

УДК 681.518

ВЛИЯНИЕ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

© С. Ю. Боровик, П. Е. Подлипнов, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев

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

Приведены результаты анализа влияния мешающих факторов на изменения информативного параметра одновиткового вихретокового датчика, используемые как исходные данные в задачах исследований системы измерения радиальных зазоров с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик. В аналитическом виде получены функции преобразования измерительной цепи с включённым в неё одновитковым вихретоковым датчиком. Функции преобразования представляют собой зависимости экстремальных значений кодов на выходе измерительной цепи от радиальных зазоров и температурных воздействий на датчик с учётом влияния мешающих факторов (соседних лопаток, температуры лопаток, осевых смещений рабочего колеса компрессора газотурбинного двигателя). Даны количественные оценки функций влияния перечисленных мешающих факторов на вычисляемую в системе разность экстремальных значений кодов, характеризующую измеряемый параметр.

Ключевые слова: система измерения, радиальный зазор, одновитковый вихретоковый датчик, самокомпенсация температурных воздействий, мешающие факторы, функции преобразования, функции влияния.

DOI: 10.15372/AUT20190410

Введение. Известно, что основные показатели надёжности и экономичности газотурбинных двигателей (ГТД), которые применяются в транспортных средствах, электроэнергетике, газоперекачке, во многом определяются величиной радиальных зазоров (РЗ) между статорной оболочкой и торцами лопаток рабочего колеса (РК) компрессора и турбины [1, 2]. Поэтому до сих пор остаётся актуальной идея измерения РЗ непосредственно в газовоздушном тракте и использования полученных результатов в системах управления и диагностики опасных состояний ГТД [3–5].

Несмотря на существующее многообразие методов измерения РЗ [6], их реализация ограничена тяжёлыми и даже экстремальными условиями в газовоздушном тракте. При этом одним из наиболее значимых мешающих факторов (МФ) является температура, достигающая 1000 °С и выше в турбинах ГТД. Вместе с тем в стендовых испытаниях ГТД прошли успешную апробацию системы измерения РЗ, в которых использованы одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника. Чувствительный элемент датчика безындуктивными токовымидами связан с объёмным витком согласующего трансформатора (СТ), эквивалентная индуктивность первичной обмотки которого является информативным параметром, зависящим от РЗ. Чувствительный элемент, как и другие элементы конструкции ОВТД (тоководы и объёмный виток), выполнен из тех же жаропрочных сплавов, как и лопатки, что обеспечивает его функционирование при экстремальных температурах в газовоздушном тракте. Через установочное отверстие ЧЭ вводится непосредственно в проточную часть, где взаимодействует с торцами лопаток, причём изменения РЗ преобразуются в изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ [7–9]. Согласующий трансформатор ОВТД размещён вне статорной оболочки ГТД в благоприятных температурных условиях.

Для уменьшения влияния температурных воздействий на элементы конструкции ОВТД в системах измерения РЗ используется дополнительный ОВТД-свидетель, ЧЭ которого через дополнительное установочное отверстие вводится в проточную часть с таким расчётом, чтобы температурные условия были идентичны условиям ЧЭ рабочего ОВТД и не происходило электромагнитное взаимодействие с торцами лопаток. При этом ОВТД-свидетель включается в общую измерительную цепь (ИЦ) с рабочим ОВТД, где выполняет компенсационные функции. Такой способ широко использовался в экспериментальных исследованиях ГТД в стендовых условиях [7, 8]. Однако применение дополнительных ОВТД и дополнительных установочных отверстий при штатной эксплуатации ГТД ограничено и, как правило, недопустимо. Существуют также трудности и в подборе пары ОВТД с идентичными параметрами, которые связаны с технологией изготовления датчиков.

В [10] приведено описание метода измерения РЗ, в котором нет необходимости в применении дополнительного ОВТД-свидетеля. Компенсация температурных воздействий на датчик достигается благодаря фиксации экстремальных значений эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ одного и того же ОВТД, зависящей от РЗ и температуры при прохождении ЧЭ датчика контролируемой лопаткой и только от температуры при прохождении ЧЭ межлопаточным промежутком с последующим вычислением разности зафиксированных значений, которая определяется только РЗ. Однако, как показали исследования [11, 12], на экстремальные значения эквивалентных индуктивностей первичной обмотки СТ ОВТД и на их разность существенное влияние оказывает ряд МФ, включая осевые смещения (ОС) РК, а также температура не только контролируемой, но и соседних лопаток.

Следует особо отметить значимость таких исследований на этапе реализации метода в системе измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик (в ИЦ системы информативный параметр ОВТД преобразуется в цифровой код, а в процессе последующей обработки определяются экстремальные значения кодов и вычисляется их разность [13]). Можно ожидать, что осуществляемые в системе преобразования и операции способны изменить те количественные оценки влияния МФ, что были получены в работах [11, 12].

Цель предлагаемой работы — устранение существующего пробела в исследованиях влияния МФ на изменения информативного параметра ОВТД с учётом осуществляемых в системе измерения операций и преобразований. Для этого приведено краткое описание полученных результатов анализа влияния каждого МФ на изменения экстремальных значений эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ ОВТД, которые используются как исходные данные для исследований системы измерения. Рассматриваются полученные в аналитическом виде функции преобразования (ФП) — зависимости экстремальных значений кодов от РЗ и температурных воздействий на датчик с учётом влияния МФ, в том числе соседних лопаток, температуры контролируемой и соседних лопаток, осевых смещений РК. Даны количественные оценки так называемых функций влияния (ФВ) перечисленных МФ на разность экстремальных значений кодов, вычисляемых в системе измерения.

Влияние МФ на изменения информативного параметра ОВТД. Согласно методу [10] при отсутствии влияния МФ экстремальные значения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ $L_{СТ(I)}^{ext}$ в момент, когда центр ЧЭ совпадает с центром лопатки (положение РКI), и $L_{СТ(II)}^{ext}$, когда центр ЧЭ совпадает с центром межлопаточного промежутка (положение РКII), можно представить как:

$$L_{СТ(I)}^{ext} = L_0 + \Delta L_{\Theta} - \Delta L_y; \quad L_{СТ(II)}^{ext} = L_0 + \Delta L_{\Theta}, \quad (1)$$

где L_0 — эквивалентная индуктивность первичной обмотки СТ при отсутствии лопатки в зоне чувствительности ЧЭ ОВТД; ΔL_Θ и ΔL_y — изменения индуктивности, связанные с изменениями температурных воздействий на ОВТД и РЗ соответственно (в системе отсчёта $OXYZ$, начало которой (точка O) расположено на внутренней поверхности статорной обмотки, оси X и Z направлены вдоль оси РК и в направлении его вращения, а ось Y — по радиусу, величину РЗ характеризует координата y).

Согласно [12] выражение (1) с учётом влияния соседних лопаток (СЛ) примет вид

$$L_{\text{СТСЛ(I)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_\Theta - \Delta L_y - \Delta L_{\text{СЛ(I)}}; \quad L_{\text{СТСЛ(II)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_\Theta - \Delta L_{\text{СЛ(II)}}, \quad (2)$$

где $\Delta L_{\text{СЛ(I)}}$, $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}$ — изменения индуктивности, связанные с влиянием соседних лопаток в положениях РК I и РК II соответственно.

С помощью моделей электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ с торцевой частью лопатки, применяемой в компрессоре, получены семейства ФП ОВТД без учёта влияния соседних лопаток ($L_{\text{СТ(I)}}^{\text{ext}}(y, \Theta)$ и $L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}}(\Theta)$), а также с учётом их влияния ($L_{\text{СТСЛ(I)}}^{\text{ext}}(y, \Theta)$ и $L_{\text{СТСЛ(II)}}^{\text{ext}}(\Theta)$). Сведения, необходимые для моделирования, приведены в [12]. Следует отметить, что семейство ФП ОВТД без учёта влияния соседних лопаток, также полученное путём моделирования, приведено в [14]. Разность ФП с учётом и без учёта соседних лопаток в обоих положениях РК обеспечивает количественную оценку их влияния в виде функциональной зависимости $\Delta L_{\text{СЛ(I)}}$ и $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}$ от РЗ (y). При этом вычислительные эксперименты, в том числе и функции $\Delta L_{\text{СЛ(I)}}(y)$ и $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}(y)$, были получены при различных значениях шага установки лопаток $z_{\text{ш}}$ (16, 24 и 30 мм).

В [12] приведены результаты исследования ещё одного МФ — температуры как контролируемой лопатки (КЛ), так и соседних лопаток. Показано, что с повышением температуры возрастает удельное сопротивление материала лопатки, вызывающее увеличение эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ. С учётом этого выражение (2) примет вид

$$L_{\text{СТКЛСЛ}\Theta\text{(I)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_\Theta - \Delta L_y - \Delta L_{\text{СЛ(I)}} + \Delta L_{\text{КЛ}\Theta} + \Delta L_{\text{СЛ}\Theta\text{(I)}}; \quad (3)$$

$$L_{\text{СТСЛ}\Theta\text{(II)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_\Theta - \Delta L_{\text{СЛ(II)}} + \Delta L_{\text{СЛ}\Theta\text{(II)}},$$

где $\Delta L_{\text{КЛ}\Theta}$, $\Delta L_{\text{СЛ}\Theta\text{(I)}}$, $\Delta L_{\text{СЛ}\Theta\text{(II)}}$ — изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с влиянием температуры контролируемой и соседних лопаток в положениях РК I и РК II соответственно.

Эксперименты, проведённые на той же модели ЭМВ ЧЭ с контролируемой температурой и соседними лопатками при тех же значениях $z_{\text{ш}}$, обеспечили вычисление $L_{\text{СТКЛСЛ}\Theta\text{(I)}}^{\text{ext}}$ и $L_{\text{СТСЛ}\Theta\text{(II)}}^{\text{ext}}$, а разность их значений, полученных без учёта влияния температуры лопаток ($L_{\text{СТСЛ(I)}}^{\text{ext}}$ и $L_{\text{СТСЛ(II)}}^{\text{ext}}$), позволила дать количественные оценки изменениям $\Delta L_{\text{КЛ}\Theta}$, $\Delta L_{\text{СЛ}\Theta\text{(I)}}$, $\Delta L_{\text{СЛ}\Theta\text{(II)}}$ в зависимости от координаты y и использовать их в качестве исходных данных для исследования системы измерения РЗ.

Влияние ОС РК (x -координата) как МФ рассматривалось в [11]. С учётом влияния ОС выражение (1) примет вид

$$L_{\text{СТX(I)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_\Theta - \Delta L_y + \Delta L_x; \quad L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_\Theta, \quad (4)$$

где ΔL_x — изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с ОС (x) (предполагается, что ОС не оказывает влияния на эквивалентную индуктивность в положении РК II, сохраняющую прежнее значение).

Для количественной оценки влияния $OC(x)$ также использовалась модель ЭМВ ЧЭ с торцевой частью компрессорной лопатки в предположении размещения центра ЧЭ и начала системы отсчёта $OXYZ$ в геометрическом центре лопатки. Результаты моделирования были получены при наличии $OC(x)$ ($L_{СТХ}^{ext}$ для $x = \pm 3$ мм) и их отсутствии ($L_{СТ}^{ext}$ для $x = 0$), а разность ФП позволила найти искомую оценку ΔL_x как функцию координаты y при заданных значениях $x = \pm 3$ мм.

Функции влияния соседних лопаток на результаты предварительной обработки цифровых данных. В [13] приведена структурно-функциональная схема, поясняющая принципы построения системы измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД. Функционирование системы предусматривает два этапа. На первом осуществляется аналоговое преобразование искомого РЗ (y) и температуры (Θ) в изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ ($L_{СТ}$) и аналого-цифровое преобразование $L_{СТ}$ в цифровой код (C) на выходе измерительной цепи. На втором этапе проводится последующая предварительная обработка цифровых данных в реальном времени с помощью микроконтроллера (МК), которая включает в себя определение усреднённых экстремальных значений кодов межлопаточных промежутков ($\bar{C}_{(II)}^{ext}$) в положении РКII, поиск экстремальных значений кодов ($C_{(I)}^{ext}$) в положении РКИ, а также вычисление разности ($\Delta C = \bar{C}_{(II)}^{ext} - C_{(I)}^{ext}$). Если предположить идентичность всех межлопаточных промежутков, что вполне допустимо при анализе влияния рассматриваемых МФ, то $\bar{C}_{(II)}^{ext} = C_{(II)}^{ext}$, где $C_{(II)}^{ext}$ — экстремальное значение кода, соответствующего каждому межлопаточному промежутку. Тогда разность кодов $C_{(II)}^{ext} - C_{(I)}^{ext} = \Delta C$. На втором этапе также предусмотрена дополнительная обработка данных в целях их визуализации и дальнейшего анализа, которая выполняется в ПЭВМ и не требует использования МК, работающего в реальном времени.

На рис. 1 представлены структура ИЦ и временная диаграмма, поясняющая её работу. Подробное описание ИЦ и анализ её функционирования (без учёта влияния МФ) приведены в [14]. В ИЦ по дифференциальной схеме включены ОВТД и его имитатор (ИОВТД), преобразователи «ток-напряжение» (ПТН₁ и ПТН₂), масштабирующий усилитель (МУс) с дифференциальными входами (U_1 и U_2) и АЦП. Дифференциальная схема питается от источника напряжения E через ключ K , формирующий импульсы питания прямоугольной формы постоянной и очень малой длительности $\Delta t = 10^{-7}$ с. Входные токи в ПТН₁ и ПТН₂, равно как и напряжения на их выходах U_1 и U_2 , имеют пилообразную форму. Усиленное МУс разностное напряжение $U_1 - U_2$, соответствующее изменениям информативного параметра ОВТД, преобразуется в цифровой код в АЦП на выходе ИЦ.

Полагая, что $L_1 = L_{и} = L_0 - L_d^*$, где $L_d^* \geq \Delta L_{ymax}$ [14], с учётом (2) $L_2 = L_{СТСЛ(I)}^{ext} = L_0 + \Delta L_{\Theta} - \Delta L_y - \Delta L_{СЛ(I)}$ (в положении РКИ). Если в момент времени $t = 0$ появилось напряжение E на ОВТД и ИОВТД, можно записать $L_1(di_1/dt) \approx L_1(\Delta i_1/\Delta t) = E$ и $L_2(di_2/dt) \approx L_2(\Delta i_2/\Delta t) = E$, тогда разностное напряжение на выходах ПТН₁ и ПТН₂ (на входе МУс) примет вид $\Delta U_1 = E((1/L_1) - (1/L_2))$, а соответствующее ΔU_1 экстремальное значение кода может быть вычислено как

$$C_{(I)}^{ext} = K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_d^*}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{СЛ(I)}}{L_0} \right) \times \\ \times \frac{1}{1 - L_d^*/L_0} \frac{1}{1 + \Delta L_{\Theta}/L_0 - \Delta L_y/L_0 - \Delta L_{СЛ(I)}/L_0} \quad (5)$$

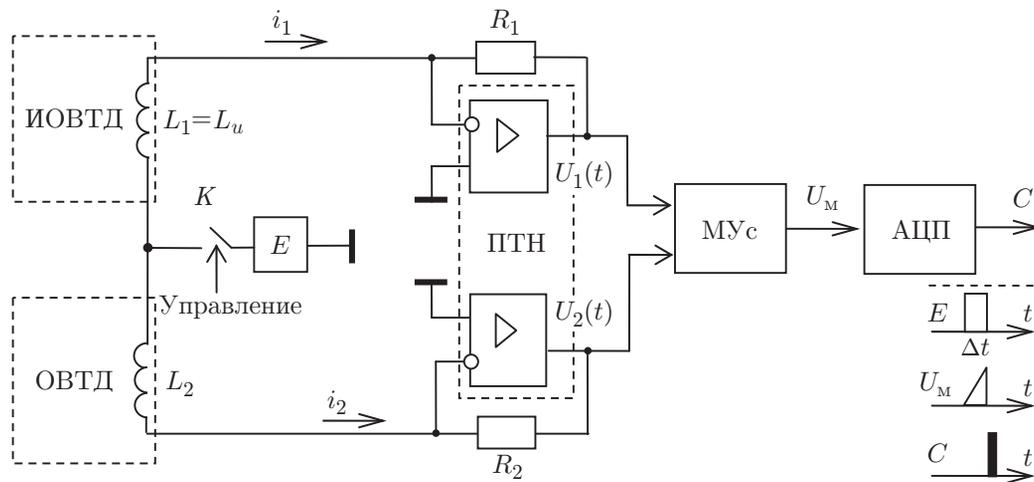


Рис. 1. Измерительная цепь и временные диаграммы

(предполагается, что $(R \Delta t / L_0) = 1$, где $R = R_1 = R_2$, K_M — коэффициент масштабирования МУс, K_C — коэффициент размерностью $1/B$).

Если в знаменателях дробных множителей в выражении (5) пренебречь слагаемыми $\Delta L_\Theta / L_0$, L_d^* / L_0 , $\Delta L_y / L_0$ и $\Delta L_{\text{СЛ(I)}} / L_0$, то

$$C_{(I)}^{ext} \approx K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_\Theta}{L_0} + \frac{L_d^*}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(I)}}}{L_0} \right). \quad (6)$$

В положении РКII $L_1 = L_{II} = L_0 - L_d^*$, $L_2 = L_{\text{СТ(II)}}^{ext} = L_0 + \Delta L_\Theta - \Delta L_{\text{СЛ(II)}}$, а по аналогии с $\Delta U_{(I)}$ определяется разностное напряжение $\Delta U_{(II)}$ и соответствующее экстремальное значение кода

$$C_{(II)}^{ext} = K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_\Theta}{L_0} + \frac{L_d^*}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{L_0} \right) \frac{1}{1 - L_d^* / L_0} \frac{1}{1 + \Delta L_\Theta / L_0 - \Delta L_{\text{СЛ(II)}} / L_0}. \quad (7)$$

Тогда, пренебрегая в знаменателях дробных множителей выражения (7) слагаемыми $\Delta L_\Theta / L_0$, L_d^* / L_0 , $\Delta L_{\text{СЛ(II)}} / L_0$, можно записать

$$C_{(II)}^{ext} \approx K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_\Theta}{L_0} + \frac{L_d^*}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{L_0} \right). \quad (8)$$

Представляется очевидным, что разности кодов $C_{(II)}^{ext}$ и $C_{(I)}^{ext}$, полученных согласно выражениям (8) и (6), обеспечивают полную самокомпенсацию температурных воздействий на ОБТД. Однако наличие дробных множителей в выражениях (7) и (5), которые включают слагаемые $\Delta L_\Theta / L_0$ в знаменателях, приводит к недокомпенсации таких воздействий. В [15] предложен алгоритмический способ устранения недокомпенсации, который реализуется в программном обеспечении МК.

Допуская идентичность межлопаточных промежутков, разность экстремальных значений кодов в положениях РКII и РКI может быть представлена как

$$\Delta C = C_{(II)}^{ext} - C_{(I)}^{ext}. \quad (9)$$

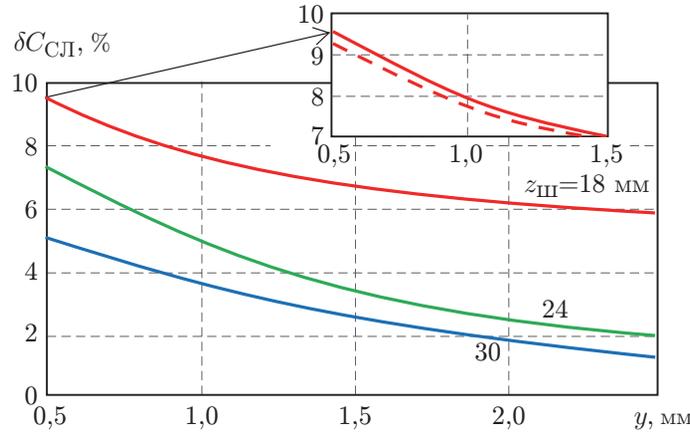


Рис. 2. Функции влияния соседних лопаток в идеализированной (сплошные кривые) и реальной (штриховая кривая) ИЦ при $z_{III} = 18, 24, 30$ мм

С учётом (6) и (8), ориентируясь на слагаемые в скобках, экстремальные значения кодов $C_{(I)}^{ext}$, $C_{(II)}^{ext}$ можно записать в виде сумм

$$C_{(I)}^{ext} = \Delta C_{\Theta} + C_d^* - \Delta C_y - \Delta C_{СЛ(I)}, \quad (10)$$

$$C_{(II)}^{ext} = \Delta C_{\Theta} + C_d^* - \Delta C_{СЛ(II)}, \quad (11)$$

причём ΔC_{Θ} , C_d^* , ΔC_y , $\Delta C_{СЛ(I)}$, $\Delta C_{СЛ(II)}$ зависят от отношений $\Delta L_{\Theta}/L_0$, L_d^*/L_0 , $\Delta L_y/L_0$, $\Delta L_{СЛ(I)}/L_0$, $\Delta L_{СЛ(II)}/L_0$ соответственно.

После подстановки (10) и (11) в выражение (9) разность кодов примет вид

$$\Delta C = \Delta C_y + \Delta C_{СЛ(I)} - \Delta C_{СЛ(II)}. \quad (12)$$

Тогда ФВ соседних лопаток можно представить выражением

$$\delta C_{СЛ} = \frac{\Delta C_{СЛ(I)} - \Delta C_{СЛ(II)}}{\Delta C_{y \max}} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где $\Delta C_{y \max}$ — максимально возможное изменение кода в заданном диапазоне изменений РЗ.

Из выражения (13) можно получить ФВ соседних лопаток как в положении РКИ $\delta C_{СЛ(I)} = (\Delta C_{СЛ(I)}/\Delta C_{y \max}) \cdot 100\%$, так и в положении РКИ (без учёта знака) $\delta C_{СЛ(II)} = (\Delta C_{СЛ(II)}/\Delta C_{y \max}) \cdot 100\%$.

На рис. 2 представлено семейство ФВ $\delta C_{СЛ}(y)$ при трёх значениях шага z_{III} 18, 24 и 30 мм с учётом суммарного влияния соседних лопаток в обоих положениях РК. При $z_{III} = 18$ мм максимальное значение $\delta L_{СЛ}$ достигает почти 10 % и снижается до 5 % при $z_{III} = 30$ мм.

Вычисления семейств ФВ при тех же значениях шага z_{III} по отдельности (только для соседних лопаток в положении РКИ ($\delta C_{СЛ(I)}(y)$) и только для соседних лопаток в положении РКИ ($\delta C_{СЛ(II)}(y)$)) показали, что влияние соседних лопаток в положении РКИ многократно превышает его влияние в положении РКИ, причём перепад усиливается с увеличением z_{III} , хотя характер изменений сохраняется: ФВ монотонно возрастают с уменьшением РЗ(y).

Как и ожидалось, функции влияния, полученные в ИЦ с идеализированными ФП (выражения (6) и (8)), идентичны ФВ, представленным в [12] для соответствующего диапазона изменений РЗ от 0,5 до 2,5 мм. Однако ФП реальной ИЦ (выражения (5) и (7)) отличаются от идеализированной наличием дробных множителей

$$D_{(I)} = \frac{1}{1 - L_d^*/L_0} \frac{1}{1 + \Delta L_\Theta/L_0 - \Delta L_y/L_0 - \Delta L_{СЛ(I)}/L_0},$$

$$D_{(II)} = \frac{1}{1 - L_d^*/L_0} \frac{1}{1 + \Delta L_\Theta/L_0 - \Delta L_{СЛ(II)}/L_0},$$

в которых величина первых сомножителей определяется $L_d^* = \Delta L_{y \max}$ и равна постоянному числу 1,019. Что касается вторых сомножителей, то наличие в их знаменателях слагаемого $\Delta L_\Theta/L_0$ означает недокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД, которая устраняется способами, предложенными в [15], а потому влияние $\Delta L_\Theta/L_0$ можно не учитывать. Тогда выражения для дробных множителей примут вид

$$D_{(I)} = 1,019 \frac{1}{1 - (\Delta L_y/L_0 + \Delta L_{СЛ(I)}/L_0)}, \quad D_{(II)} = 1,019 \frac{1}{1 - \Delta L_{СЛ(II)}/L_0}.$$

Поскольку слагаемые в знаменателях дробных множителей $((\Delta L_y/L_0) - (\Delta L_{СЛ(I)}))/L_0 \ll 1$ и $(\Delta L_{СЛ(I)}/L_0) \ll 1$, то, воспользовавшись разложением в степенные ряды [16] и ограничившись первыми двумя слагаемыми, выражения для дробных множителей можно записать в виде

$$D_{(I)} = 1,019(1 + \Delta L_y + \Delta L_{СЛ(I)}); \quad D_{(II)} = 1,019(1 + \Delta L_{СЛ(II)}). \quad (14)$$

Представляется очевидным, что дробные множители $D_{(I)}$ и $D_{(II)}$ в соответствии с выражениями (5) и (7) оказывают влияние не только на экстремальные значения кодов $C_{(I)}^{ext}$, $C_{(II)}^{ext}$, но и на их разность:

$$\Delta C = C_{(II)}^{ext} - C_{(I)}^{ext} = \Delta C_\Theta(D_{(II)} - D_{(I)}) + C_d(D_{(II)} - D_{(I)}) + \Delta C_y D_{(I)} + \Delta C_{СЛ(I)} D_{(I)} - \Delta C_{СЛ(II)} D_{(II)}. \quad (15)$$

Подстановка в выражение (15) $D_{(I)}$ и $D_{(II)}$ из (14) приводит к появлению слагаемых, которые, как показали числовые оценки, почти на два порядка меньше двух последних в (15). Поэтому для получения ФВ соседних лопаток в реальной ИЦ можно использовать выражение

$$\delta C_{СЛ} = \frac{\Delta C_{СЛ(I)} D_{(I)} - \Delta C_{СЛ(II)} D_{(II)}}{\Delta C_{y \max}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

На рис. 2 ФВ в виде зависимости $\delta C_{СЛ}(y)$ представлены пунктиром для $z_{ш} = 18$ мм. Максимальное отклонение от функции $\delta C_{СЛ}(y)$ составляет 0,3 % при $y = 0,5$ мм. Для $z_{ш} = 24, 30$ мм они составляют 0,18 % и 0,12 % соответственно. Перечисленные отклонения в десятки раз меньше полученных ФВ и не превышают 3 % от их максимального значения.

Функции влияния температуры контролируемой и соседних лопаток. Здесь используется тот же подход к анализу ИЦ, что и в разделе выше, который сводится к получению ФП, определению их разности, а затем искомым ФВ. С учётом (3) в ИЦ (см. рис. 1) для положения РКІ $L_2 = L_{СТКЛСЛ\Theta(I)}^{ext} = L_0 + \Delta L_\Theta - \Delta L_y - \Delta L_{СЛ(I)} + \Delta L_{КЛ\Theta} +$

+ $\Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{I})}$ ($L_1 = L_{\text{и}} = L_0 - L_{\text{д}}^*$). Далее, опустив промежуточные преобразования и сохранив принятые допущения, можно записать

$$C_{(\text{I})}^{\text{ext}} = K_{\text{м}}K_{\text{С}}E \left(\frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_{\text{д}}^*}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ}(\text{I})}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{КЛ}\Theta}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{I})}}{L_0} \right) \times \\ \times \frac{1}{1 - L_{\text{д}}^*/L_0} \frac{1}{1 + \Delta L_{\Theta}/L_0 - \Delta L_y/L_0 - \Delta L_{\text{СЛ}(\text{I})}/L_0 + \Delta L_{\text{КЛ}\Theta}/L_0 + \Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{I})}/L_0}. \quad (17)$$

Если в знаменателях дробных множителей в (17) пренебречь слагаемыми $\Delta L_{\Theta}/L_0$, $L_{\text{д}}^*/L_0$, $\Delta L_y/L_0$, $\Delta L_{\text{СЛ}(\text{I})}/L_0$, $\Delta L_{\text{КЛ}\Theta}/L_0$ и $\Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{I})}/L_0$, то в положении РКІ

$$C_{(\text{I})}^{\text{ext}} \approx K_{\text{м}}K_{\text{С}}E \left(\frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_{\text{д}}^*}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ}(\text{I})}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{КЛ}\Theta}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{I})}}{L_0} \right). \quad (18)$$

В положении РКІІ L_1 остаётся прежним и в соответствии с выражениями (3) $L_2 = L_{\text{СТСЛ}\Theta(\text{II})}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_{\Theta} - \Delta L_{\text{СЛ}(\text{II})} + \Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{II})}$, а

$$C_{(\text{II})}^{\text{ext}} = K_{\text{м}}K_{\text{С}}E \left(\frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_{\text{д}}^*}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ}(\text{II})}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{II})}}{L_0} \right) \times \\ \times \frac{1}{1 - L_{\text{д}}^*/L_0} \frac{1}{1 + \Delta L_{\Theta}/L_0 - \Delta L_{\text{СЛ}(\text{II})}/L_0 + \Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{II})}/L_0}. \quad (19)$$

Тогда, пренебрегая в знаменателе дробных множителей слагаемыми $\Delta L_{\Theta}/L_0$, $L_{\text{д}}^*/L_0$, $\Delta L_{\text{СЛ}(\text{II})}/L_0$ и $\Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{II})}/L_0$, в положении РКІІ

$$C_{(\text{II})}^{\text{ext}} \approx K_{\text{м}}K_{\text{С}}E \left(\frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_{\text{д}}^*}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ}(\text{II})}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{СЛ}\Theta(\text{II})}}{L_0} \right). \quad (20)$$

Выражения экстремальных значений кодов в предыдущем и данном разделах отличаются, но обозначены одинаково ($C_{(\text{I})}^{\text{ext}}$ и $C_{(\text{II})}^{\text{ext}}$), то же касается и их разности (ΔC), а также дробных множителей ($D_{(\text{I})}$ и $D_{(\text{II})}$). По мнению авторов, нет необходимости в использовании отличительных индексов (СЛ, КЛСЛ Θ), поскольку перечисленные обозначения ограничены рамками каждого раздела. Те же соображения относятся и к аналогичным обозначениям в следующем разделе. Коды $C_{(\text{I})}^{\text{ext}}$ и $C_{(\text{II})}^{\text{ext}}$ в случае идеализации ИЦ находят из выражений (20) и (18), которые по аналогии с (10) и (11) могут быть представлены в виде

$$C_{(\text{I})}^{\text{ext}} = \Delta C_{\Theta} + C_{\text{д}}^* - \Delta C_y - \Delta C_{\text{СЛ}(\text{I})} + \Delta C_{\text{КЛ}\Theta} + \Delta C_{\text{СЛ}\Theta(\text{I})}, \quad (21)$$

$$C_{(\text{II})}^{\text{ext}} = \Delta C_{\Theta} + C_{\text{д}}^* - \Delta C_{\text{СЛ}(\text{II})} + \Delta C_{\text{СЛ}\Theta(\text{II})}. \quad (22)$$

С учётом (21) и (22) разность кодов $\Delta C = \Delta C_y + \Delta C_{\text{СЛ}(\text{I})} - \Delta C_{\text{СЛ}(\text{II})} - \Delta C_{\text{КЛ}\Theta} - \Delta C_{\text{СЛ}\Theta(\text{I})} + \Delta C_{\text{СЛ}\Theta(\text{II})}$.

Тогда ФВ температурных воздействий на лопатки можно представить как:

$$\delta C_{\text{КЛСЛ}\Theta} = \frac{\Delta C_{\text{СЛ}\Theta(\text{II})} - \Delta C_{\text{КЛ}\Theta} - \Delta C_{\text{СЛ}\Theta(\text{I})}}{\Delta C_{y \text{ max}}} \cdot 100\%. \quad (23)$$

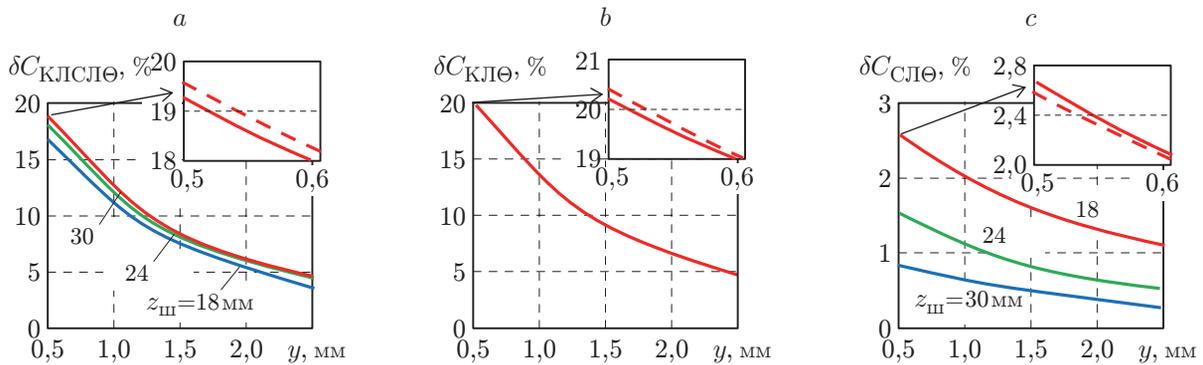


Рис. 3. Функции влияния температуры в идеализированной (сплошные кривые) и реальной (штриховые кривые) ИЦ: контролируемой и соседних лопаток (а), только контролируемой (б) и суммарного действия температуры соседних лопаток (с)

Из выражения (23) можно получить ФВ температуры как контролируемой, так и соседних лопаток:

$$\delta C_{\text{КЛӨ}} = \frac{\Delta C_{\text{КЛӨ}}}{\Delta C_{y \text{ max}}} \cdot 100\%, \quad \delta C_{\text{СЛӨ}} = \frac{\Delta C_{\text{СЛӨ(II)}} - \Delta C_{\text{СЛӨ(I)}}}{\Delta C_{y \text{ max}}} \cdot 100\%.$$

На рис. 3, а представлены ФВ температуры контролируемой и соседних лопаток ($\delta C_{\text{КЛСЛӨ}}(y)$) в предположении, что шаг установки лопаток на РК составляет 18, 24 и 30 мм. На рис. 3, б представлены ФВ температуры только контролируемой лопатки ($\delta C_{\text{КЛӨ}}(y)$), а на рис. 3, с — ФВ, связанные с суммарным действием температуры соседних лопаток в положениях РК I и РК II ($\delta C_{\text{СЛӨ}}(y)$). Как следует из графиков, даже при минимальном значении $z_{\text{ш}} = 18$ мм $\delta L_{\text{СЛӨ}}$ не превышает 3 %. Особо необходимо отметить, что данные на рис. 3, с в основном определяются влиянием соседних лопаток в положении РК II. Влияние соседних лопаток в положении РК I пренебрежимо мало. Исследования, проведённые для $z_{\text{ш}} = 24$ мм, показали, что в положении РК I максимальное значение $\delta L_{\text{СЛӨ}}$ составляет менее 0,1 %, и это более чем на порядок меньше, чем в положении РК II. Вместе с тем влияние температуры контролируемой лопатки почти на порядок выше (20 %) (см. рис. 3, б), а соседние лопатки снижают его на 2–3 % (см. рис. 3, а, б).

С учётом вышеприведённого анализа (ранее было определено численное значение первого сомножителя (1,019), а также отмечалась возможность устранения слагаемого $\Delta L_{\text{Ө}}/L_0$ в знаменателях второго сомножителя) дробные множители ФП в выражениях (17) и (19) можно записать как

$$D_{\text{(I)}} = 1,019 \left[1 - \left(\frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{СЛ(I)}}}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{КЛӨ}}}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛӨ(I)}}}{L_0} \right) \right]^{-1},$$

$$D_{\text{(II)}} = 1,019 \left[1 - \left(\frac{\Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛӨ(II)}}}{L_0} \right) \right]^{-1}$$

и также представить степенным рядом, ограничившись двумя первыми слагаемыми:

$$D_{\text{(I)}} = 1,019 \left(1 + \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{СЛ(I)}}}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{КЛӨ}}}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛӨ(I)}}}{L_0} \right);$$

$$D_{(II)} = 1,019 \left(1 + \frac{\Delta L_{СЛ(II)}}{L_0} - \Delta L_{СЛ\Theta(II)} \right). \quad (24)$$

С учётом $D_{(I)}$ и $D_{(II)}$ разность экстремальных значений кодов примет вид

$$\begin{aligned} \Delta C = \Delta C_{\Theta}(D_{(II)} - D_{(I)}) + C_{д}^*(D_{(II)} - D_{(I)}) + \Delta C_y D_{(I)} + \Delta C_{СЛ(I)} D_{(I)} - \Delta C_{СЛ(II)} D_{(II)} + \\ + \Delta C_{СЛ\Theta(II)} D_{(II)} - \Delta C_{КЛ\Theta(I)} D_{(I)} - \Delta C_{СЛ\Theta(I)} D_{(I)}. \end{aligned} \quad (25)$$

Подстановка $D_{(I)}$ и $D_{(II)}$ из (24) в (25) приводит к появлению слагаемых второго порядка малости, которыми можно пренебречь. Поэтому для получения ФВ температуры контролируемой и соседних лопаток в реальной ИЦ используем выражение

$$\delta C_{КЛСЛ\Theta} = \frac{\Delta C_{СЛ\Theta(II)} D_{(II)} - \Delta C_{КЛ\Theta(I)} D_{(I)} - \Delta C_{СЛ\Theta(I)} D_{(I)}}{\Delta C_{y \max}} \cdot 100\%. \quad (26)$$

На рис. 3 ФВ температуры контролируемой и соседних лопаток представлены штриховыми кривыми ($\delta C_{КЛСЛ\Theta}(y)$ для $z_{ш} = 30$ мм (a), $\delta C_{СЛ\Theta}(y)$ для $z_{ш} = 18$ мм (b)). Из графиков следует, что отклонения ФВ идеализированной и реальной ИЦ возрастают с уменьшением $P3(y)$, но не превышают 0,24 % при $y = 0,5$ мм (a). Те же отклонения составляют 0,22 % (b) и 0,08 % (c). Для уменьшения влияния температуры контролируемой и соседних лопаток предусматривается экспериментальное получение градуировочных характеристик (ГХ) перед началом работы системы. Используемые в системе ОВТД и не менее трёх лопаток, имитирующих фрагмент РК компрессора, устанавливаются в специальной термокамере с градуировочным устройством и прибором контроля РЗ. Полученные при номинальной температуре ГХ (они соответствуют ФП в положениях РК I и РК II) используются при обработке данных в процессе эксплуатации системы измерения [17].

Функции влияния осевых смещений. Применяется тот же подход, что и в разделах выше. С учётом выражений (4) в ИЦ (см. рис. 1) для положения РК I $L_2 = L_{СТХ(I)}^{ext} = L_0 + \Delta L_{\Theta} - \Delta L_y + \Delta L_x$ ($L_1 = L_{и} = L_0 - L_{д}^*$). Далее, опуская промежуточные преобразования и сохраняя принятые допущения, можно записать

$$\begin{aligned} C_{(I)}^{ext} = K_M K_{CE} \left(\frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_{д}^*}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_x}{L_0} \right) \times \\ \times \frac{1}{1 - L_{д}^*/L_0} \frac{1}{1 + \Delta L_{\Theta}/L_0 - \Delta L_y/L_0 + \Delta L_x/L_0}. \end{aligned} \quad (27)$$

Если в знаменателях дробных множителей (27) пренебречь слагаемыми $\Delta L_{\Theta}/L_0$, $L_{д}^*/L_0$, $\Delta L_y/L_0$ и $\Delta L_x/L_0$, то код на выходе ИЦ в положении РК I будет иметь вид

$$C_{(I)}^{ext} \approx K_M K_{CE} \left(\frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_{д}^*}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_x}{L_0} \right). \quad (28)$$

В положении РК II $OC(x)$ не влияют на изменения кода, поэтому

$$C_{(II)}^{ext} = K_M K_{CE} \left(\frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + L_{д}^* \right) \frac{1}{1 + L_{д}^*/L_0} \frac{1}{1 + \Delta L_{\Theta}/L_0} \quad (29)$$

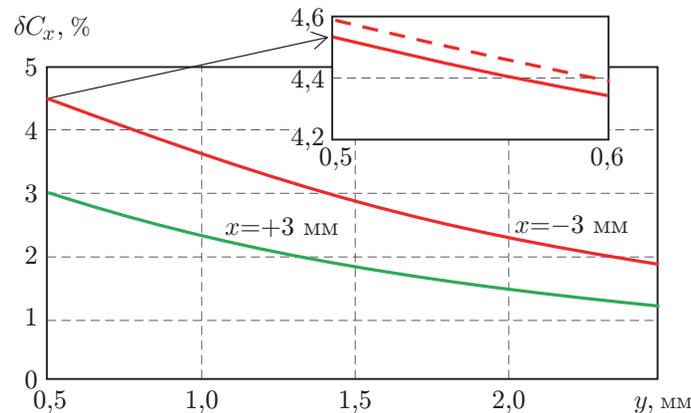


Рис. 4. Функции влияния ОС(x) в идеализированной (сплошные кривые) и реальной (штриховые кривые) ИЦ

или, пренебрегая в знаменателе дробных множителей слагаемыми $\Delta L_{\Theta}/L_0$, L_d^*/L_0 ,

$$C_{(II)}^{ext} \approx K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_d^*}{L_0} \right). \quad (30)$$

Для количественной оценки ФВ ОС(x) выражения (28) и (30) могут быть представлены как суммы слагаемых:

$$C_{(I)}^{ext} = \Delta C_{\Theta} + C_d^* - \Delta C_y + \Delta C_x, \quad (31)$$

$$C_{(II)}^{ext} = \Delta C_{\Theta} + C_d^*. \quad (32)$$

Вычисляемая в системе измерения РЗ разность кодов зависит только от РЗ(y) и ОС(x) ($\Delta C = \Delta C_{(II)}^{ext} - \Delta C_{(I)}^{ext} = \Delta C_y - \Delta C_x$), а ФВ ОС(x) определяется выражением

$$\delta C_x = \frac{\Delta C_x}{\Delta C_{y \max}} \cdot 100\%. \quad (33)$$

На рис. 4 представлены ФВ $\delta C_x(y)$. В диапазоне изменений ОС (x -координаты) от -3 до $+3$ мм ФВ не превышают 5 % при $y = 0,5$ мм и 2 % при $y = 2,5$ мм.

С учётом проведённого ранее анализа разность кодов на выходе ИЦ может быть представлена в виде

$$\Delta C = \Delta C_{\Theta}(D_{(II)} - D_{(I)}) + C_d^*(D_{(II)} - D_{(I)}) + \Delta C_y D_{(I)} - \Delta C_x D_{(I)}, \quad (34)$$

где дробные множители $D_{(I)}$ и $D_{(II)}$ определяются как $D_{(I)} = 1,019/[1 - (\Delta L_y/L_0 + \Delta L_x/L_0)]$ и $D_{(II)} = 1,019$. Разлагая $D_{(I)}$ в степенной ряд и ограничиваясь двумя слагаемыми, можно записать $D_{(I)} = 1,019(1 + \Delta L_y/L_0 - \Delta L_x/L_0)$.

Подстановка $D_{(I)}$ и $D_{(II)}$ в выражение (34) приводит к появлению слагаемых второго порядка малости, которыми можно пренебречь. В итоге ФВ ОС(x) реальной ИЦ представим в виде

$$\delta C_x = \frac{\Delta C_x D_{(I)}}{\Delta C_{y \max}} \cdot 100\%.$$

На рис. 4 ФВ $OC(x)$ ($\delta C_x(y)$) обозначена на фрагменте штриховой кривой. Её отличие от ФВ идеализированной ИЦ составляет порядка 0,06 % (при $x = -3$ мм). С увеличением OC $\delta C_x(y)$ возрастает. Когда связанные с ростом OC погрешности становятся недопустимо большими, приходится использовать кластерные методы, обеспечивающие измерение не только $PЗ(y)$, но и $OC(x)$ [8]. При этом необходим дополнительный ОВТД, а значит, и дополнительное установочное отверстие в статорной оболочке.

Заключение. Для количественной оценки влияния различных МФ на результаты обработки цифровых данных в системе измерения $PЗ$ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД предложена и реализована единая методика, предусматривающая использование в качестве исходных данных результатов моделирования ЭМВ ЧЭ ОВТД с торцами контролируемой и соседних лопаток, применяемых в компрессоре ГТД, с учётом влияния исследуемых МФ; получение ФП в аналитическом виде как зависимости экстремальных значений кодов с выхода ИЦ от $PЗ(y)$ с учётом МФ в положениях РКІ и РКІІ; получение разности экстремальных значений кодов в указанных положениях РК и определение ФВ каждого из исследуемых МФ, представленных в виде зависимостей от $PЗ(y)$ при заданных значениях шага установки лопаток.

Исследования показали, что вне зависимости от вида МФ ФВ монотонно возрастают с уменьшением $PЗ(y)$ и достигают максимума при $y = 0,5$ мм. При идеализации ИЦ в составе системы измерения, когда в ФП не учитывается влияние дробных множителей, ФВ соседних лопаток достигает максимального значения (около 10 %) при $z_{ш} = 18$ мм, ФВ температуры контролируемой и соседних лопаток достигают максимума (почти 20 %) при $z_{ш} = 30$ мм, а ФВ OC — примерно 5 % при $x = -3$ мм. Перечисленные количественные оценки идентичны полученным в [11, 12], где исследования ограничивались ФВ на информативные параметры ОВТД.

Что касается дробных множителей в ФП реальных ИЦ, то их максимальное влияние также проявляется при $y = 0,5$ мм, но изменения исследуемых ФВ составляют не более 0,3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данильченко В. П., Лукачев С. В., Ковылов Ю. Л. и др. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2008. 619 с.
2. Прокопец А., Ревзин Б., Рожков А. Необходимость диагностирования радиальных зазоров в проточной части газотурбинных двигателей // Газотурбинные технологии. 2004. **31**, № 4. С. 5–7.
3. Кузнецов Н. Д., Данильченко В. П., Резник В. Е. Управление радиальными зазорами в турбокомпрессорах авиационных ГТД. Самара: Самар. авиац. ин-т, 1991. 109 с.
4. Lattime S., Steinetz B. Turbine engine clearance control systems: Current practices and future directions // Proc. of the 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Indianapolis, USA, 7–10 July, 2002. 22 p. DOI: 10.2514/6.2002-3790.
5. Kratz J. L., Chapman J. W., Guo T.-H. A parametric study of actuator requirements for active turbine tip clearance control of a modern high bypass turbofan engine // Proc. of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Charlotte, USA, 26–30 June, 2017. Vol. 6. V006T05A005. DOI: 10.1115/GT2017-63472.
6. Иноземцев А. А., Бажин С. В., Снитко М. А. Вопросы оптимизации радиальных зазоров ТВД авиационного ГТД // Вестн. двигателестроения. 2012. № 2. С. 149–154.

7. **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.
8. **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.
9. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипов П. Е. и др.** Эквивалентные параметры одновиткового вихретокового датчика в измерительной цепи с импульсным питанием // Датчики и системы. 2016. № 2. С. 27–35.
10. **Боровик С. Ю., Белопухов В. Н., 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.
11. **Кутейникова М. М., Подлипов П. Е.** Влияние осевых смещений рабочего колеса турбомашин на результаты измерения радиальных зазоров при использовании самокомпенсации температурных воздействий на датчик // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2017. 56, № 4. С. 76–83.
12. **Подлипов П. Е.** Влияние температуры на контролируемую и соседние лопатки рабочего колеса компрессора при измерении радиальных зазоров с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2018. 59, № 3. С. 106–117.
13. **Боровик С. Ю., Белопухов В. Н., Подлипов П. Е.** Структура и алгоритмы функционирования систем измерения радиальных зазоров с самокомпенсацией температурных воздействий // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2018. 60, № 4. С. 52–65.
14. **Боровик С. Ю., Белопухов В. Н., Кутейникова М. М. и др.** Измерение радиальных зазоров в газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик. Семейства ФП датчика и ИЦ // Датчики и системы. 2019. № 4. С. 39–46.
15. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Влияние температуры в поточной части турбины на результаты измерений радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Автометрия. 2018. 54, № 1. С. 124–131.
16. **Двайт Г. Б.** Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1964. 228 с.
17. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К. и др.** Влияние соседних лопаток на результат измерения радиальных зазоров в турбине // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. 16, № 5. С. 327–336.

Поступила в редакцию 20.05.2019

После доработки 29.05.2019

Принята к публикации 29.05.2019
