

УДК 681.518

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

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

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

Исследуется влияние температуры в проточной части турбины на информативные параметры (эквивалентные индуктивности первичных обмоток согласующих трансформаторов) одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительным элементом в виде отрезка проводника, применяемых в составе систем автоматизации испытаний газотурбинных двигателей. При этом объектами температурных воздействий являются как датчики, так и контролируемые турбинные лопатки. С помощью существующей модели электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента и торцевой части контролируемой лопатки даются количественные оценки температурных изменений эквивалентных индуктивностей чувствительных элементов и первичных обмоток согласующих трансформаторов, а в процессе экспериментальных исследований температурных воздействий на датчик (при отсутствии лопатки в зоне чувствительности) — соответствующих изменений его информативного параметра. Представлены семейства функций преобразования в виде зависимостей информативных параметров от радиальных и осевых смещений при нормальной (20 °С) и номинальной (1000 °С) температурах, а по их разности определяются семейства функций влияния температуры, характеризующие возможные температурные погрешности при любых значениях радиальных и осевых смещений в диапазонах их изменений.

Ключевые слова: турбина, лопатки, радиальные и осевые смещения, одновитковый вихретоковый датчик, чувствительный элемент, температурные воздействия, семейство функций преобразования, семейство функций влияния температуры.

DOI: 10.15372/AUT20170412

Введение. В современном энергетическом машиностроении нередко основные проблемы возникают из-за противоречивых требований обеспечения высоких энергетических, экономических и экологических показателей силовых установок при условии сохранения их надёжности и ресурса. Применительно к газотурбинным двигателям (ГТД) одним из наиболее значимых параметров, определяющих надёжность и экономичность, является величина радиального зазора между статором и торцами рабочих лопаток компрессора и турбины. Поэтому вопросы получения достоверной измерительной информации о перемещениях элементов конструкции двигателя, формирующих зазоры, очень важны для разработчиков ГТД [1–4].

Известны работы, посвящённые теории и принципам построения вихретоковых датчиков (ВТД), используемых для измерений перемещений элементов конструкций силовых установок, устройств на их основе, а также исследованиям температурных воздействий на ВТД [5–8]. Одновитковые ВТД (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника — это отдельная и самостоятельная разновидность ВТД, ориентированная на применение в компрессорах и турбинах двигателя, причём ЧЭ ОВТД размещаются в проточной части при температуре до 1000 °С [9].

Известны методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, предусматривающие применение кластера из двух ОВТД, в том числе метод, обеспечиваю-

ций повышенную чувствительность к радиальным смещениям в расширенном диапазоне осевых смещений торцов лопаток сложной формы, используемых в турбинах современных и перспективных ГТД [10, 11]. В системе отсчёта $0XYZ$, начало которой находится на внутренней поверхности статора, радиальным смещениям соответствует координата y и радиальный зазор между статором и торцами лопаток (важнейший параметр, от которого зависят надёжность и экономичность ГТД), осевым смещениям рабочего колеса — координата x , а смещениям в направлении его вращения — координата z .

В системе измерения координат x, y , реализующей, например, метод, представленный в [11], осуществляется коррекция температурных воздействий как на лопатку, с которой происходит электромагнитное взаимодействие ЧЭ, так и на элементы конструкции обоих датчиков. Коррекция предусматривает экспериментальное исследование градуировочных характеристик в виде зависимостей кодов от координат x, y и температуры θ ($C_1(x, y, \theta)$ и $C_2(x, y, \theta)$). Исследования проводятся перед стендовыми испытаниями ГТД с помощью термокамеры с размещённым в ней градуировочным устройством и контролируемой лопаткой, аналогичной тем, которые установлены на рабочем колесе.

В рабочем состоянии системы измерения формируют текущие значения кодов (в измерительной цепи с АЦП на выходе) C_1 и C_2 , а со встроенных в ОВТД термодатчиков поступают сигналы, представленные после обработки в виде физических значений θ . Далее составляется и решается система уравнений $C_1 = C_1(x, y, \theta)$ и $C_2 = C_2(x, y, \theta)$, которая дает информацию об искомым координатах x и y . Поскольку метод измерения, реализуемый в системе, обеспечивает расширение диапазона изменений координаты x , то градуировочные характеристики приобретают немонотонный характер и для решения системы уравнений приходится использовать специально разработанный алгоритм. Но, как показано в [12], при диапазоне изменений x от -5 до $+5$ мм для обеспечения погрешности вычислений координат x, y не более 1 % необходимо уменьшение шага по x, y и θ при получении градуировочных характеристик, что приводит к существенному повышению числа отсчётов*. Увеличение шага по x, y и θ ведёт к снижению трудоёмкости получения их семейств, но сопровождается ростом погрешностей определения искомым координат. К тому же важно отметить серьёзные затраты на создание градуировочного устройства, гарантирующего достаточно высокую точность, а также термокамеры, в которой установленные контролируемая лопатка и ОВТД должны находиться в условиях, идентичных номинальным режимам работы реальной турбины (при температуре до 1000 °С).

В связи с изложенным представляется очевидной необходимость поиска альтернативных подходов к решению задачи уменьшения влияния температурных воздействий на результаты измерений радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине. Конечная цель предлагаемого подхода — это отказ от экспериментального получения семейств градуировочных характеристик системы измерения и их замена более достоверными семействами функций преобразования в виде зависимостей кодов от координат x, y при различных значениях температуры, вычисленных с помощью более совершенных моделей. Реализация предлагаемого подхода на начальном этапе предусматривает детальные исследования влияния температурных воздействий на информативные параметры ОВТД и далее на коды АЦП на выходе измерительной цепи в составе системы измерения. При этом выявленные в процессе исследований составляющие погрешности, связанные с температурными воздействиями на ОВТД, должны устраняться с помощью вновь разработанных способов с использованием аппаратных и программных средств системы. Составляющие погрешности, связанные с влиянием температуры на контролируемую лопатку, уменьша-

*При заданном шаге 1 мм по осевым смещениям и 0,2 мм по радиальным смещениям (в диапазоне 2 мм) для заданной погрешности решения в 1 % в диапазоне изменений температуры от 20 до 1000 °С (с шагом 100 °С) только для одного семейства градуировочных характеристик необходима 1000 отсчётов.

ются в процессе решения приведённой выше системы уравнений, где семейства градуировочных характеристик заменяются семейством функций преобразования, полученным путём моделирования.

Вместе с тем приходится констатировать, что на фоне многолетнего использования существующего подхода в системах измерения, предназначенных для стендовых испытаний ГТД, до сегодняшнего дня оставались неизученными влияния температуры на элементы конструкции ОВТД и на датчик в целом, а также на лопатку, с которой ЧЭ находится в состоянии электромагнитного взаимодействия.

Предлагаемая работа призвана восполнить существующий пробел. В работе рассматривается реакция информативных параметров — эквивалентных индуктивностей ЧЭ и первичных обмоток согласующего трансформатора (СТ) ОВТД на температурные воздействия, причём объектами исследований являются как лопатки рабочего колеса турбины, так и ОВТД (реализуется первая часть начального этапа предлагаемого подхода). С помощью существующей модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ и торцевой части контролируемой лопатки [13] получены количественные оценки температурных изменений эквивалентных индуктивностей ЧЭ и первичных обмоток СТ, а в процессе экспериментальных исследований температурных воздействий на ОВТД при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика — соответствующие изменения его информативного параметра. Приводятся также семейства функций преобразования в виде зависимостей информативных параметров ОВТД₁ и ОВТД₂ от координат x, y смещений торцов лопаток при нормальной (20 °С) и номинальной (1000 °С) температурах, а по их разности вычисляются семейства функций влияния температуры, характеризующие возможные температурные погрешности при любых значениях координат x, y в диапазонах их изменений.

Постановка задачи. Предполагается, что воздействия среды в проточной части турбины приводят к изменениям температуры лопатки и элементов конструкции ОВТД в пределах от нормальной (20 °С) до 1000 °С и изменения температуры в указанных пределах вызывают соответствующие изменения геометрических и электрических параметров конечных элементов во всех частях лопатки, т. е. их размеров в модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки [13], размеров элементов конструкции ОВТД (ЧЭ, тоководов, объёмного витка [9, 10]), а также удельного сопротивления стали, используемой в лопатках и датчиках*. При этом расчёт линейных размеров и удельного сопротивления в зависимости от температуры производится по формулам

$$l_{\theta} = l_{20}(1 + \alpha_{\theta}\Delta\theta), \quad \rho_{\theta} = \rho_{20}(1 + \beta_{\theta}\Delta\theta),$$

где l_{20} и ρ_{20} — линейный размер и удельное сопротивление при температуре $\theta = 20$ °С; α_{θ} и β_{θ} — температурные коэффициенты расширения и сопротивления; $\Delta\theta = (\theta - 20)$ — изменение температуры от 20 до θ °С. Согласно [14] для выбранного материала лопатки и ЧЭ $\alpha_{\theta} = 0,0000129$ 1/град, $\beta_{\theta} = 0,0009731$ 1/град.

Представляется очевидным, что при температурных воздействиях изменения линейных размеров конечных элементов приводят к изменениям размеров лопатки по всем направлениям координатных осей системы отсчёта $OXYZ$. При этом расстояние от ЧЭ до торцевой части лопатки, т. е. радиальный зазор, предполагается неизменным.

Необходимо подчеркнуть, что остальные исходные данные в вычислительных экспериментах сохраняются такими же, как и в работе [15]. Однако следует отметить, что в

*Здесь речь идёт о применении метода конечных элементов и законов Био — Савара и Кирхгофа [13] не только в модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки, но и в моделях элементов конструкции ОВТД, а также интегрированной модели ОВТД, разработка которой ведётся, а её использование планируется на завершающем этапе предлагаемого подхода.

планируемых вычислительных экспериментах не предусмотрены исследования температурных воздействий на элементы конструкций ОВТД: ЧЭ, тоководы и объёмный виток СТ. Очевидно, что при импульсном питании ОВТД, которое используется в измерительной цепи с ОВТД [16], вихревые токи возникают не только в лопатке, но и в самом ЧЭ, а также тоководах и в объёмном витке. Можно утверждать, что при наличии модели ОВТД как единой конструкции, в которой интегрированы все перечисленные элементы, механизм влияния вихревых токов на эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ был бы аналогичен действию вихревых токов в лопатке на контур ЧЭ и на его эквивалентную индуктивность. Это означает, что температурные воздействия на ОВТД так или иначе вызывают температурные изменения размеров и удельного сопротивления материала ЧЭ, тоководов, объёмного витка СТ, а в конечном счёте и эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ. Но разработка такой модели на сегодняшний день ещё не завершена. Поэтому количественные оценки влияния температуры были получены экспериментально путём измерения индуктивности первичной обмотки СТ, которая в интегрированном виде отражает температурные изменения размеров и удельного сопротивления материала всех элементов конструкции ОВТД. Эксперимент проводился при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика. Результаты выражаются в процентах от величины индуктивности первичной обмотки СТ при нормальной температуре.

Оценки влияния температуры на контролируруемую лопатку и информативные параметры ОВТД. Для получения количественных оценок влияния температуры на контролируемую лопатку с помощью модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки определялись семейства функций преобразования в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ от координат x, y ($L_{\text{ЧЭ}_1}^3(x, y)$ и $L_{\text{ЧЭ}_2}^3(x, y)$) при нормальной и номинальной температурах (20 и 1000 °С соответственно). Методика проведения вычислительных экспериментов и их результаты — семейства функций преобразования при нормальной температуре в виде зависимостей $L_{\text{ЧЭ}_1}^3(x, y)$, $L_{\text{ЧЭ}_2}^3(x, y)$ и постоянных значениях y (0,5; 1; 1,5 мм) — представлены в [15].

На рис. 1, *a* изображено семейство функций преобразования в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей первичных обмоток СТ — $L_{\text{СТ}_1}^3(x)$ и $L_{\text{СТ}_2}^3(x)$ при $y = \text{const}$ (0,5; 1; 1,5 мм) и температуре 20 °С, причём форма каждого графика повторяет форму графиков в [15], поскольку точки $L_{\text{СТ}}^3$ и $L_{\text{ЧЭ}}^3$ связаны формулой $L_{\text{СТ}}^3 = (2L_{\text{ЧЭ}, \infty}^3 + L_{\text{ЧЭ}}^3)n^2$, где $L_{\text{ЧЭ}, \infty}^3$ — эквивалентная индуктивность ЧЭ при отсутствии лопатки в зоне его чувствительности (радиальный зазор $\rightarrow \infty$), n — коэффициент трансформации ($n = \omega_1/\omega_2$), ω_1, ω_2 — число витков (в ОВТД $\omega_2 = 1$) [17] *.

С помощью модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ₁ и ЧЭ₂ с контролируемой лопаткой, температура которой составляет 1000 °С, получены семейства функций преобразования $L_{\text{ЧЭ}_1}^3(x, y)$ и $L_{\text{ЧЭ}_2}^3(x, y)$, трансформированные по той же формуле в семейства $L_{\text{СТ}_1}^3(x, y)$ и $L_{\text{СТ}_2}^3(x, y)$ (рис. 1, *b*). Сравнение графиков на рис. 1, *a* и *b* показывает, что с ростом температуры от 20 до 1000 °С индуктивности $L_{\text{СТ}_1}^3$ и $L_{\text{СТ}_2}^3$ возрастают, что наглядно демонстрируют графики $L_{\text{СТ}_1}^3(x)$ и $L_{\text{СТ}_2}^3(x)$ при одном значении $y = 0,5$ мм (рис. 2).

На основе семейств функций преобразования (см. рис. 1) можно найти семейства функций влияния температуры θ (в диапазоне от 20 до 1000 °С) в виде зависимостей $\delta L_{\text{СТ}_1, \theta}^3(x, y)$ и $\delta L_{\text{СТ}_2, \theta}^3(x, y)$. Расчёт функций влияния выполнялся по формуле $\delta L_{\text{СТ}, \theta}^3 = (\Delta L_{\text{СТ}, \theta}^3 / L_{\text{СТ}, \infty}^3) \cdot 100$ %, где $\Delta L_{\text{СТ}, \theta}^3$ — изменение информативного параметра ОВТД (эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ в диапазоне температур от 20 до

* Для рассматриваемых ОВТД $L_{\text{ЧЭ}, \infty}^3 = 3,657 \cdot 10^{-9}$ Гн, а $L_{\text{СТ}, \infty}^3 = 9,874 \cdot 10^{-6}$ Гн ($\omega_1 = 30$).

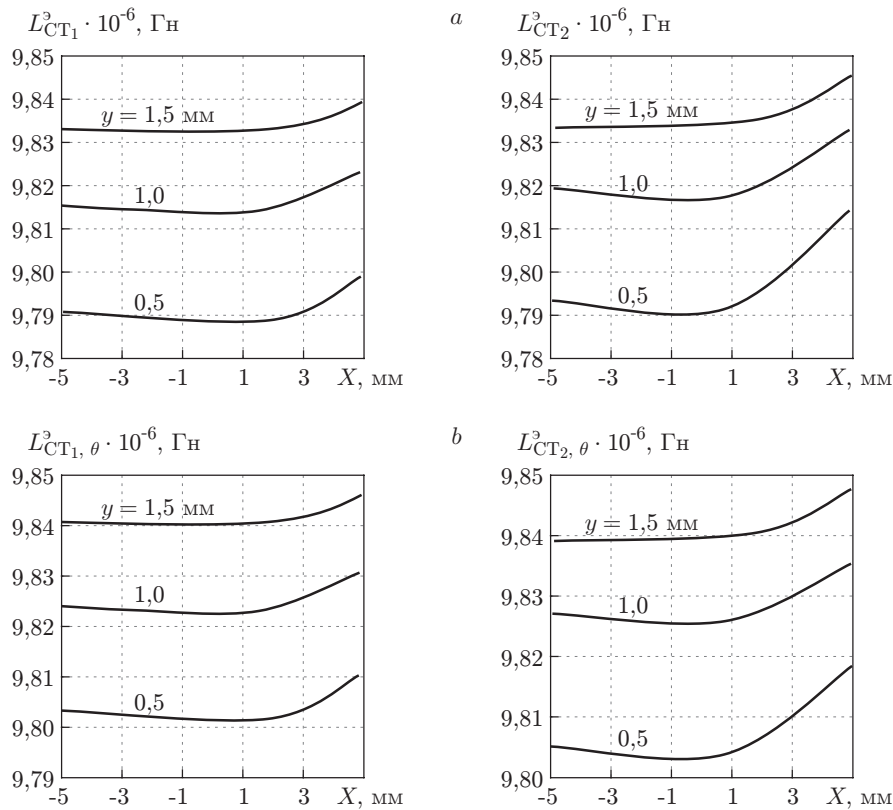


Рис. 1. Семейства функций преобразования при температуре контролируемой лопатки: 20 °С (а) и 1000 °С (б)

1000 °С), $L_{CT, \infty}^3$ — эквивалентная индуктивность первичной обмотки СТ при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика (y радиального зазора $\rightarrow \infty$).

Семейства функций влияния представлены на рис. 3. Там же показаны максимальные значения функций влияния температуры на контролируемую лопатку. Анализ составляющих максимальных значений показал, что наибольший вклад вносят температурные изменения удельного сопротивления ρ материала лопатки, которые составляют +0,16 %. Кроме того, температурные воздействия на лопатку вызывают изменения линейных размеров конечных элементов и, как следствие, размеров лопатки в направлении осей X, Y, Z . При этом изменения индуктивности СТ происходят в сторону увеличения при температурной

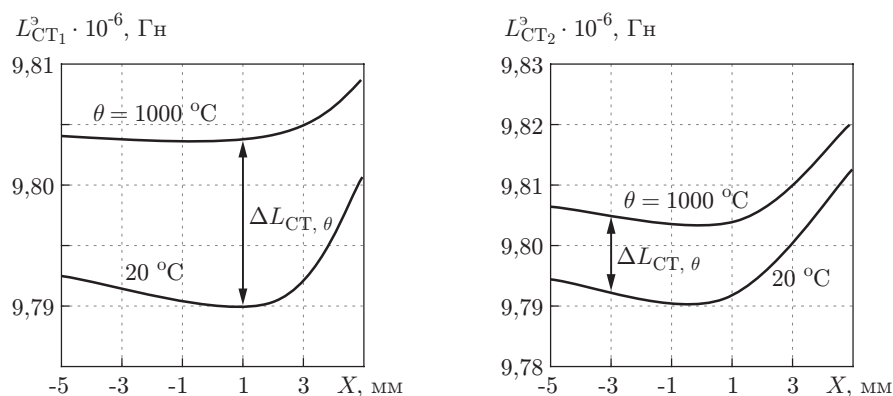


Рис. 2. Сравнение графиков $L_{CT_1}^3(x)$ и $L_{CT_2}^3(x)$ при $y = 0,5$ мм, $\theta = 20$ и 1000 °С

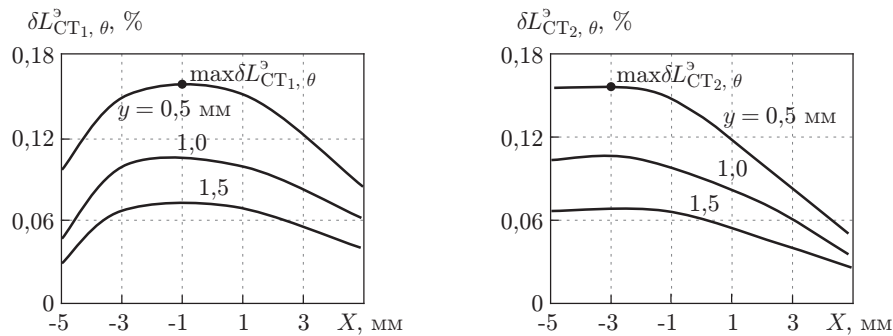


Рис. 3. Семейства функций влияния температуры θ контролируемой лопатки и их максимальные значения

деформации по оси Y , составляя $+0,0009\%$ ($\delta L_{CT1, \theta}^3$) и $+0,00097\%$ ($\delta L_{CT2, \theta}^3$), и, наоборот, в сторону уменьшения при деформациях в направлении осей X и Z ($-0,0087\%$ ($\delta L_{CT1, \theta}^3$) и $-0,0043\%$ ($\delta L_{CT2, \theta}^3$)).

Оценка суммарного влияния температуры на ОВТД и контролируемую лопатку. Как уже отмечалось, температурные воздействия на ОВТД исследовались экспериментально с помощью специально изготовленного оборудования и комплекта измерительных средств, обслуживающих эксперимент. При этом температура ОВТД составляла не менее $400\text{ }^\circ\text{C}$. Полученное изменение индуктивности первичной обмотки СТ, фиксированное прибором Е7-12 на частоте 1 МГц, было использовано для оценки её изменений при температуре $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (в предположении линейной связи индуктивности и температуры).

Тогда при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика влияние температуры на эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ составляет $4,9\%$, причём изменения индуктивности происходят в сторону увеличения*.

В итоге влияние температуры на эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ ОВТД (выполняющего в измерительной цепи рабочие функции) будет определяться её суммарным действием на ОВТД и лопатку с учётом изменений размеров лопатки и удельного сопротивления. Для ОВТД₁ эта сумма составляет $+4,9\% + 0,16\%(\rho) + 0,0009\%(y) - 0,0087\%(x, z) \approx +5,05\%$, а для ОВТД₂ равна $+4,9\% + 0,16\%(\rho) + 0,00097\%(y) - 0,0043\%(x, z) \approx +5,06\%$.

Таким образом, в результате температурных воздействий на ОВТД и лопатку эквивалентная индуктивность возрастает в обоих ОВТД, выполняющих в измерительной цепи рабочие функции, причём это увеличение не намного больше у ОВТД₂, чем у ОВТД₁, что связано с особенностями размещения ЧЭ₂ относительно ЧЭ₁ и геометрического центра лопатки. Полученные результаты позволяют дать приближённую оценку влияния температуры на выходные напряжения и коды измерительной цепи.

Заключение. Предложен новый подход к решению задачи уменьшения влияния температуры в проточной части турбины на результаты измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, который предусматривает замену семейств градуировочных характеристик семействами функций преобразования, вычисленных с помощью моделей, обеспечивающих учёт температурных воздействий на лопатку и повышенную достоверность результатов моделирования. На начальном этапе реализации такого подхода проведено всестороннее исследование влияния температуры на информативные параметры

*Эти результаты можно использовать и как функции влияния температуры на индуктивность первичной обмотки СТ ОВТД, выполняющего в измерительной цепи не только компенсационные, но и рабочие функции (если учтено влияние температуры на лопатку).

ОВТД с целью их последующего использования в анализе погрешностей измерительной цепи, а также в разработке способов устранения влияния температурных воздействий на ОВТД.

С помощью существующей модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ и контролируемой лопатки получены семейства функций преобразования в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей первичных обмоток СТ ОВТД₁ и ОВТД₂ от координат x , y смещений торцов лопаток при нормальной и номинальной температурах, а по их разности — семейства функций влияния температурных воздействий на лопатку в диапазонах изменений координат x и y , характеризующие возможные температурные погрешности. Дана количественная оценка максимальных значений таких погрешностей и показано, что доминируют составляющие, которые связаны с температурными изменениями удельного сопротивления материала лопатки, превышающими более чем на порядок составляющие, связанные с изменениями её линейных размеров. При этом максимальные значения остаются примерно втрое меньше изменений эквивалентных индуктивностей в зависимости от изменений радиального зазора (y) в максимально возможном диапазоне.

Приведены результаты экспериментальных исследований температурных воздействий на ОВТД при отсутствии лопатки в зоне его чувствительности. Показано, что температурные изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ достигают почти 5 % и многократно превышают изменения, связанные с температурными воздействиями на лопатку. Кроме того, приведены результаты суммарных воздействий температуры как на лопатку, так и на ОВТД, которые превышают изменения, связанные с радиальным зазором, более чем в 10 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко Е. А., Данильченко В. П., Лукачев В. П. и др. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. Самара: СамНЦ РАН, 2002. 527 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. Lattime S. B., Steinetz B. M. High-pressure-turbine clearance control systems: Current practices and future directions // Journ. Propulsion and Power. 2004. **20**, N 2. P. 302–311.
4. Dowell M., Sylvester G., Krupp R., Zipfel G. Progress in turbomachinery prognostics and health management via eddy-current sensing // Proc. of the Aerospace Conf. IEEE. 2000. Vol. 6. P. 133–143.
5. Flotow A., Drumm M. J. Blade-tip monitoring with through-the-case eddy current sensors // Sensors Online. 2004. **6**, N 21. P. 28–35.
6. Chana K. S., Sridhar V. V., Singh D. D. The use of eddy current sensors for the measurement of rotor blade tip timing: Development of a new method based on integration // ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2016. **6**, N GT2016-57368. V006T05A019. DOI: 10.1115/GT2016-57368.
7. Герасимов В. Г., Ключев В. В., Шатерников В. Е. Методы и приборы электромагнитного контроля / Под ред. В. Е. Шатерникова. М.: Изд-во «Спектр», 2010. 256 с.
8. Запускалов В. Г., Рогов А. А. Методика уменьшения температурной погрешности ВТП, обусловленной остаточными температурными деформациями // Контроль. Диагностика. 2007. № 3. С. 29–31.
9. 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.

10. **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.
11. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К. и др.** Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Автометрия. 2015. **51**, № 3. С. 104–112.
12. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Погрешности алгоритма вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы в системах измерения радиальных зазоров в турбине // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2016. **51**, № 3. С. 45–53.
13. **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.
14. **Таблицы** физических величин: Справочник /Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
15. **Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с лопаткой сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: СамНЦ РАН, 2013. С. 636–641.
16. **Белопухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М. и др.** Измерение радиальных зазоров с повышенной чувствительностью в расширенном диапазоне осевых смещений рабочего колеса турбины // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. **18**, № 4. С. 174–184.
17. **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.

Поступила в редакцию 14 апреля 2017 г.
