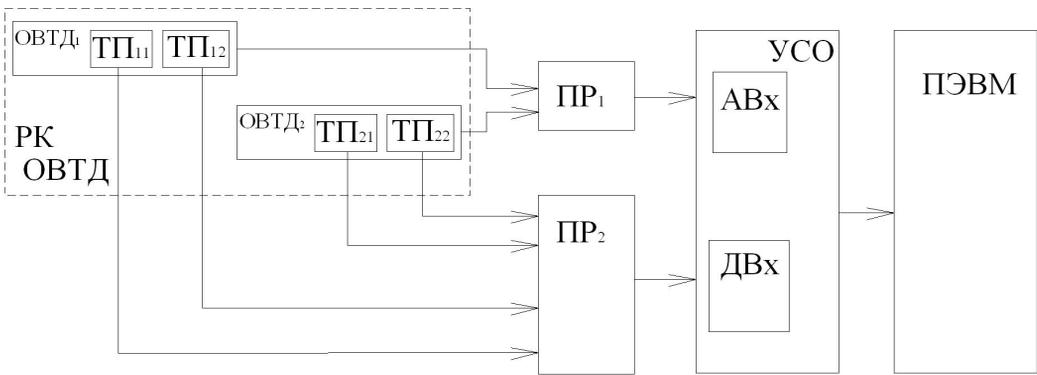


Рис. 4. Технические средства системы, реализующей предлагаемый метод

В состав технических средств входит нестандартное и фирменное оборудование. Нестандартное оборудование включает: РК из двух датчиков – ОВТД₁ с двумя встроенными термопарами ТП₁₁ и ТП₁₂, ОВТД₂ с термопарами ТП₂₁ и ТП₂₂, а также преобразователь (ПР₁) изменений индуктивностей ЧЭ обоих датчиков [2, 3].¹ Выходные напряжения ПР₁ подаются на аналоговые входы (АВх) устройства связи с объектом (УСО), где преобразуются в цифровые коды в АЦП и далее обрабатываются в ПЭВМ. В качестве УСО в рассматриваемом варианте системы можно использовать модули фирмы LCard, например E14-440.

Преобразователь ПР₂ ориентирован на сбор и обработку сигналов ТП, встроенных в ОВТД₁ и ОВТД₂ (ТП₁₁, ТП₂₁, ТП₁₂ и ТП₂₂ соответственно). Применение микропроцессорного устройства фирмы Rosemount 848Т [4] обеспечивает коммутацию, аналогово-цифровое преобразование, коррекцию температуры холодных спаев с помощью встроенного терморезистора, а также расчет физических значений температуры, которые вводятся на дискретные входы (ДВх) УСО.

Если информативными сигналами являются коды АЦП [2] в моменты прохождения торцами лопаток г. ц. и виртуального г. ц. РК ОВТД, то технические средства, приведенные на рис. 4, дополняются датчиком частоты вращения (ДЧВ) промышленного изготовления с формирователем, обеспечивающим измерение периода вращения лопаточного колеса и синхронизацию импульсов питания измерительной цепи ОВТД с меткой на валу компрессора или турбины.

Программное обеспечение системы построено на основе традиционных алгоритмов для рассматриваемого класса систем, которые включают, в частности, алгоритмы сбора измерительной информации, преобразования аналоговых сигналов в цифровые коды, предварительную обработку и вычисление координат смещений с термокоррекцией [2], причем существующие алгоритмы термокоррекции должны быть дополнены расчетом температуры ЧЭ, выполненным в соответствии с выражением (10) (или (11)) и предлагаемым методом.

Заключение. С помощью упрощенной модели передачи тепла в элементах конструкции существующих ОВТД получена количественная оценка температурной погрешности канала термокоррекции в системе сбора информации о координатах смещения торцов лопаток. Предложен метод уменьшения погрешности, предусматривающий применение дополнительной ТП, также встраиваемой в ОВТД, и расчет

¹ В РК происходит поочередная смена функций ОВТД₁ и ОВТД₂ с рабочих на компенсационные, и это позволяет использовать один преобразователь на два датчика.

температуры ЧЭ датчика по результатам измерения существующей и дополнительной ТП и модели передачи тепла. Рассмотрен один из возможных вариантов реализации предложенного метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.
2. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Л.Б. Бельский, С.Ю.Боровик, Б.К. Райков и др.; Под общ. ред. О.П. Скобелева. – М.: Машиностроение, 2011. – 298 с.
3. Бельский Л.Б., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Кластерный метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток с уменьшением влияния некоторых мешающих факторов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XIII Междунар. конф. – Самара: Изд.-во СамНЦ РАН, 2011. – С. 294-299.
4. www.rosemount.com – Rosemount 848T High Density Temperature Measurement Family

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2012 г.

THE INACCURACY OF MEASUREMENTS OF A SINGLE-COIL EDDY-CURRENT SENSOR DETECTING ELEMENT TEMPERATURE IN THERMO-COMPENSATION CHANNELS OF THE SYSTEM FOR INFORMATION ACQUISITION ABOUT BLADE TIPS MULTIDIMENSIONAL DISPLACEMENTS AND THE INACCURACY-REDUCTION TECHNIQUE

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

Institute for the Control of Complex Systems of Russian academy of sciences
61, Sadovaya st., Samara, 443020

The article consider an analysis of the temperature error in the thermo-correction channel of the system for information acquisition about blade tips displacements. Quantitative estimates of this error are obtained and inaccuracy-reduction technique is proposed. A possible implementation of the proposed method is considered.

Keywords: *thermo-correction channel of the system, a distributed cluster of two single-coil eddy-current sensors, temperature error, the model of heat transfer, method of reducing the error.*

*Sergey Yurievich Borovik (Ph.D. (Techn.)), Leading Scientist.
Marina Mihailovna Kuteynikova, Engineer.
Yuriy Nikolaevich Sekisov (Dr. Sci. (Techn.)), Director of Laboratory.
Oleg Petrovich Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Chief Scientist.*