

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 681.518

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

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

*Институт проблем управления сложными системами РАН,
443020, г. Самара, ул. Садовая, 61
E-mail: borovik@iccs.ru*

Представлен новый метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с помощью распределённого кластера из двух одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительными элементами в виде отрезка проводника. Рассматриваются основные отличительные особенности метода и результаты экспериментальных исследований семейств градуировочных характеристик обоих датчиков, которые подтверждают повышение чувствительности к изменениям радиальных смещений и расширение диапазона измерений осевых смещений по сравнению с существующим методом.

Ключевые слова: радиальные и осевые смещения, торцы лопаток сложной формы, одновитковый вихретоковый датчик, повышение чувствительности, расширение диапазона измерений.

Введение. Известно, что торцы лопаток в проточной части компрессора и турбины газотурбинного двигателя (ГТД) совершают многомерное движение, причиной которого, наряду с вращением, являются термические и упругие деформации [1, 2]. Смещения в радиальном направлении приводят к изменениям радиальных зазоров (РЗ) между торцами лопаток и статором, что оказывает существенное влияние на экономичность и надёжность ГТД [1–3]. Для разработчиков ГТД представляет очевидный интерес измерительная информация, полученная при экспериментальных исследованиях в процессе доводочных испытаний ГТД, не только о смещениях торцов лопаток в радиальном, но и в направлении оси лопаточного колеса (ЛК) и статора, в направлении вращения ЛК и др. При этом сбор измерительной информации происходит в тяжёлых и даже экстремальных условиях: при температуре свыше 1000 °С в проточной части турбины, при линейных скоростях лопаток близких к скорости звука, высоких уровнях вибраций и загрязнённости.

Известно также, что надёжное функционирование в таких условиях обеспечивают одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника, выполненные из тех же сортов стали, что и лопатки, с применением современных технологий [4]. Использование кластерных методов, предусматривающих применение групп (кластеров) одинаковых ОВТД с заданной топологией размещения ЧЭ относительно торцевой части лопаток, а также специальной цифровой обработки данных с датчиков, позволяет найти все составляющие искомого смещения (т. е. координатные составляющие в системе отсчёта $OXYZ$), если число составляющих (координат) равно числу ОВТД в составе кластера. Как правило, начало системы отсчёта (точка O) находится на внутренней поверхности статора, ось X направлена по оси ЛК и статора, ось Y — по радиусу ЛК, а ось Z — по ходу вращения ЛК. Тогда координата x точки, выбранной на торцевой поверхности лопатки, характеризует осевые смещения, y — РЗ, z — смещения в направлении вращения. Следует отметить, что всё разнообразие кластерных

методов [5] ориентировано на применение в компрессорах, лопатки которых имеют сравнительно невысокую кривизну поверхности пера и достаточно простую форму торцевой части, находящейся в электромагнитном взаимодействии с ЧЭ ОВТД.

В отличие от компрессора для лопаток современных и перспективных турбин характерна высокая степень кривизны поверхности и сложная форма торцевой части, которую определяют выступы поверхностей пера лопатки над «дном», обращённым к статору.

В работе [6] приведено описание кластерного метода измерения радиальных и осевых смещений торцов таких лопаток, а также средств, его реализующих. Этот метод предусматривает применение распределённого кластера (РК) из двух ОВТД, сдвиг РК в сторону хвостовой части лопаток, а также разворот ЧЭ на угол $30\text{--}60^\circ$ против часовой стрелки относительно направления вращения ЛК (координатной оси Z). При таком размещении РК электромагнитное взаимодействие ЧЭ и торца лопатки ограничивается хвостовой частью, где кривизна поверхности пера лопатки и её толщина значительно меньше, чем в средней и тем более в головной части. С уменьшением толщины сокращается и расстояние между выступами, а следовательно, и влияние выступов на изменения индуктивностей ЧЭ.

Если вращение ЛК равномерное, то прохождение выбранной лопаткой каждого из ЧЭ сопровождается уменьшением и последующим увеличением индуктивностей L во времени, равно как аналогичными её изменениями по оси Z , причём минимальные значения функций $L(t)$ и $L(z)$ (согласно описанию метода в работе [6]) — информативные параметры (для первого (ЧЭ₁) — это $L_{1\min}$, для второго (ЧЭ₂) — $L_{2\min}$).

Однако указанные размещение РК ОВТД и разворот ЧЭ являются причиной снижения чувствительности к смещениям торца лопатки в радиальном направлении (координата y и R_3). Кроме того, требование монотонного характера изменений информативного параметра от осевых смещений, предъявляемое последующей цифровой обработкой данных, в свою очередь, ведёт к сужению диапазона изменений осевых смещений (координаты x) до ± 1 мм [6].

В данной работе предлагается метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, обеспечивающий повышение чувствительности к радиальным смещениям и расширение диапазона измерений осевых смещений. Приводятся результаты исследований, подтверждающие преимущества этого метода перед существующим.

Предлагаемый метод. На рис. 1 изображена торцевая часть турбинной лопатки. Из-за выступов в торцевой части сечения имеют U-образную форму, причём расстояние

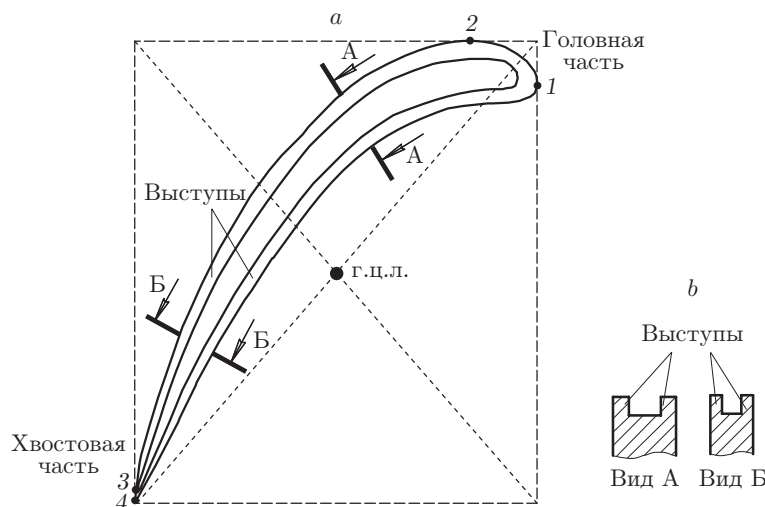


Рис. 1. Вид турбинной лопатки со стороны статора: условный г.д.л. (а) и сечения лопатки (б)

между выступами (отмечалось во введении) зависит от толщины лопатки и уменьшается от головной её части к хвостовой, как и кривизна поверхности пера лопатки. Кроме того, на рисунке показан условный геометрический центр лопатки (г.ц.л.), находящийся в точке пересечения диагоналей прямоугольника, в который вписывается лопатка, точнее контурная линия, соответствующая её поверхности, видимая со стороны статора (1–4 — точки касания контурной линии сторон прямоугольника).

В предлагаемом методе, как и в существующем [6], для измерений радиальных и осевых смещений предусмотрено использование РК из двух ОВТД. Центры ЧЭ (ЧЭ₁ и ЧЭ₂) находятся на угловом расстоянии друг от друга $1,5\Psi_{\text{л}}$, где $\Psi_{\text{л}}$ — угловой шаг установки лопаток.

Следует отметить, что в соответствии с представленным на рис. 2, а положением лопаток 1, 2, ..., $n_{\text{л}} - 1, n_{\text{л}}$ ЧЭ₁ выполняет рабочие функции (ЧЭ₁-Р), а ЧЭ₂ — компенсационные (ЧЭ₂-К). Центр ЧЭ₁ обозначен O_1 , центр ЧЭ₂ — O_2 , и угловое расстояние между ними также составляет $1,5\Psi_{\text{л}}$.

В увеличенном виде размещение центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ показано на рис. 2, б. Там же представлены две системы отсчёта $OXYZ$ и $O'XYZ$, начало первой совпадает с г.ц. кластера (точка O), а начало второй — с его виртуальным г.ц. (в.г.ц., точка O') [5].

Поскольку предлагаемый метод призван в первую очередь обеспечить более высокую чувствительность к изменениям радиальных смещений (координаты y и R_3), то для решения этой задачи представляется необходимым размещение ЧЭ РК ОВТД вблизи условного г.ц.л. и даже дополнительный сдвиг вправо от него (в сторону головной части). При этом ЧЭ должны быть развёрнуты по часовой стрелке до локальной «квазипараллельности» контурным линиям поверхностей пера лопатки (см. рис. 2, а). При таком размещении РК и таком развороте ЧЭ наблюдается эффект «двоения» минимальных значений индуктив-

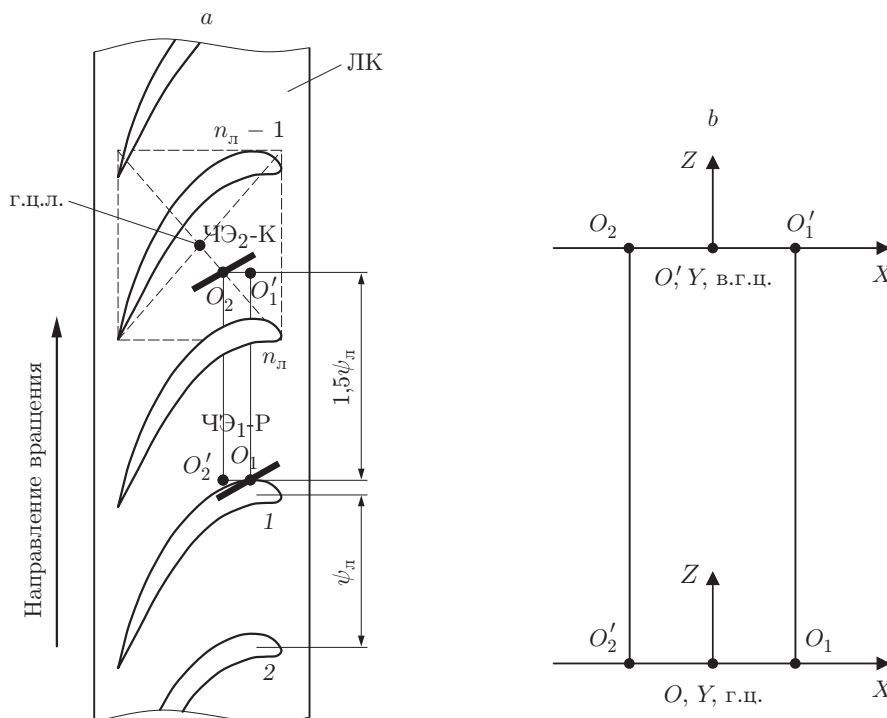


Рис. 2. Размещение ЧЭ в РК ОБТД в соответствии с предлагаемым методом: разворот ЧЭ относительно направления вращения ЛК (а), г.ц. и в.г.ц. РК, а также системы отсчёта $OXYZ$ и $O'XYZ$ (б)

ностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ ($L_{1\min}$ и $L_{2\min}$), связанный со специфической формой сечений А и Б (выступами в торцевой части лопаток (см. рис. 1)), но в отличие от существующего в предлагаемом методе этот эффект не устраняется, а, напротив, используется для получения повышенной чувствительности к радиальным смещениям (координате y и РЗ).

Рис. 3 иллюстрирует влияние осевых смещений x на характер изменений индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ во времени ($L_1(t)$ и $L_2(t)$). Аналогичный характер имеют зависимости индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ от координаты z ($L_1(z)$ и $L_2(z)$).

В исходном положении РК ОВТД относительно условного г.ц.л. путём юстировки угла разворота обоих ЧЭ добиваются хотя бы приближённого равенства минимальных значений индуктивностей $L_{11\min}$ и $L_{12\min}$, $L_{21\min}$ и $L_{22\min}$ в моменты времени $t_{11\min}$ и $t_{21\min}$, $t_{12\min}$ и $t_{22\min}$ соответственно (рис. 3, а).

Вместе с тем результаты исследований влияния смещения лопатки вдоль оси X в сторону отрицательных значений координаты x показали увеличение первого из двух минимальных значений индуктивностей как ЧЭ₁, так и ЧЭ₂ ($L_{11\min}$ и $L_{21\min}$) по сравнению со вторым ($L_{12\min}$ и $L_{22\min}$) (рис. 3, б). Более того, при дальнейшем смещении лопатки в том же направлении процесс увеличения $L_{11\min}$, $L_{21\min}$ замедляется, эффект дробления постепенно исчезает, и характер изменений индуктивностей обоих ЧЭ становится иден-

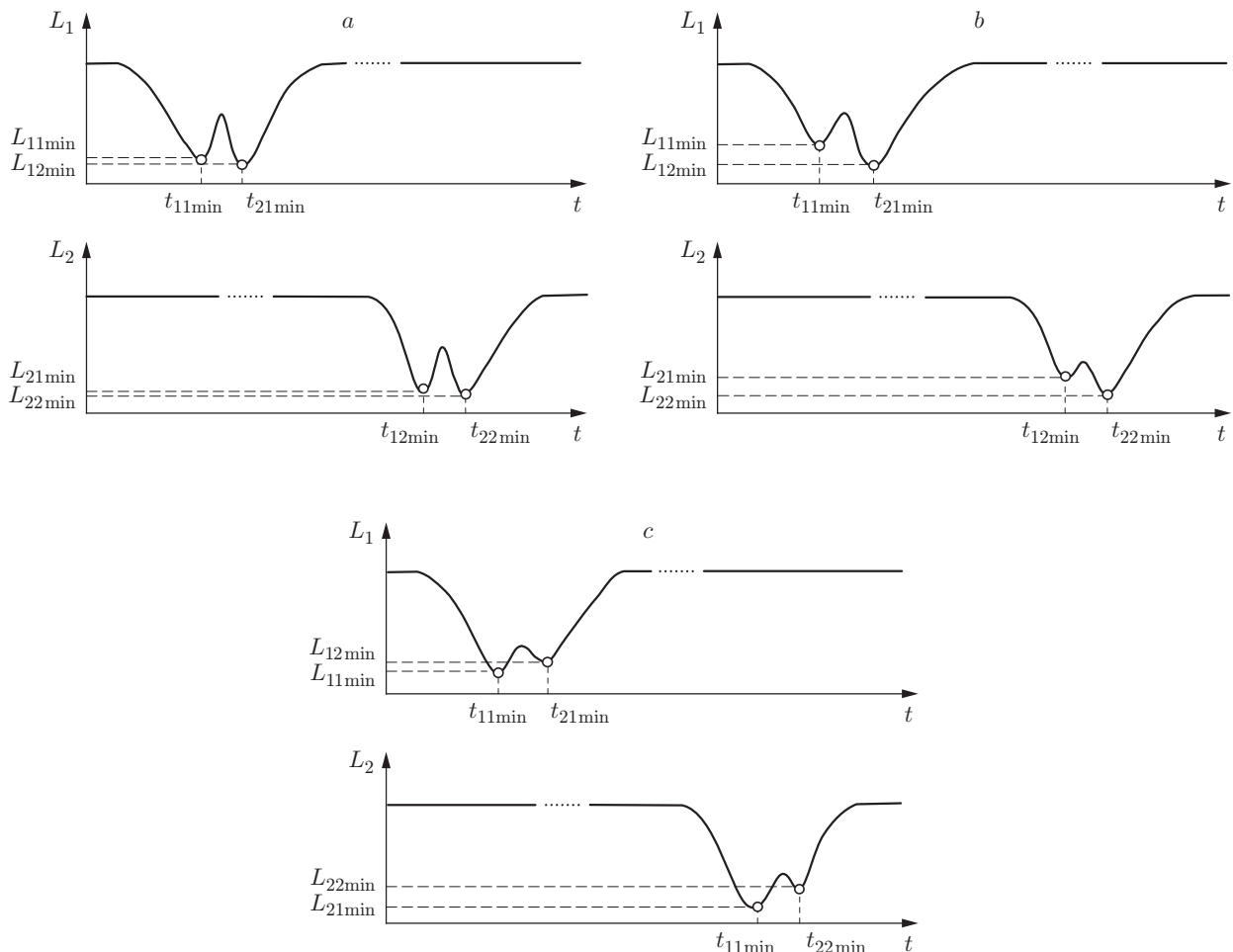


Рис. 3. Изменения индуктивностей L_1 и L_2 во времени: в исходном положении РК относительно условного г.ц.л. (а), при смещении лопатки вдоль оси X в отрицательном (б) и в положительном (с) направлениях

тичным тем, что наблюдаются в существующем методе [6, 7]. При этом электромагнитное взаимодействие ЧЭ и лопатки происходит в её головной части, а характер изменений индуктивностей $L_1(t)$ и $L_2(t)$ определяет суммарное действие таких параметров, как «угол встречи» ЧЭ с линией контуров поверхностей пера лопатки и кривизна поверхности пера, ширина выступов и их высота и другие, среди которых трудно выделить параметр с доминирующим влиянием.

Результаты исследования влияния смещения лопатки в противоположном направлении (в сторону положительных значений координаты x) выявили увеличение второго из двух минимальных значений ЧЭ₁ и ЧЭ₂ ($L_{12\min}, L_{22\min}$) (рис. 3, *с*) с последующим исчезновением эффекта двоения. При этом электромагнитное взаимодействие ЧЭ происходит с той частью лопатки, которая приближается к её «хвосту».

Таким образом, при смещениях в широком диапазоне изменений координаты x от отрицательных значений до положительных происходит «конкуренция» минимальных значений индуктивностей и смена «лидера» в окрестностях координаты $x = 0$. В этой связи в предлагаемом методе информативным параметром принято считать наименьшее из двух минимальных значений индуктивности. Если же оба минимума окажутся равными, то они имеют и равные права на признание информативными, а потому не имеет значения, какой из них будет выбран.

Величина смещения РК ОБТД и угол разворота ЧЭ уточняются с помощью моделирования или экспериментально и зависят от конкретных конструктивных разновидностей лопаток.

Известно также, что в процессе моделирования семейство функций преобразования ЧЭ в составе РК из двух ОБТД представляется в виде зависимостей индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ от координат смещений торцов лопаток x и y ($L_1(x, y), L_2(x, y)$) [8]. При экспериментальных исследованиях те же функции, которые принято называть градуировочными характеристиками (ГХ), представляются семейством индуктивностей первичных обмоток согласующих трансформаторов (СТ) ОБТД $L_{СТ1}(x, y), L_{СТ2}(x, y)$, где в упрощённом виде связь между индуктивностями первичных обмоток СТ и ЧЭ выражается формулой $L_{СТ} = n^2 L$ ($n = w_1/w_2$, w_1, w_2 — число витков, причём $w_2 = 1$ [4]).

В системе измерения, реализующей существующий метод, для вычисления координат x, y используется семейство ГХ, полученное экспериментально и представляющее зависимости цифровых кодов $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$, соответствующие $L_1(x, y)$ и $L_2(x, y)$ или $L_{СТ1}(x, y)$ и $L_{СТ2}(x, y)$. На основе ГХ и текущих значений кодов (C_1 и C_2), соответствующих индуктивностям $L_{1\min}$ и $L_{2\min}$ в моменты времени $t_{1\min}$ и $t_{2\min}$, составляется и решается система двух уравнений с двумя неизвестными (x, y):

$$\begin{cases} C_1 = C_1(x, y), \\ C_2 = C_2(x, y). \end{cases}$$

Решению этой системы уравнений обычно предшествует аппроксимация ГХ полиномиальными функциями двух переменных. Если соблюдается условие монотонности ГХ в заданном диапазоне изменений искоемых координат, то их вычисление проводится с помощью алгоритма на основе метода Ньютона [4, 5].

Аналогичный подход применяется и в системах измерения, реализующих предлагаемый метод. Однако в отличие от существующего такой метод предусматривает фиксацию кодов C_1 и C_2 при получении семейства ГХ, а также текущих значений кодов C_1 и C_2 , соответствующих минимальным значениям индуктивностей из двух минимумов ЧЭ₁ ($L_{11\min}$ и $L_{12\min}$) и ЧЭ₂ ($L_{21\min}$ и $L_{22\min}$) (см. рис. 3). Следует также подчеркнуть, что в широком диапазоне изменений координаты x возможна потеря монотонности ГХ

($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$) и аппроксимирующих их функций. При этом система уравнений становится неразрешимой для алгоритмов на основе метода Ньютона. В работе [9] приведено описание алгоритма, обеспечивающего решение системы уравнений, в котором снимаются требования монотонности функций $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$. Разумеется, этот алгоритм не ограничивается реализациями предлагаемого метода, а может быть использован в реализациях существующего и других кластерных методов [5] для расширения диапазонов изменений координаты x .

Экспериментальные исследования. Как уже отмечалось, согласно предлагаемому методу в процессе вращения ЛК (в направлении оси Z) наблюдается эффект двоения минимальных значений индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ (см. рис. 3), причём минимумам $L_{11\min}$ и $L_{21\min}$ соответствуют моменты времени $t_{11\min}$ и $t_{21\min}$, а $L_{12\min}$ и $L_{22\min}$ — $t_{12\min}$ и $t_{22\min}$, при равномерном же вращении ЛК указанным значениям индуктивностей и моментам времени будут соответствовать координаты $z_{11\min}$ и $z_{21\min}$, $z_{12\min}$ и $z_{22\min}$. Это означает, что последующие эксперименты должны обнаружить наличие двух минимумов функций $L_1(z)$ и $L_2(z)$ или $L_{СТ1}(z)$ и $L_{СТ2}(z)$, а затем, фиксируя наименьшее из них и получив семейства ГХ ($L_{СТ1}(x, y)$ и $L_{СТ2}(x, y)$), подтвердить ожидаемую эффективность предлагаемого метода в отношении повышения чувствительности и расширения диапазона измерений (при заданных углах разворота обоих ЧЭ на 60° от оси Z (по часовой стрелке), смещении г.ц. и в.г.ц. РК от г.ц.л. на 2 мм в сторону головной части лопатки и угловом положении хорды лопатки — 37° от оси Z).

Для проведения экспериментальных исследований использовалась конструкция ОВТД с диаметром тоководов и длиной ЧЭ около 10 мм, предназначенная для применения в турбинах. Её особенность состоит в том, что СТ выполнен на ферритовом сердечнике с точкой Кюри до 450°C и рассчитан на работу при повышенных температурах вне статора (под кожухом) [6]. Расстояние между проекциями центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ (центров установочных отверстий) на ось X составляет 2 мм (координаты точек O_1 и O'_2 (см. рис. 2, b) $x = \pm 1$ мм, $y = 0$, $z = 0$). Кроме того, в экспериментах использовалась реальная турбинная лопатка и её координаты определялись положением центра выходной кромки хвостовой части лопатки с помощью трёхмерного градуировочного устройства, оснащённого индикаторами перемещений с разрешающей способностью 10 мкм. Индуктивность первичной обмотки СТ ОВТД измерялась прибором промышленного изготовления Е7-12 (измерителем параметров R, L, C с цифровым отсчётом). Методика проведения экспериментов для получения семейства ГХ предусматривала размещение датчика в одно из двух установочных отверстий, предназначенное для ОВТД₁ или ОВТД₂ с центрами в точке O_1 или O_2 (см. рис. 2). Градуировочное устройство обеспечивало смещение лопатки относительно ЧЭ под контролем индикаторов по каждой из трёх координатных осей (X, Y, Z). При этом в процессе эксперимента фиксировалась одна из координат (например, x), а в диапазоне изменений другой (y) выбирался ряд значений, для каждого из которых повторялась процедура поиска минимального значения из двух минимумов индуктивности первичной обмотки СТ ОВТД₁ по оси Z . Процедура повторялась для ряда значений координаты x в диапазоне её изменений. В итоге формировался массив измеренных значений индуктивностей, которые определяют функцию $L_{СТ1}(x, y)$. Далее датчик переносился в установочное отверстие, предназначенное для ОВТД₂ с центром в точке O_2 (см. рис. 2), и путём аналогичных действий определялась функция $L_{СТ2}(x, y)$.

Экспериментальные исследования семейства ГХ проводились в диапазонах изменений x от -6 до $+6$ мм и y от $0,5$ до $1,5$ мм.

На рис. 4 в безразмерном виде представлены индуктивности первичных обмоток СТ ОВТД₁ и ОВТД₂ в зависимости от координаты z , где $\bar{L}_{СТ1}$ и $\bar{L}_{СТ2}$ определяются отношением измеренных текущих значений индуктивностей к значению индуктивности при $y \rightarrow \infty$, $x \rightarrow \infty$ (лопатка удалена от ЧЭ на большое расстояние). При этом в обоих семействах

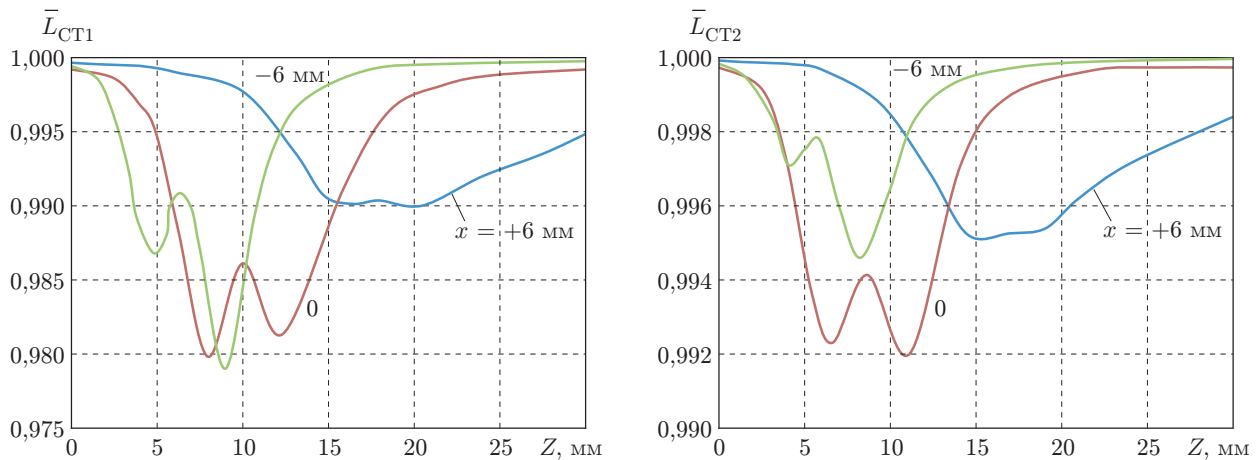


Рис. 4. Семейства функций $\bar{L}_{CT1}(z)$ и $\bar{L}_{CT2}(z)$

функций $\bar{L}_{CT1}(z)$ и $\bar{L}_{CT2}(z)$ изображены по три графика для x равного -6 ; 0 ; $+6$ мм при одном значении y равном $0,5$ мм. Полученные графики подтверждают эффект двоения при отрицательном и нулевом значениях x , причём характер измерений индуктивности $L_{CT}(z)$ соответствует изменениям индуктивностей $L(t)$ на рис. 3, *a, b*. Однако при выбранном положительном значении $x = +6$ мм наблюдаемый эффект ослабляется, но проявляется в виде, аналогичном рис. 3, *c*, уже при положительных значениях x менее 5 мм.

На рис. 5, *a* представлено семейство ГХ ($\bar{L}_{CT1}(x, y)$ и $\bar{L}_{CT2}(x, y)$), полученное в процессе экспериментальных исследований при заданных координатах x (в диапазоне от -5 до $+5$ мм) и y ($0,5$; $1,0$; $1,5$ мм), в которых осуществлялось фиксирование минимальных значений \bar{L}_{CT1} и \bar{L}_{CT2} из двух минимумов (в соответствии с предлагаемым методом).

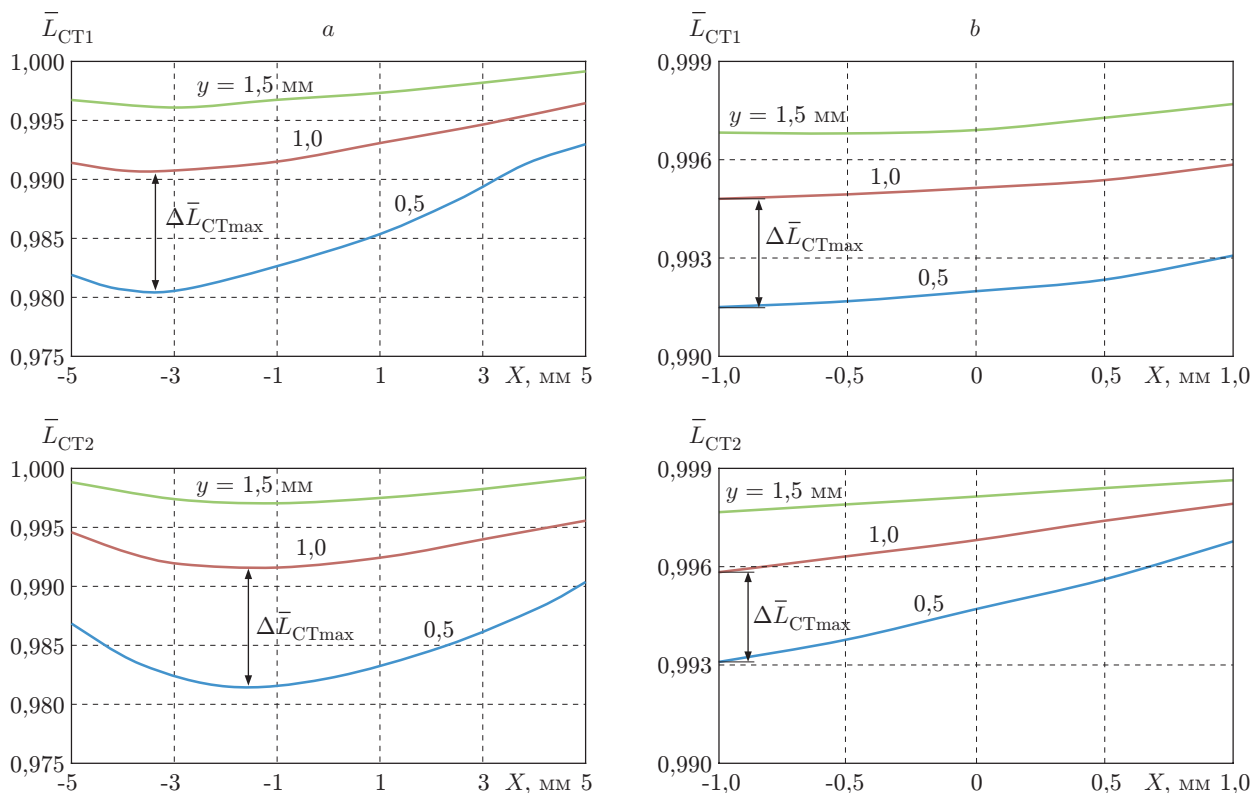


Рис. 5. Семейства ГХ $\bar{L}_{CT1}(x, y)$ и $\bar{L}_{CT2}(x, y)$: для предлагаемого (*a*) и существующего (*b*) методов

На обоих графиках наблюдается уменьшение индуктивностей, а затем их рост при изменении координаты x от отрицательных к положительным значениям. Иначе говоря, графики $\bar{L}_{СТ1}$ и $\bar{L}_{СТ2}$ демонстрируют неоднозначность функций, когда выбранному значению $\bar{L}_{СТ1}$ (или $\bar{L}_{СТ2}$) при заданных значениях y соответствуют два значения x . Вместе с тем зависимости $\bar{L}_{СТ1}(y)$ и $\bar{L}_{СТ2}(y)$ при $x = \text{const}$ сохраняют монотонный характер изменений индуктивностей во всём диапазоне изменений x .

Для удобства сравнения чувствительностей к радиальным смещениям и диапазонов изменений осевых смещений на рис. 5, *b* представлены семейства ГХ, полученные по той же методике и на том же оборудовании, но для существующего метода.

Расчёт чувствительности S производится с помощью графиков семейств ГХ (рис. 5) по наибольшим изменениям индуктивностей ($\Delta\bar{L}_{СТ\text{max}}$) на изменение координаты y ($\Delta y = 0,5$ мм) по формуле $S = (\Delta\bar{L}_{СТ\text{max}}/\Delta y) \cdot 100\%$. Тогда чувствительность, обеспечиваемая предлагаемым методом, составит около 2 %/мм, а существующим — около 0,6 %/мм, т. е. чувствительность в предлагаемом методе более чем втрое выше чувствительности в существующем методе. При этом диапазон измерений осевых смещений (координат x) возрастает в 5 раз.

Необходимо также отметить, что работоспособность предлагаемого метода была подтверждена в лабораторных условиях на имитаторе объекта при использовании ранее разработанных технических и программных средств, реализующих существующий метод измерения радиальных и осевых смещений торцов турбинных лопаток [6].

Заключение. В данной работе предложен новый метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы. Приведено описание основных отличительных признаков — смещения РК из двух ОВТД в сторону головной части лопатки, разворота ЧЭ датчиков на угол 60° от направления вращения ЛК (по часовой стрелке) и фиксации минимального значения индуктивности ЧЭ из двух минимумов.

В результате экспериментальных исследований семейств ГХ обоих ОВТД в составе РК показано, что чувствительность к изменениям радиальных смещений увеличивается более чем втрое, а диапазон измерений осевых смещений — в 5 раз по сравнению с существующим методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Н. Д., Данильченко В. П., Резник В. Е. Управление радиальными зазорами в турбокомпрессорах авиационных ГТД. Самара: Самар. авиац. ин-т, 1991. 109 с.
2. Прокопец А., Ревзин Б., Рожков А. Необходимость диагностирования радиальных зазоров в проточной части газотурбинных двигателей // Газотурбинные технологии. 2004. № 4. С. 5–7.
3. Боровик С. Ю., Данильченко В. П., Секисов Ю. Н. Активное регулирование радиальных зазоров в проточной части ГТД (обзор зарубежных публикаций) // Газотурбинные технологии. 2011. № 2. С. 36–40.
4. 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.
5. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях /Под ред. О. П. Скобелева. М.: Машиностроение, 2011. 298 с.
6. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К. и др. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 10. С. 38–46.

7. **Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: СамНЦ РАН, 2013. С. 627–635.
8. **Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: СамНЦ РАН, 2013. С. 636–641.
9. **Кутейникова М. М.** Вычисление координат смещения торцов лопаток в системе измерения радиальных зазоров // Матер. X Всерос. школы-конференции молодых учёных «Управление большими системами». Уфа: УГАТУ, 2013. Т. 3. С. 157–161.

Поступила в редакцию 3 апреля 2014 г.
