

УДК 681.518.3

КЛАСТЕРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДАТЧИКИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.Н. Белопухов

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: bvnsam@mail.ru

С.Ю. Боровик

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: borovik@iccs.ru

П.Е. Подлипнов

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: pepodlypnov@yandex.ru

Ю.Н. Секисов

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: sekisov@iccs.ru

О.П. Скобелев

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: borovik@iccs.ru

Ключевые слова: кластерные методы, радиальные зазоры, осевые смещения, одновитковый вихретоковый датчик, самокомпенсация температурных воздействий на датчик, термическая деформация вала, рабочее колесо компрессора.

Аннотация: Рассматриваются два метода измерения радиальных зазоров между торцами лопаток и статорной оболочкой компрессора газотурбинного двигателя, в которых предусмотрена самокомпенсация температурных воздействий на каждый из одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера. Первый метод предусматривает использование двух датчиков и обеспечивает измерение радиальных зазоров при наличии осевых смещений рабочего колеса. Второй метод обеспечивает измерение радиальных зазоров на нескольких рабочих колесах, размещенных на одном валу с упорным подшипником и с учетом термической деформации вала. При этом число датчиков минимизируется и равно числу рабочих колес плюс один датчик.

1. Введение

Радиальные зазоры (РЗ) между торцами лопаток рабочего колеса (РК) и статорной оболочкой компрессора и турбины газотурбинного двигателя (ГТД) определяют его основные показатели – надежность и экономичность. Поэтому представляется очевидной необходимостью измерения РЗ в системах управления и диагностики состояния ГТД, применяемых не только в авиации, но и в энергетике и газоперекачке. При этом процесс измерения РЗ происходит в тяжелых и даже экстремальных условиях, когда только один из мешающих факторов – температура достигает более 1000 °С (в турбине). В таких условиях в ходе стендовых испытаний ГТД была подтверждена работоспособность одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника, размещаемого (через установочное отверстие в статорной оболочке) непосредственно в проточной части, причем для коррекции влияния температуры использовался аналогичный «ОВТД-свидетель», ЧЭ которого через дополнительное установочное отверстие вводился в проточную часть и в момент измерения не взаимодействовал с торцами лопаток [1, 2].

Однако вполне ожидаемы жесткие требования со стороны разработчиков ГТД к системам управления и диагностики в отношении минимизации числа установочных отверстий, предназначенных для измерения РЗ с помощью ОВТД. В работе [3] предложена самокомпенсация температурных воздействий на ОВТД при измерении РЗ, предусматривающая фиксацию экстремальных значений его информативного параметра в моменты прохождения центров межлопаточных промежутков и контролируемых лопаток в процессе вращения РК, а также вычисление их разности, не зависящей от температуры, что полностью отвечает предъявляемым требованиям.

Вместе с тем известно, что в процессе работы ГТД торцы лопаток могут совершать сложное многомерное движение. В частности, помимо смещений в радиальном направлении (определяющем величину РЗ) происходят смещения РК (а, следовательно, торцов лопаток) в осевом направлении, связанные, в том числе, с температурной деформацией вала. В работе [4] приведены результаты исследования влияния осевых смещений (ОС) на результаты измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД (в компрессоре ГТД). Показано, что погрешность измерения РЗ достигает 6% при измерениях ОС в диапазоне от 0 до ± 3 мм, причем погрешность превышает 10% при ОС до 5 мм. В работе [2] отмечается, что лучший способ избавления от таких погрешностей – это измерение самого мешающего фактора (в данном случае ОС). В работах [5, 6] приводятся описания таких методов, в которых используется кластер из двух ОВТД (ОВТД₁ и ОВТД₂), причем функции рабочего и компенсационного датчиков ОВТД₁ и ОВТД₂ выполняют поочередно. Однако качество термокомпенсации зависит от идентичности температурных характеристик обоих ОВТД, что труднодостижимо даже при использовании современных технологий изготовления датчиков.

В настоящей статье предлагается кластерный метод измерения РЗ, свободный от указанного недостатка существующих методов [5, 6], поскольку в предлагаемом методе предусмотрена независимая самокомпенсация каждого из двух ОВТД в составе кластера.

Кроме того, приводится описание вновь разработанного метода определения РЗ на нескольких (k) РК, размещенных на общем валу, один конец которого фиксирован в упорном подшипнике (УП), где ОС отсутствуют, а другой совершает ОС, связанные с термической деформацией вала. Для измерения как РЗ, так и ОС на максимально удаленном от УП k -том РК предусмотрен кластер из двух ОВТД (с самокомпенсацией температурных воздействий), а на всех остальных ($k-1$) – по одному ОВТД на каждое

РК. Рассматриваемый метод предусматривает также использование математической модели термической деформации вала, обеспечивающей вычисления локальных ОС (для остальных РК, размещенных на валу) с учетом результатов измерения ОС с помощью кластера ОВТД на k -том РК. И, наконец, результаты моделирования подставляются в уравнения преобразования каждого из $k-1$ ОВТД, что позволяет получить наиболее достоверные значения искомым РЗ на всех остальных РК.

2. Предлагаемые методы

Как уже отмечалось, в соответствии с первым из предлагаемых методов все измерительные и вычислительные операции, связанные с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД, производятся параллельно и независимо друг от друга. Это означает, что ЧЭ2 может быть смещен в направлении вращения РК на любое целое число углового шага установки лопаток на $(\Delta\Psi_{ш})$ РК.

На рис. 1 представлено изображение РК компрессора с размещением ЧЭ₁ и ЧЭ₂ распределенного кластера ОВТД¹, причем нумерация лопаток начинается с 1 и заканчивается n_l . Предполагается также, что с целью обнаружения биений РК по разности РЗ (для выбранного номера лопатки) ЧЭ₂ смещается в направлении вращения на угол $\left(\frac{n_l}{2} - 1\right) \cdot \Delta\Psi_{ш}$, где n_l - чётное число (например, 100). При этом предлагаемый кластерный метод отличается от существующих размещением геометрического центра кластера (г.ц.кл.) в геометрическом центре лопатки (г.ц.л.) с сохранением симметрии, но ограниченным по величине смещении центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ в направлении оси РК.

На том же рис. 1 в увеличенном масштабе показано размещение центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ (точки 0_1 и 0_2), системы отсчета $0XYZ$ и $0'XYZ$, где точки 0 и $0'$ - начала отсчета, которые совпадают с г.ц.л. под номерами 1 и $n_l/2$ (например, 50 при $n_l=100$), оси X и Z совпадают с направлениями оси и вращения РК соответственно, а ось Y направлена по его радиусу. Показаны также точки $0'_1$ и $0'_2$ - проекции 0_1 и 0_2 на оси X , причем точки 0 и $0'$ делят отрезки $0'_20_1$ и $0_20'_1$ соответственно на равные части. Следует также отметить, что упомянутые ранее г.ц.кл. находятся в точках 0 и $0'$ (совмещенных с г.ц.л. под номерами 1 и $n_l/2$, а также началами систем отсчета $0XYZ$ и $0'XYZ$).

По аналогии с известными кластерными методами для определения РЗ и ОС (координат y и x) необходимо получение семейства функций преобразования (ФП) в виде зависимостей $\Delta L_{СТ1}^{ext}(x, y)$ и $\Delta L_{СТ2}^{ext}(x, y)$, которые согласно [3] определяются как разности экстремальных значений $L_{СТ1(II)}^{ext}(z)$ и $L_{СТ1(I)}(z)$, а также $L_{СТ2(II)}(z)$ и $L_{СТ2(I)}(z)$ в положениях РК II и I соответственно ($L_{СТ}$ - эквивалентная индуктивность первичной обмотки согласующего трансформатора (СТ)², положению РК II соответствует прохождение ЧЭ межлопаточным промежутком, а положению РК I – контролируемой лопаткой).

¹ Термины «распределенный кластер», «геометрический центр лопатки (г.ц.л.)», использовались в монографии [2] при систематизированном описании кластерных методов измерения координат смещения торцов лопаток и в журнальных публикациях.

² Вторичная обмотка СТ – это объемный виток, связанный безиндуктивными токовыми с ЧЭ [1, 2].

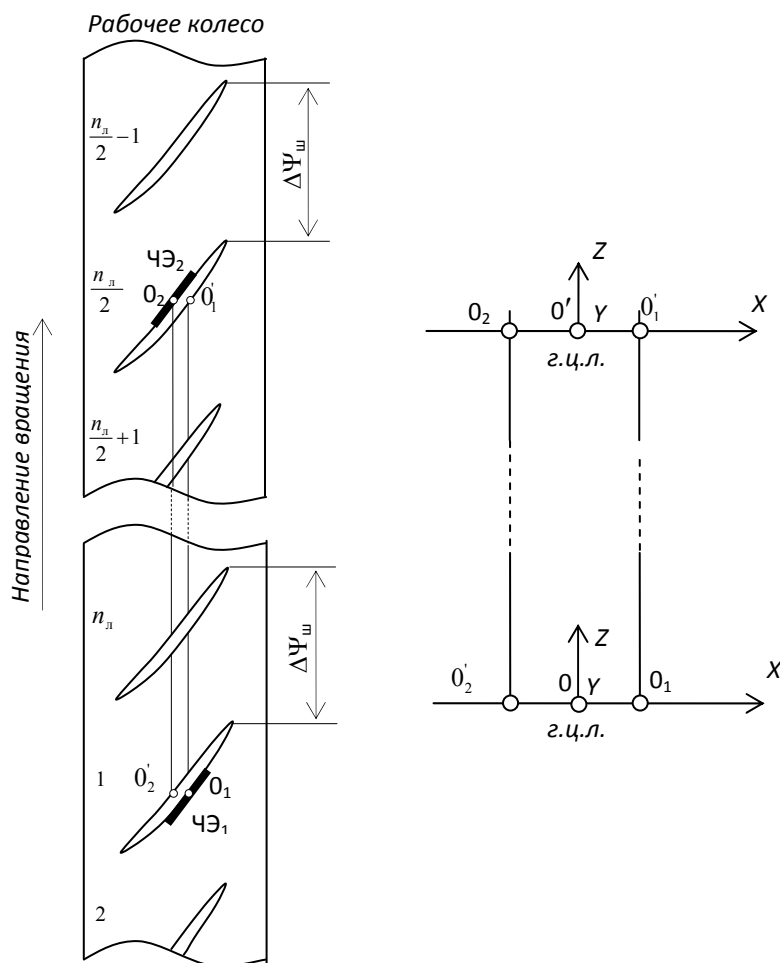


Рис. 1. Размещение ЧЭ₁ и ЧЭ₂ распределенного кластера ОВТД, а также системы отсчета 0XYZ, 0'XYZ и г.ц.л. (г.ц.кл.) в увеличенном масштабе.

Найденные ФП используются в системе уравнений

$$(1) \quad \begin{cases} \Delta L_{CT1}^{ext} = \Delta L_{CT1}^{ext}(x, y) \\ \Delta L_{CT2}^{ext} = \Delta L_{CT2}^{ext}(x, y) \end{cases},$$

где ΔL_{CT1}^{ext} и ΔL_{CT2}^{ext} - текущие значения разности экстремальных значений эквивалентных индуктивностей первичных обмоток СТ, для которых определяются искомые координаты путем решения системы уравнений (1).

Следует отметить, что ни числом ОВТД в составе кластера, ни числом соответствующих установочных отверстий рассматриваемый метод не отличается от ближайших существующих аналогов [5, 6]. Его единственное преимущество – это отсутствие необходимости в подборе идентичных пар ОВТД, от которых зависит качество компенсации температурных воздействий на ОВТД. Однако полезность его применения наиболее очевидна при необходимости измерения РЗ на нескольких РК, размещенных на одном валу при наличии ОС (x), связанных с термической деформацией этого вала.

Пусть с целью упрощения предполагается равномерный нагрев вала от УП, где ОС отсутствуют (x=0), до конца вала (рис. 2). Если число РК на валу равно **k** и деформация вала в месте размещения РК_k составляет x_k , то деформация в месте размещения РК₁ составит $x_1 = \frac{x_k}{k} = \Delta x$, $x_2 = 2 \cdot \Delta x$ и т.д. В месте размещения РК_{k-1}: $x_{k-1} = (k-1) \cdot \Delta x$.

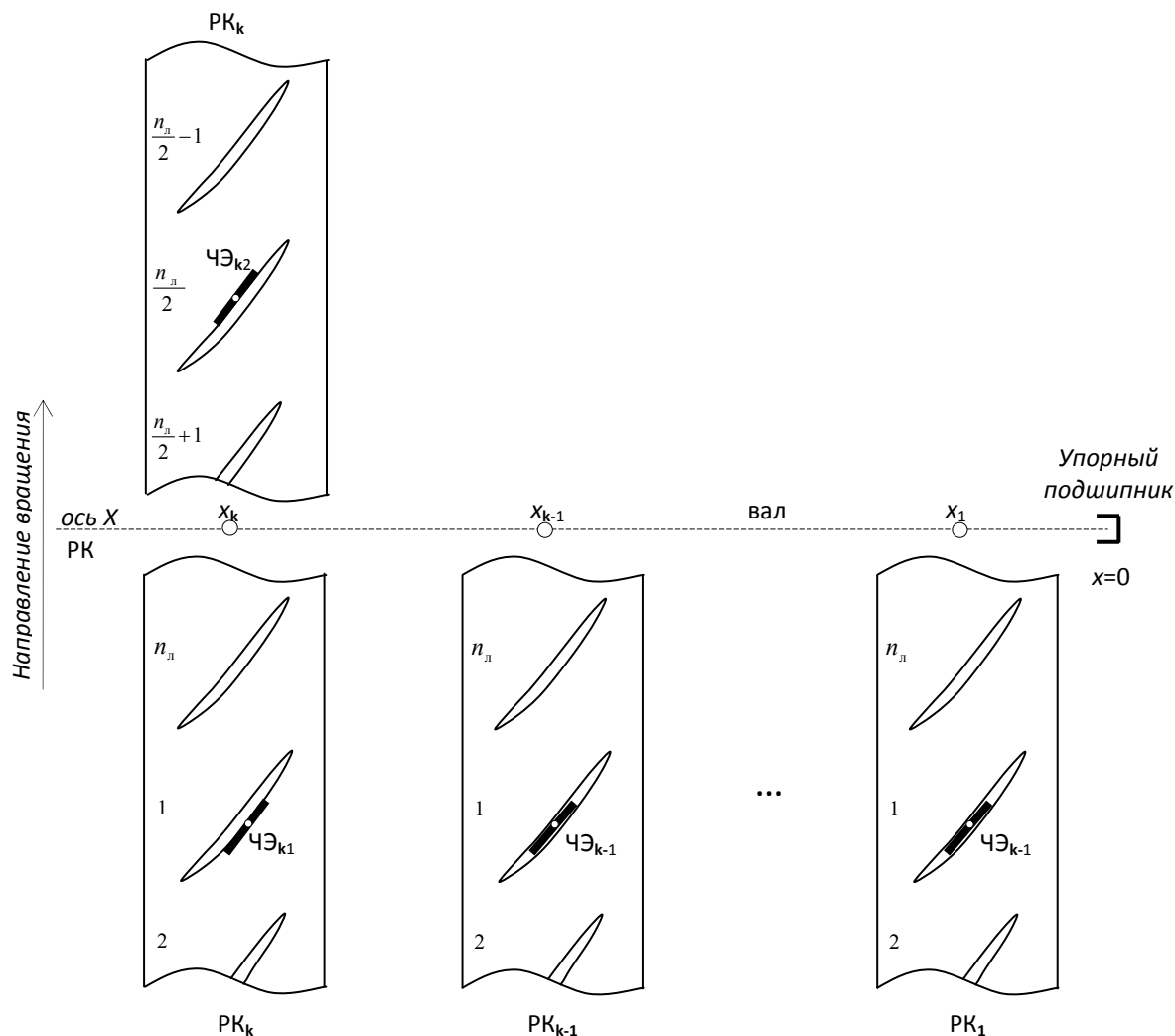


Рис. 2. Размещение ЧЭ ОВТД на РК₁, ..., РК_{k-1}, РК_k.

Тогда для решения задачи измерения РЗ достаточно $k+1$ ОВТД, включая кластер из двух ОВТД на РК_k. На остальных РК (их число $k-1$) размещены по одному ОВТД с самокомпенсацией температурных воздействий на каждом из них. ФП ОВТД₁, ОВТД₂, ..., ОВТД_{k-1} имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \Delta L_{CT1}^{ext} &= \Delta L_{CT1}^{ext}(x_1, y_1), \\
 \Delta L_{CT2}^{ext} &= \Delta L_{CT2}^{ext}(x_2, y_2), \\
 &\dots \\
 \Delta L_{CT(k-1)}^{ext} &= \Delta L_{CT(k-1)}^{ext}(x_{(k-1)}, y_{(k-1)}).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Семейство ФП кластера ОВТД_{k1} и ОВТД_{k2} можно записать в виде системы уравнений, аналогичной (1):

$$\begin{cases}
 \Delta L_{CTk1}^{ext} = \Delta L_{CTk1}^{ext}(x_k, y_k) \\
 \Delta L_{CTk2}^{ext} = \Delta L_{CTk2}^{ext}(x_k, y_k)
 \end{cases}
 \tag{3}$$

В результате решения системы уравнений (3) определяются x_k и y_k . По x_k определяется Δx и далее, в соответствии с принятой моделью равномерного нагрева вала – его локальные деформации x_1, x_2, \dots, x_{k-1} , а затем, из уравнений (2) по ранее найденным $\Delta L_{CT1}^{ext}, \Delta L_{CT2}^{ext}, \dots, \Delta L_{CTk-1}^{ext}$, вычисляются искомые РЗ – y_1, y_2, \dots, y_{k-1} .

Вместе с тем, необходимо особо отметить, что в реальных условиях происходит неравномерный нагрев вала с размещенным набором РК. В этой связи необходима более достоверная модель термической деформации. При этом результаты решения системы (3), равно как результаты измерения температуры встроенными термодатчиками в ОВТД₁, ОВТД₂, ..., ОВТД_{k-1} [1, 2] используются для коррекции результатов моделирования и в конечном счете для повышения точности вычисления x_1, x_2, \dots, x_{k-1} , а также искомым РЗ y_1, y_2, \dots, y_{k-1} . Необходимо также подчеркнуть, что совокупность всех перечисленных операций включая моделирование, и особенности размещения ОВТД рассматриваются авторами как еще один кластерный метод измерения РЗ.

3. Заключение

Предложены два кластерных метода измерения РЗ. Отличительная особенность первого – самокомпенсация температурных воздействий на каждый из двух ОВТД в составе кластера, а также отсутствие недокомпенсации таких воздействий, характерных для существующих кластерных методов. Второй метод обеспечивает измерение РЗ на нескольких РК, размещенных на одном валу с УП. При этом число ОВТД (и соответствующих установочных отверстий) минимизировано и равно числу РК плюс один датчик, что достигается благодаря моделированию локальных деформаций вала в местах размещения РК с последующей коррекцией его результатов по результатам измерений ОС максимально удаленного от УП РК, а также измерений температуры встроенными в ОВТД термодатчиками.

Список литературы

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 / Под общ. ред. О.П. Скобелева. М.: Машиностроение, 2011. 298 с.
3. Белоухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Способ измерения радиальных зазоров в газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик // Датчики и системы. 2018. № 4. С. 53-59.
4. Кутейникова М.М., Подлипов П.Е. Влияние осевых смещений рабочего колеса турбомшины на результаты измерения радиальных зазоров при использовании самокомпенсации температурных воздействий на датчик // Вестник СамГТУ. Серия: технические науки. 2017. № 4 (56). С. 76-83.
5. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., 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.
6. 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.