

УДК 681.518

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНТРОЛИРУЕМУЮ И СОСЕДНИЕ ЛОПАТКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДАТЧИК

П.Е. Подлипнов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

***Аннотация.** Приводится краткое описание метода измерения радиальных зазоров между торцами лопаток и статорной оболочкой компрессора с использованием одновиткового вихретокового датчика и самокомпенсации температурных воздействий на него. На качественном уровне анализируются влияния на результаты измерения радиальных зазоров соседних лопаток, а также температуры как на контролируемую, так и на соседние лопатки при фиксированном радиальном зазоре. Приводятся результаты вычислительных экспериментов, для проведения которых использована существующая модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента датчика и лопатки. Полученные результаты содержат количественные оценки влияния соседних лопаток и температуры как на контролируемую, так и на соседние лопатки в функциональной зависимости от радиальных зазоров.*

***Ключевые слова:** измерение радиальных зазоров, одновитковый вихретоковый датчик, самокомпенсация температурных воздействий, влияние соседних лопаток, влияние температуры лопаток.*

Введение

Известно, что от радиальных зазоров (РЗ) между торцами лопаток и статорной оболочкой в компрессорах и турбинах газотурбинных двигателей (ГТД) зависят основные показатели надежности и эффективности ГТД. Поэтому проблема измерения РЗ в тяжелых и даже экстремальных условиях (высокие температуры в газовоздушном тракте и скорость газового потока, близкая к скорости звука, повышенный уровень вибраций и другие факторы) остается актуальной и в настоящее время.

Известны также методы и средства измерения РЗ, в которых используются одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1, 2]. ЧЭ (как и остальные элементы конструкции ОВТД) выполнен из тех же жаропрочных сталей, что и лопатки, и через установочное отверстие в статорной оболочке вводится в газовоздушный тракт, где осуществляется его электромагнитное взаимодействие с торцами лопаток. При этом для коррекции температурных воздействий на ЧЭ и остальные элементы конструкции ОВТД используется дополнительный ОВТД, который через дополнительное установочное отверстие также вводится в газовоздушный тракт. Такой способ коррекции широко используется в экспериментальных исследованиях ГТД в стендовых условиях, но из-за дополнительных установочных отверстий в статорной оболочке нежелателен в эксплуатации ГТД для использования в процессе управления и диагностики. Кроме того, для эффективной термодор-

Петр Евгеньевич Подлипнов, научный сотрудник.

рекции необходима идентичность характеристик и параметров обоих ОВТД, что затруднительно при существующей технологии их изготовления.

В работах [3, 4] предложен метод измерения РЗ, в котором реализована идея самокомпенсации температурных воздействий на ЧЭ и другие элементы конструкции ОВТД, что является важным аргументом для применения метода в системах управления и диагностики ГТД, поскольку отпадает необходимость в дополнительном ОВТД при термокоррекции и соответствующем установочном отверстии в статорной оболочке для его размещения.

Следует отметить, что для практического применения рассматриваемого метода очень важными представляются всесторонние исследования метода, и в частности влияния различных мешающих факторов. Исследованию влияния одного из них (осевых смещений рабочего колеса) посвящена работа [5]. Настоящая статья является продолжением работ в том же направлении и посвящена исследованию влияния температуры на контролируемую и соседние лопатки.

В статье приводится краткое описание метода измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД. Анализируется на качественном уровне влияние соседних лопаток, а также температуры на контролируемую и соседние лопатки при фиксированном РЗ.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов, для проведения которых использована существующая модель электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки (модель адаптирована к форме и размерам лопаток, применяемых в компрессоре). Полученные результаты содержат количественные оценки влияния соседних лопаток и температуры как на контролируемую, так и на соседние лопатки в виде функциональных зависимостей от РЗ при различных значениях шага установки лопаток на рабочем колесе.

Метод измерения РЗ

На рис. 1 изображены два положения рабочего колеса (РК) компрессора (РК I и РК II) с лопатками 1, 2, ..., n . Там же показана система отсчета $OXYZ$. Начало отсчета (точка O) находится на внутренней поверхности статора и в положении РК I начало отсчета совпадает с геометрическими центрами лопатки 1 и ЧЭ ОВТД. Ось X совпадает с направлением оси РК, ось Y – с направлением его радиуса, а ось Z – с направлением вращения РК (величина РЗ определяется координатой y).

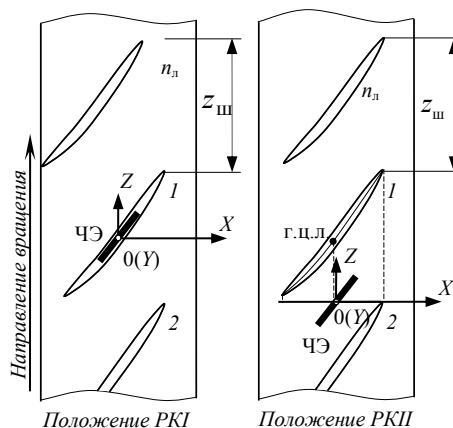


Рис. 1. Размещение ЧЭ ОВТД и система отсчета $OXYZ$

Если предположить, что вращение РК происходит в нормальных температурных условиях, то при отсутствии влияния соседних лопаток (1 и 2) эквивалентная индуктивность ЧЭ, а следовательно, и эквивалентная индуктивность первичной обмотки согласующего трансформатора (СТ) датчика будут иметь максимально возможное значение (L_0) при совпадении центра ЧЭ (точки O) и центра межлопаточного промежутка. Вместе с тем при совпадении центра ЧЭ (и точки O) с центром лопатки (положение РКI) согласно [1, 2, 4] индуктивность уменьшается и становится равной $L_0 - \Delta L_y$, где ΔL_y – изменение эквивалентной индуктивности, связанное с изменением координаты y (РЗ).

При воздействии температуры на элементы конструкции ОВТД (и датчик в целом), как показали исследования, эквивалентная индуктивность СТ возрастает на величину ΔL_θ независимо от положения лопатки относительно ЧЭ ОВТД.

В итоге для первого (РКИ) из двух (РКИ и РКII) рассмотренных положений колеса относительно ЧЭ ОВТД (когда торец контролируемой лопатки находится в зоне чувствительности датчика) эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ можно представить в виде

$$L_{СТ(I)}^2 = L_0 + \Delta L_\theta - \Delta L_y \quad (1)$$

Для второго положения (РКII) (когда в зоне чувствительности датчика торец контролируемой лопатки отсутствует) выражение (1) примет вид

$$L_{СТ(II)}^2 = L_0 + \Delta L_\theta \quad (2)$$

где $L_{СТ(I)}^2$ и $L_{СТ(II)}^2$ – экстремальные значения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ.

Предлагаемый в [4] метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД предусматривает фиксацию $L_{СТ}^2$ в положениях РКИ, РКII и получение разности

$$\Delta L_{СТ}^2 = L_{СТ(II)}^2 - L_{СТ(I)}^2 = \Delta L_y \quad (3)$$

которая не зависит от температурных воздействий на ОВТД (ΔL_θ) и определяется только искомыми изменениями индуктивности первичной обмотки СТ ΔL_y , связанными с РЗ(y).

С учетом влияния соседних лопаток выражения (1), (2) и (3) примут вид

$$L_{СТ(I)}^2 = L_0 + \Delta L_\theta - \Delta L_y - \Delta L_{Сл(I)} \quad (4)$$

$$L_{СТ(II)}^2 = L_0 + \Delta L_\theta - \Delta L_{Сл(II)} \quad (5)$$

$$\Delta L_{СТ}^2 = L_{СТ(II)}^2 - L_{СТ(I)}^2 = \Delta L_y + \Delta L_{Сл(I)} - \Delta L_{Сл(II)} \quad (6)$$

где $\Delta L_{Сл(I)}$ и $\Delta L_{Сл(II)}$ – изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с влиянием соседних лопаток 2 и n_l (положение РКИ), а также 1 и 2 (положение РКII) соответственно (рис. 1) При этом для оценки влияния соседних лопаток можно использовать формулу

$$\delta L_{\text{СЛ}} = \frac{\Delta L_{\text{СЛ(I)}} - \Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{\Delta L_{y, \text{max}}} \cdot 100\% \quad (7)$$

где $\Delta L_{y, \text{max}}$ – максимально возможное изменение ΔL_y , а величина $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}$ намного больше $\Delta L_{\text{СЛ(I)}}$, поскольку ЧЭ ОВТД расположен на расстоянии $z_{\text{ш}}/2$ от соседних лопаток в положении РКII по сравнению с положением РКI.

Результаты исследований температурных воздействий на лопатки, применяемые в турбинах ГТД, показали увеличение эквивалентной индуктивности ЧЭ ОВТД (а следовательно, и первичной обмотки СТ) с увеличением температуры, что связано с увеличением удельного сопротивления материала лопатки, преобладающим над соответствующими изменениями геометрических параметров [6, 7]. Так как в компрессорных лопатках используются те же материалы, то аналогичные результаты можно ожидать и в отношении лопаток, применяемых в компрессорах.

С учетом этого выражения (4), (5) и (6) примут вид:

$$L_{\text{СТ(I)}}^2 = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_y - \Delta L_{\text{СЛ(I)}} + \Delta L_{\text{КЛ0}} + \Delta L_{\text{СЛ0(I)}}, \quad (8)$$

$$L_{\text{СТ(II)}}^2 = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_{\text{СЛ(II)}} + \Delta L_{\text{СЛ0(II)}}, \quad (9)$$

$$\Delta L_{\text{СТ}}^2 = L_{\text{СТ(II)}}^2 - L_{\text{СТ(I)}}^2 = \Delta L_y + \Delta L_{\text{СЛ(I)}} - \Delta L_{\text{СЛ(II)}} - \Delta L_{\text{КЛ0}} + \Delta L_{\text{СЛ0(II)}} - \Delta L_{\text{СЛ0(I)}}, \quad (10)$$

где $\Delta L_{\text{КЛ0}}$, $\Delta L_{\text{СЛ0(I)}}$ и $\Delta L_{\text{СЛ0(II)}}$ – изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с температурными воздействиями на контролируемую лопатку (КЛ) (положение РК I), а также на соседние лопатки (в положениях РКI и РКII соответственно). При этом оценить влияние температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки можно по формуле

$$\delta L_{\text{КСЛ0}} = \frac{-\Delta L_{\text{КЛ0}} + \Delta L_{\text{СЛ0(II)}} - \Delta L_{\text{СЛ0(I)}}}{\Delta L_{y, \text{max}}} \cdot 100\% \quad (11)$$

где вклад $\Delta L_{\text{КЛ0}}$ существенно больше $\Delta L_{\text{СЛ0(II)}}$ и тем более $\Delta L_{\text{СЛ0(I)}}$.

Следует отметить, что выражения (4–11) дают наглядное, качественное представление о влиянии соседних лопаток и температуры на контролируемую и соседние лопатки. При этом предполагается, что преобразуемый параметр РЗ (y) имеет фиксированное значение. Однако эквивалентные индуктивности первичной обмотки СТ в положениях РКI и РКII, равно как и их разность, являются функциями РЗ (y) – $L_{\text{СТ(I)}}^2(y)$, $L_{\text{СТ(II)}}^2(y)$ и $\Delta L_{\text{СТ}}^2(y)$. Функциями РЗ (y) являются также выражения (7, 11) – $\delta L_{\text{СЛ}}(y)$ и $\delta L_{\text{КСЛ0}}(y)$. Но первое из перечисленных семейств функций – это фактически функции преобразования (ФП) ОВТД, а второе семейство – функции влияния (ФВ) мешающих факторов (соседних лопаток и температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки).

Количественные оценки влияния соседних лопаток

Искомые оценки получены с помощью известной модели электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ с торцевой частью турбинной лопатки. Ее описание приведено в работе [8], а исходные данные для моделирования (размеры лопатки и ЧЭ, а также другие параметры) – в работе [9]. Несмотря на принципиальные отличительные особенности лопаток, применяемых в турбине и компрессоре, та же модель может использоваться и для компрессорной лопатки упрощенной формы, близкой к прямоугольной с малой кривизной поверхности пера и отсутствием выступов. В исходные данные были внесены изменения размеров торца лопатки (в соответствии с реальными размерами компрессорной лопатки), а также степени ее кривизны и выступов (уменьшены практически до нуля). При этом все остальные исходные данные оставались неизменными¹.

В результате моделирования (в предположении нормальных температурных условий $\theta = 20^\circ\text{C}$) получена ФП ЧЭ в виде зависимости эквивалентной индуктивности ЧЭ ($L_{\text{ЧЭ}}^2(y)$) в диапазоне изменения РЗ (y) от 0,5 до 2,5 мм. Показано, что функция $L_{\text{ЧЭ}}^2(y)$ монотонно возрастает и при $y \rightarrow \infty$, т. е. при отсутствии лопатки в зоне чувствительности, $L_{\text{ЧЭ}\infty}^2 = 3,657 \cdot 10^{-9}$ Гн.

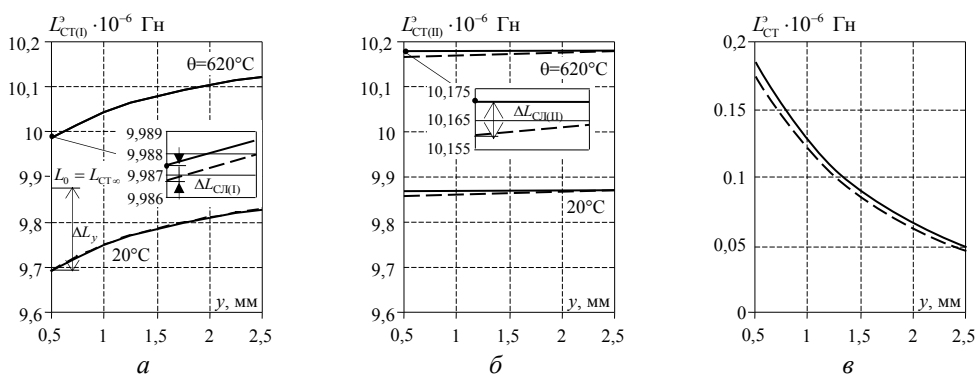


Рис. 2. Семейство ФП $L_{\text{CT}(0)}^2(y, \theta)$ (а) и $L_{\text{CT}(0)}^2(\theta)$ (б) (без учета соседних лопаток – сплошные линии и с их учетом – пунктир), разность ФП $\Delta L_{\text{CT}}^2(y)$ (в) (без учета соседних лопаток – сплошные линии и с их учетом – пунктир)

Далее полученные результаты пересчитываются в первичную обмотку СТ в соответствии с рекомендациями, приведенными в [10], с учетом дополнительных предложений по их совершенствованию. При этом для расчета $L_{\text{CT}\infty}^2$ используется формула $L_{\text{CT}}^2 = n_{\text{т}}^2(kL_{\text{ЧЭ}\infty}^2)$, где $n_{\text{т}} = 30$ – коэффициент трансформации СТ, k – коэффициент, зависящий от индуктивности тоководов (ТВ) ОВТД. Что же касается пересчета результатов моделирования при наличии лопатки в зоне чувствительности ОВТД (в частности функции $L_{\text{ЧЭ}}^2(y)$) в первичную обмотку СТ, то предлагается использовать выражение $L_{\text{CT}}^2(y) = L_{\text{CT}\infty}^2 - \Delta L_y$, где $\Delta L_y = n_{\text{т}}^2(k^* \cdot \Delta L_{\text{ЧЭ}}^2)$,

¹ Для компрессорной лопатки длина хорды, спинки и корыта составила 29 мм; ширина выходной и входной кромок 2,0 мм; выступов в торцевой части лопатки нет (в модели равны нулю); степень кривизны лопатки определяется изгибом ее спинки и корыта относительно центра хорды и составляет 0,1 мм.

а $\Delta L_{\text{ЧЭ}}^2 = L_{\text{ЧЭ}\infty}^2 - L_{\text{ЧЭ}}^2(y)$, k^* – коэффициент, который, как и коэффициент k , зависит от соотношения индуктивностей ТВ и ЧЭ, хотя и может отличаться от него по величине. Для ОВТД из групп одного типоразмера оба коэффициента выбраны равными ($k=k^*=3$) и, что особенно важно, обеспечивают хорошее совпадение приведенных значений ΔL_y ($\Delta L_y / L_{\text{СТ}\infty}^2$), полученных путем моделирования и экспериментально (именно приведенные значения ΔL_y оказывают определяющее влияние на ФП измерительной цепи с включенным в нее ОВТД).

На рис. 2 результаты моделирования (после пересчета) представлены как графики $L_{\text{СТ(И)}}^2$ в зависимости от координаты y (РЗ) при температуре 20 °С (а). С увеличением y $L_{\text{СТ}}^2$ возрастает и при $y \rightarrow \infty$ могло бы достигнуть предельного значения $L_{\text{СТ}\infty}^2 = 9,87 \cdot 10^{-6}$ Гн, которое обозначено на оси ординат (причем $L_{\text{СТ}\infty}^2 = L_0$ в ранее приведенных выкладках). Но именно это значение соответствует эквивалентной индуктивности $L_{\text{СТ(III)}}^2$ в межлопаточных промежутках при отсутствии влияния контролируемой и соседних лопаток. Поэтому на рис. 2, б график $L_{\text{СТ(III)}}^2$ от y – это прямая, параллельная оси Y .

Определение $L_{\text{СТ}}^2(y)$ при номинальной температуре (600...650 °С в компрессоре) осуществлялось с использованием экспериментальных данных, полученных в специальной термокамере для группы ОВТД одного типоразмера. Было показано, что при изменении температуры на 600 °С от нормальной (20 °С) изменения эквивалентной индуктивности СТ составляют 3 % с небольшим отклонением ($\Delta L_0 / L_0 = 0,03$). Поэтому каждая ордината функции $L_{\text{СТ(И)}}^2(y)$ при температуре 20 °С увеличивалась на величину $\Delta L_0 = 0,03L_0$. Аналогичные действия необходимы и в отношении $L_{\text{СТ(III)}}^2(y)$ при нормальной температуре.

Итоги этих операций представлены на рис. 2 а, б как полное семейство ФП ОВТД – $L_{\text{СТ(И)}}^2(y, \theta)$ и $L_{\text{СТ(III)}}^2(\theta)$ при нормальной и номинальной температурах (причем все графики ФП выполнены сплошными линиями).

Разность $L_{\text{СТ(III)}}^2(y) - L_{\text{СТ(И)}}^2(y) = \Delta L_{\text{СТ}}^2(y)$, вычисленная согласно рассматриваемому методу измерения РЗ (y) с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД (ΔL_0), представлена на рис. 2, в и, действительно, не зависит от температурных воздействий на ОВТД, оставаясь неизменной при вычислении $\Delta L_{\text{СТ}}^2$ как при нормальной, так и при номинальной температуре (график $\Delta L_{\text{СТ}}^2(y)$ также выполнен сплошной линией).

В работах [11, 12] приведены описания модели ЭМВ взаимодействия ЧЭ ОВТД не только с контролируемой, но и с соседними лопатками сложной формы, применяемыми в турбинах. Представляется очевидной возможность применения этой модели для исследования влияния соседних лопаток в компрессоре после замены турбинных лопаток теми, что применяются в компрессоре с замкнутой соответствующих исходных данных (такие данные были приведены выше).

Результаты вычислительных экспериментов с учетом влияния соседних лопаток показали незначительное отклонение функции $L_{\text{СТ(И)}}^2$ при выбранном шаге установки лопаток ($z_{\text{ш}}=24$ мм). В масштабной сетке рис. 2, а они практически незаметны. Поэтому в более крупном масштабе функция $L_{\text{СТ(И)}}^2(y)$ (с учетом со-

седних лопаток в окрестности $y=0.5$ мм) вынесена на «аппликацию», где показана пунктиром.

Как и ожидалось, соседние лопатки вызывают уменьшение индуктивности $L_{\text{СТ(II)}}^2$ ($\Delta L_{\text{СЛ(II)}}$ – величина отрицательная). Такой же характер влияния наблюдается и в отношении $L_{\text{СТ(III)}}^2$, однако ее изменения ($\Delta L_{\text{СЛ(III)}}$) возрастают в несколько раз по величине и, что особенно важно, $L_{\text{СТ(III)}}^2$ теряет независимость от y , монотонно возрастая с увеличением y (рис. 2, б).

Влияние соседних лопаток на функцию $\Delta L_{\text{СТ}}^2(y)$ в основном определяет составляющая $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}$, которая уменьшает все ее значения (на рис. 2, в это пунктирная линия).

Полученные ФП с учетом и без учета влияния соседних лопаток (при заданном шаге установки лопаток на РК ($z_{\text{ш}}$)) позволяют дать количественную оценку ФВ:

$$\delta L_{\text{СЛ}}(y) = \frac{\Delta L_{\text{СТ}}(y) - \Delta L_{\text{СТ СЛ}}(y)}{\Delta L_{y_{\text{max}}}} \cdot 100\% \quad (12)$$

где $\Delta L_{\text{СТ}}(y)$ и $\Delta L_{\text{СТ СЛ}}(y)$ – разностные значения $L_{\text{СТ(III)}}^2(y)$ и $L_{\text{СТ(II)}}^2(y)$ без учета и с учетом влияния соседних лопаток соответственно, а $\Delta L_{y_{\text{max}}}$ – максимально возможное значение $\Delta L_{\text{СТ}}(y)$ (без учета соседних лопаток). При этом необходимо отметить, что выражение (12) отражает суммарное влияние соседних лопаток в обоих положениях РК I и РК II.

На рис. 3, а представлено семейство ФВ $\delta L_{\text{СЛ}}(y)$ при трех значениях шага $z_{\text{ш}} = 18, 24$ и 30 мм и с учетом суммарного влияния соседних лопаток в обоих положениях РК. При $z_{\text{ш}} = 24$ мм максимальное значение $\delta L_{\text{СЛ}}$ составляет около 5,5 %. Оно возрастает до 7,1 % при $z_{\text{ш}} = 18$ мм и снижается до 3,8 % при $z_{\text{ш}} = 30$ мм.

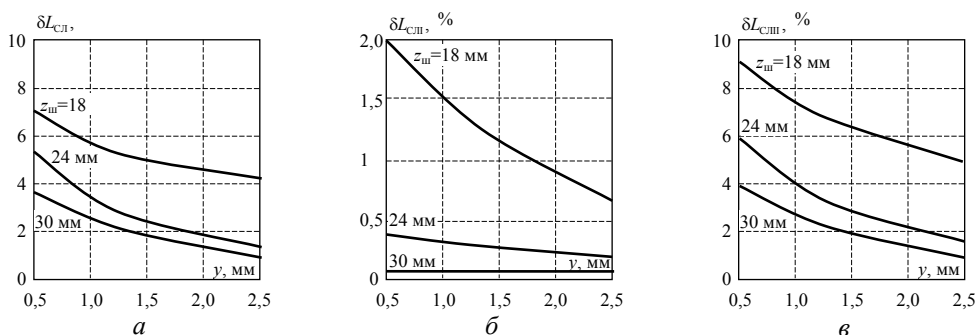


Рис. 3. ФВ соседних лопаток (СЛ) при $z_{\text{ш}}=18, 24, 30$ мм:
 $\delta L_{\text{СЛ}}(y)$ – суммарное влияние СЛ в положениях РК I и РК II (а);
 $\delta L_{\text{СЛ I}}(y)$ – влияние СЛ в положении РК I (б);
 $\delta L_{\text{СЛ II}}(y)$ – влияние СЛ в положении РК II (в)

На рис. 3, б, в представлены ФВ при тех же значениях шага $z_{ш}$, но вычисленные по отдельности – только для соседних лопаток в положении РКІ ($\delta L_{\text{СЛ(І)}}(y)$) и только для соседних лопаток в положении РКІІ ($\delta L_{\text{СЛ(ІІ)}}(y)$). Показано, что влияние соседних лопаток в положении РКІІ многократно превышает его влияние в положении РКІ, причем перепад усиливается с увеличением $z_{ш}$.

Количественная оценка влияния температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки

На качественном уровне представление о влияниях температуры на контролируемую и соседние лопатки дает выражение (11) (разумеется, при фиксированном значении РЗ (y)). Получение же функциональной зависимости $\delta L_{\text{КСЛЮ}}(y)$ возможно на той же модели ЭМВ ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками, если учтены температурные воздействия на те же лопатки. При этом предполагается, что температурные воздействия вызывают изменения удельного сопротивления материала лопаток и их геометрических параметров. Однако результаты исследований, приведенные в работах [6, 7], показали доминирующее влияние температуры на удельное сопротивление, а потому изменения, связанные с геометрическими параметрами лопаток, можно не учитывать.

Методика проведения вычислительных экспериментов аналогична той, что использовалась ранее – моделируются ФП РЗ (y) с учетом влияния соседних лопаток, а затем ФП с учетом не только соседних лопаток, но и температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки, как в положении РКІ, так и в положении РКІІ. Далее определяются разностные значения ФП и определяются ФВ:

$$\delta L_{\text{КСЛЮ}}(y) = \frac{\Delta L_{\text{СТСЛ}}(y) - \Delta L_{\text{СТКСЛЮ}}(y)}{\Delta L_{y \text{ max}}} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где $\Delta L_{\text{СТСЛ}}(y)$ и $\Delta L_{\text{СТКСЛЮ}}(y)$ – разностные значения $L_{\text{СТСЛ(ІІ)}}^3(y)$ и $L_{\text{СТСЛ(І)}}^3(y)$ без учета и с учетом температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки².

На рис. 4, а представлены ФВ температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки в виде $\delta L_{\text{КСЛЮ}}(y)$ в предположении, что шаг установки лопаток на рабочем колесе составляет 18; 24 и 30 мм.

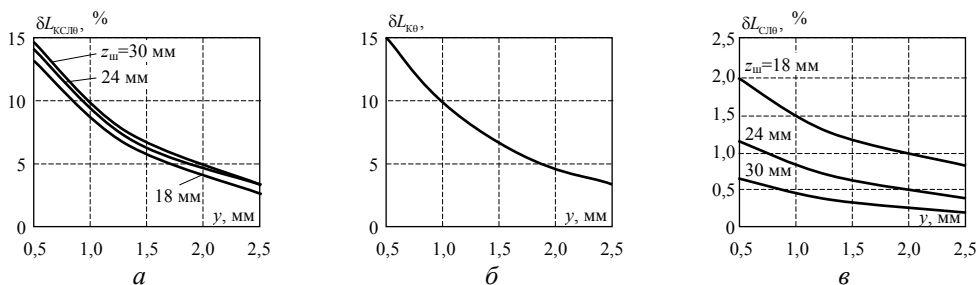


Рис. 4. ФВ температуры на контролируемую и соседние лопатки при $z_{ш} = 18, 24, 30$ мм: $\delta L_{\text{КСЛЮ}}(y)$ (а), $\delta L_{\text{КВ}}(y)$ (б), $\delta L_{\text{СЛЮ}}(y)$ (в)

² Количественные оценки $\Delta L_{\text{СТСЛ}}(y)$ осуществлялись ранее в предыдущей серии вычислительных экспериментов, и их результаты можно использовать в настоящей серии.

Как следует из графиков, изменение шага установки соседних лопаток оказывает незначительное влияние – отклонения не превышают единиц процентов. Можно предположить, что причина тому – доминирующее влияние температурных воздействий на контролируемую лопатку по сравнению с соседними. Для подтверждения этого предположения были проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых определялась ФВ температурных воздействий только на контролируемую лопатку без учета соседних:

$$\delta L_{к0}(y) = \frac{\Delta L_{ст}(y) - \Delta L_{стк0}(y)}{\Delta L_{y_{max}}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где $\Delta L_{ст}(y)$ и $\Delta L_{стк0}(y)$ – разностные значения $L_{ст(II)}^3(y)$ и $L_{ст(0)}^3(y)$ – без учета и с учетом температурных воздействий только на контролируемую лопатку (при отсутствии соседних лопаток) в положениях РКІ и РКІІ.

На рис. 4, б представлена функция $\delta L_{к0}(y)$, максимальное значение которой достигает примерно 15 %, что действительно полностью подтверждает предположение о доминирующем влиянии температурных воздействий на контролируемую лопатку по сравнению с теми же воздействиями на соседние лопатки.

Вместе с тем данные на рис. 4, а и б позволяют определить ФВ, связанные с суммарным действием температуры на соседние лопатки в положениях РКІ и РКІІ. Результаты расчета в виде функции $\delta L_{сл0}(y)$ представлены на рис. 4, в (при шаге, равном 18, 24 и 30 мм). Даже при минимальном значении $z_{ш}$ (18 мм) не превышает 2 %. При этом необходимо особо отметить, что данные на рис. 4, в в основном определяются влиянием соседних лопаток в положении РКІІ, а влияние соседних лопаток в положении РКІ пренебрежимо мало³.

В работах [11, 12] дано описание возможных способов уменьшения влияния соседних лопаток и температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки. Практически эти способы аналогичны тому, что рекомендовано в работе [1], где предусматривается экспериментальное получение градуировочных характеристик перед началом работы системы измерения. Используемые в системе датчики устанавливаются в специальной термокамере с градуировочным устройством и прибором контроля РЗ. Модернизация устройства заключается в установке не одной, а нескольких лопаток, аналогичных тем, что применяются в компрессоре. Разумеется, и с аналогичным шагом. В рассматриваемом случае можно ограничиться тремя лопатками. Полученные таким образом семейства ГХ при номинальной температуре (они должны соответствовать семействам ФП в положениях РКІ и РКІІ) используются при обработке данных, полученных в процессе эксплуатации системы измерения РЗ.

Заключение

На качественном уровне осуществлен анализ влияния на результат измерения РЗ соседних лопаток, а также температурных воздействий как на контролируемую, так и на соседние лопатки.

Приведены результаты вычислительных экспериментов, для проведения которых использовалась существующая модель электромагнитного взаимодействия

³ Дополнительные исследования, проведенные для $z_{ш} = 24$ мм (такой шаг используется в реально существующих компрессорах), показали, что в положении РКІ максимальные значения $\delta L_{сл0}$ составляют менее 0,1 %, и это более чем на порядок меньше, чем в положении РКІІ.

ЧЭ ОВТД и лопатки (модель предварительно адаптирована к форме и размерам лопаток, применяемых в компрессоре ГТД). Полученные результаты содержат количественные оценки влияния соседних лопаток и температуры как на контролируемую, так и на соседние лопатки в виде функциональной зависимости от РЗ при различных значениях шага установки лопаток на рабочем колесе. Показано, что максимальное значение (7,1 %) влияние соседних лопаток достигает при РЗ 0,5 мм и шаге установки лопаток 18 мм (при этом вклад соседних лопаток в положении РКП многократно превышает вклад соседних лопаток в положении РКЛ).

Показано также, что максимально возможное влияние температуры имеет место при РЗ 0,5 мм (15 %), причем оно определяется в основном температурными воздействиями на контролируемую лопатку (влияние соседних лопаток не превышает 2 % при шаге 18 мм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
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. Патент РФ № 2639996 RU, МПК G01B 7/14. Способ измерения радиальных зазоров и скорости вращения ротора в турбомашине / Белоухов В.Н., Подлинов П.Е., Секисов Ю.Н. – Оpubл. 26.09.17, Бюл. № 27.
4. Белоухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М. [и др.] Способ измерения радиальных зазоров в газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик // Датчики и системы. – 2018. – № 4. – С. 53–59.
5. Кутейникова М.М., Подлинов П.Е. Влияние осевых смещений рабочего колеса турбомшины на результаты измерения радиальных зазоров при использовании самокомпенсации температурных воздействий на датчик // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – Вып. 4 (56). – С. 76–83.
6. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. [и др.] Анализ влияния температуры на информативные параметры одновитковых вихретоковых датчиков // Автометрия. – 2017. – № 4 (53). – С. 104–111.
7. Кутейникова М.М. Кластерные методы и средства измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине на основе одновитковых вихретоковых датчиков: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.16. – Самара, 2016. – 176 с.
8. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. – С. 627–635.
9. 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 // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. – С. 636–641.
10. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлинов П.Е. [и др.]. Эквивалентные параметры одновиткового вихретокового датчика в измерительной цепи с импульсным питанием // Датчики и системы. – 2016. – № 2. – С. 27–35.
11. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К. [и др.]. Влияние соседних лопаток на измерение радиальных зазоров в турбине // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – № 5. – С. 327–336.
12. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлинов П.Е. [и др.]. Моделирование процесса измерения радиальных и осевых смещений торцов рабочих лопаток сложной формы // Автометрия. – 2015. – № 5 (51). – С. 101–112.

Статья поступила в редакцию 17 июня 2018 г.

TEMPERATURE IMPACT ON THE CONTROLLED AND NEIGHBORING BLADES OF THE COMPRESSOR WHEEL DURING MEASURING OF RADIAL CLEARANCES WITH SELF-COMPENSATION OF TEMPERATURE EFFECT ON THE SENSOR

P.E. Podlipnov

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

Abstract. *The brief description of the method for measuring of radial clearances between the blade tips and stator of the compressor, using the single-coil eddy-current sensor with self-compensation of temperature effect on the sensor is given. The quality of neighboring blades effect on the results of radial clearances measuring is presented as well as the effect of temperature influence on controlled and neighboring blades with a fixed radial clearance. The results of computing experiments obtained on the base of existing models of electro-magnetic interaction between a sensitive element and the blade are considered. These results contain quantitative estimates of the neighboring blades effect and temperature effect on the controlled and neighboring blades as a function of radial clearances.*

Keywords: *measuring of radial clearances, single-coil eddy-current sensor, self-correction of temperature impacts, neighboring blades effect, blades' temperature effect.*

REFERENCES

1. Methods and tools of measuring of multidimensional displacements of power plants' constructive elements / Ed. *Sekisov Yu.N., Skobelev O.P.* – Samara: Samara Scientific Center of RAS, 2001. – 188 pp.
2. Cluster methods and tools of measuring of deformation and coordinates of displacements of blade tips in gas-turbine engines / Ed. *Skobelev O.P.* – Moscow: Mashinostroenie, 2011. – 298 pp.
3. Pat. 2639996 RU. Method for measuring radial clearances and rotor speed in turbo-machines / *Belopukhov V.N., Podlypnov P.E., Sekisov Yu.N.* // Bull. No. 27. – 2017.
4. *Belopukhov V.N., Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M. et al.* The method for measuring of radial clearances in gas-turbine engine with self-compensation of temperature effect on single-coil eddy-current sensor // *Sensors & Systems.* – No. 4. – 2018. – 53–59 pp.
5. *Kuteynikova M.M., Podlypnov P.E.* Influence of axial displacements of turbomachine impeller on the results of measurement of radial clearances with the self-compensation of temperature impact on the sensor // *Vestnik SamGTU. Series «Technical Science».* – No 4 (56). – 2017. – 76–83 pp.
6. *Borovik S.Y., Kuteynikova M.M., Sekisov Y.N. et al.* *Optoelectron. Instrument. Proc.* (2017) 53: 395. <https://doi.org/10.3103/S8756699017040124>.
7. *Kuteynikova M.M.* Cluster methods and tools of measuring of radial and axial displacements of blade tips in turbine on the base of single-coil eddy-current sensors: PhD Thesis. – Samara, 2016. 182 pp.
8. *Kuteynikova M.M., Sekisov Yu.N., Skobelev O.P.* The model of electromagnetic interaction between sensitive element of single-coil eddy-current sensor and the end of a blade of complex shape // *Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XV international conference (Samara, June, 25–28, 2013).* – pp. 627–635.
9. *Kuteynikova M.M., Sekisov Yu.N., Skobelev O.P.* The results of simulation of electromagnetic interaction between sensitive elements of single-coil eddy-current sensor (as a part of a cluster) and the end of a blade of complex shape // *Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XV international conference (Samara, June, 25–28, 2013).* – pp. 636–641.

10. *Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M., Podlipnov P.E. et al.* Equivalent parameters of single-coil eddy-current sensor in measuring circuit with pulse supply // *Sensors & Systems*. – No 2. –2016. – pp. 27–35.
11. *Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M., Raykov B.V. et al.* Adjacent blades effect on tip clearance measuring in turbine // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. – No 5. – 2013. – pp. 327–336.
12. *Borovik S.Y., Kuteynikova M.M., Podlipnov P.E. et al.* *Optoelectron. Instrument. Proc.* (2015) 51: 512. <https://doi.org/10.3103/S8756699015050118>