

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 681.518

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК

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*

Приведены результаты упрощённого анализа дифференциальной измерительной цепи с импульсным питанием включённых в неё одновитковых вихретоковых датчиков, с приближённым дифференцированием токов и АЦП на выходе. Цепь предназначена для применения в составе систем автоматизации испытаний газотурбинных двигателей. Рассматриваются способы устранения влияния температуры на датчики с использованием аппаратных и программных средств системы измерения. С помощью модели измерительной цепи определяются семейства функций преобразования (зависимостей кода от искомого радиальных и осевых смещений) для нормальной и номинальной температур, а по их разности — семейства функций влияния температуры на изменения кодов, характеризующие возможные погрешности. Даны количественные оценки максимальных значений функций влияния, подтверждающие эффективность предложенных способов.

*Ключевые слова:* турбина, лопатки сложной формы, одновитковый вихретоковый датчик, радиальные и осевые смещения, способы устранения влияния температуры на датчик.

DOI: 10.15372/AUT20180116

**Введение.** Рассматривается метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной кривизной поверхности пера, применяемых в турбинах современных и перспективных газотурбинных двигателей (ГТД). Метод предусматривает использование распределённого кластера из двух одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub>) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1], которые размещены непосредственно в проточной части турбины и, как и другие жизненно важные элементы конструкции ОВТД, изготовлены из жаропрочных сплавов [2]. Это обеспечивает более высокую надёжность ОВТД по сравнению с существующими высокотемпературными вихретоковыми датчиками [3–6]. Достоинства метода и реализующей его системы измерения [7] — повышение чувствительности к радиальным смещениям и многократное расширение диапазона изменений осевых смещений по сравнению с прежними разработками аналогичного назначения [8].

Для уменьшения влияния температурных воздействий на контролируруемую лопатку и ОВТД (как и в других известных средствах измерения с использованием ОВТД) применяется способ, который предусматривает экспериментальное получение семейств градуировочных характеристик (ГХ) в виде зависимостей кодов от радиальных и осевых смещений торцов лопаток, а также температуры для последующей обработки в ПЭВМ (в составе системы) текущих значений кодов, соответствующих искомым смещениям, и температуры, измеренной встроенными в ОВТД термодарами (ТП). Более подробное описание этого способа приведено в [9], где особое внимание уделено его недостаткам — серьёзным затра-

там на создание оборудования для проведения экспериментальных исследований семейств ГХ при температурных воздействиях до 1000 °С и на повышенную трудоёмкость исследований, связанную с немонотонностью ГХ в расширенном диапазоне изменений осевых смещений, что свойственно рассматриваемому методу и реализующей его системе измерения.

Поэтому для решения задачи уменьшения влияния температурных воздействий в [9] предложен альтернативный подход, реализация которого в ближайшей перспективе предусматривает отказ от экспериментальных исследований семейств ГХ и их замену аналогичными функциями преобразования (ФП), полученными на новых и более совершенных моделях. При этом реализация предложенного подхода на начальном этапе предусматривала исследования температурных воздействий на информативные параметры ОВТД в составе кластера, а затем и на цифровые коды на выходе измерительной цепи (ИЦ) в составе рассматриваемой системы измерения.

Исследования, составляющие первую часть начального этапа, закончены и их результаты приведены в [9]. Что же касается реакции системы на температурные воздействия или, точнее, влияние температурных изменений информативных параметров ОВТД на выходные коды ИЦ, то этой проблеме в связи с недостаточной изученностью и посвящена данная работа. Приведены результаты упрощённого анализа дифференциальной ИЦ с включёнными в неё ОВТД с импульсным питанием, приближённым дифференцированием токов и АЦП на выходе. Рассматриваются способы устранения влияния температуры на ОВТД с использованием аппаратных и программных средств системы. С помощью модели ИЦ, исходными данными для которой являются результаты моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки, определяются семейства ФП (зависимости кода от радиальных и осевых смещений) для нормальной (20 °С) и номинальной (1000 °С) температур, а по их разности — семейства функций влияния (ФВ) температуры на изменения кодов, характеризующие возможные погрешности. Даны количественные оценки максимальных значений ФВ, подтверждающие эффективность предложенных способов.

**Анализ ИЦ в предположении отсутствия лопатки в зоне чувствительности датчика.** На рис. 1 представлено упрощённое изображение ИЦ, в которой реализован известный метод первой производной [2]. При этом в рассматриваемой ИЦ согласно [8] используется принцип приближённого дифференцирования токов в обоих датчиках (ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub>) в составе кластера. Датчики включены в дифференциальную схему с импульсным питанием постоянной и малой длительности ( $\Delta t$ ), формируемым ключом в цепи источника постоянного напряжения ( $E$ )\*. В процессе вращения рабочего колеса ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub> при прохождении контролируемой лопаткой зон чувствительности ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> попеременно в соответствии с рассматриваемым методом измерения радиальных и осевых смещений изменяют свои функции с рабочих на компенсационные. Токи  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$ , возбуждаемые в обоих ветвях схемы в преобразователях ток—напряжение (ПТН), построенных на операционных усилителях, преобразуются в напряжения  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , разность которых усиливается масштабирующим усилителем (МУс) с дифференциальными входами и далее формируется код  $C$  на выходе АЦП.

Следует отметить, что входная схема ИЦ несимметрична, поскольку эквивалентная индуктивность первичной обмотки СТ<sub>2</sub> ОВТД<sub>2</sub> больше эквивалентной индуктивности СТ<sub>1</sub> ОВТД<sub>1</sub> на некоторую величину, что равносильно включению в цепь СТ<sub>2</sub> дополнительной катушки  $L_d$ . Такая несимметрия обеспечивает применение микросхемы десятиразрядного

---

\* Согласно [2] метод первой производной обеспечивает наибольшую чувствительность к изменениям информативных параметров ОВТД в момент подачи импульсного питания на начальном участке переходной характеристики. Достоинство метода также и в том, что полученный результат мало зависит от изменений активного сопротивления первичных обмоток согласующего трансформатора (СТ), и даже на его температурные изменения в 50 % реакция на выходе ИЦ не превышает 0,1 % (при  $\Delta t \leq 0,1$  мкс).

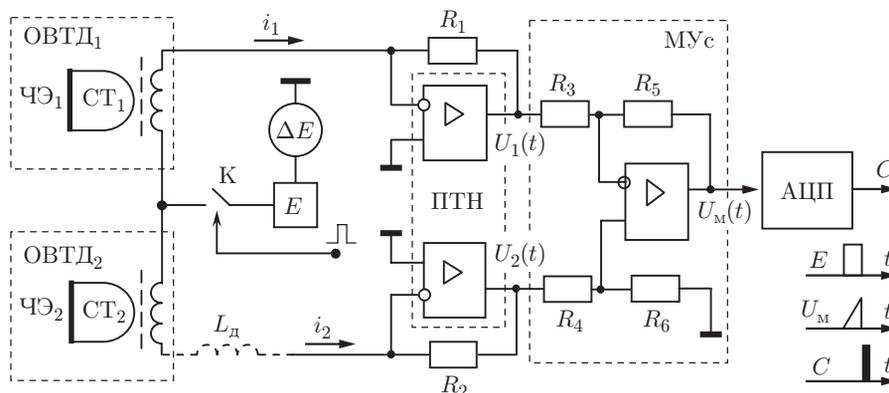


Рис. 1

АЦП с однополярным напряжением на входе, изменяющимся в пределах от 0 до 1 В\*. При малых значениях длительности импульса питания ( $\Delta t < 0,1$  мкс) напряжение на выходе МУс имеет пилообразную форму (см. рис. 1) и его амплитудное значение преобразуется в код  $C$ .

Последующий анализ касается дифференциальной схемы, ПТН, МУс и АЦП.

При  $t \rightarrow 0$  справедливы выражения  $L_1 \frac{di_1}{dt} = E$  или  $L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \approx E$  и  $L_2 \frac{di_2}{dt} = E$  или  $L_2 \frac{\Delta i_2}{\Delta t} \approx E$ , где  $L_1$  и  $L_2$  — эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ<sub>1</sub> и СТ<sub>2</sub> соответственно.

С учётом этого можно записать  $\Delta i_1 = \frac{E}{L_1} \Delta t$  и  $\Delta i_2 = \frac{E}{L_2} \Delta t$ , а напряжения на выходах ПТН  $U_1 = \Delta i_1 R = ER \Delta t \frac{1}{L_1}$ ,  $U_2 = \Delta i_2 R = ER \Delta t \frac{1}{L_2}$ , причём разностное напряжение с выходов ПТН  $\Delta U = U_1 - U_2 = ER \Delta t \left( \frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right)$ , где  $R_1 = R_2 = R$ . При отсутствии лопатки в зонах чувствительности обоих ЧЭ  $L_1 = L_0$  и  $L_2 = L_0 + L_d$ , а  $\Delta U = ER \Delta t \frac{L_d}{L_0(L_0 + L_d)}$ . Подбором величин сопротивлений  $R_1, R_2$  (ПТН<sub>1</sub>, ПТН<sub>2</sub>),  $R_3, \dots, R_6$  (МУс) добиваются амплитудного значения напряжения на выходе МУс равного 0,5 В, что соответствует коду АЦП  $C_0 = 512$ . Следует подчеркнуть, что в реальных ИЦ индуктивность  $L_d$  должна быть  $\sim 0,01L_0$ . Это связано с тем, что с появлением лопатки в зоне чувствительности максимально возможные изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ остаются в пределах 1 % от  $L_0$ .

Далее предполагается, что лопатка по-прежнему отсутствует как в зоне чувствительности ЧЭ<sub>1</sub>, так и ЧЭ<sub>2</sub>, но произошли температурные изменения в окружающей ЧЭ среде (от нормальной до 1000 °С), что, в свою очередь, вызывает изменения эквивалентных индуктивностей  $L_1, L_2$  ( $\Delta L_\theta$ ) и индуктивности  $L_d$  ( $\Delta L_{d,\theta}$ ):  $L_1 = L_0 + \Delta L_\theta$ ,  $L_2 = L_0 + \Delta L_\theta + L_d + \Delta L_{d,\theta}$ . Тогда

$$\Delta U = E \frac{\Delta t}{\tau_0} \frac{L_d \left( 1 + \frac{\Delta L_{d,\theta}}{L_d} \right)}{L_0 \left( 1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0} \right) \left( 1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} + \frac{\Delta L_{d,\theta}}{L_0} \right)},$$

где  $\tau_0 = L_0/R$ . Подбором сопротивления  $R$  можно добиться равенства  $\Delta t$  и  $\tau_0$ . Учитывая, что  $\Delta L_{d,\theta}/L_d = \Delta L_\theta/L_0$  и  $\Delta L_{d,\theta}/L_0$  значительно меньше остальных слагаемых второго

\*Подбор такой пары датчиков не представляет трудности даже при существующей технологии их изготовления, тем более с учётом её совершенствования в перспективе.

множителя в знаменателе, рассматриваемое выражение примет вид

$$\Delta U \approx E \frac{L_d}{L_0} \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0}\right) + \frac{L_d}{L_0}}. \quad (1)$$

Поскольку при отсутствии температурных воздействий (в нормальных условиях)  $\frac{\Delta L}{L_0} = 0$ , то и  $\Delta U_0 \approx E \frac{L_d}{L_0} \frac{1}{1 + L_d/L_0}$ . Полученному значению  $\Delta U_0$  (на выходах ПТН) соответствует напряжение на выходе МУС  $U_{м,0} \approx k_m E \frac{L_d}{L_0} \frac{1}{1 + L_d/L_0}$ , где  $k_m$  — коэффициент масштабирования. В свою очередь, напряжению  $U_{м,0}$  соответствует цифровой код на выходе ИЦ, который, пренебрегая отношением  $L_d/L_0$  в знаменателе, можно записать в виде  $C_0 \approx k_c E k_m \frac{L_d}{L_0}$ , где  $k_c$  — коэффициент размерностью 1/В, причём  $C_0 = 512$ . С повышением температуры первое слагаемое (в скобках (1)) в знаменателе увеличится, а напряжения с выходов ПТН, МУС и код  $C$  уменьшатся ( $\Delta U < \Delta U_0$ ,  $U_m < U_{м,0}$ ,  $C < C_0$ ). По результатам предварительных исследований в работе [9]  $\Delta L_\theta/\Delta L_0 = 0,049$  (в процентном выражении 4,9 %), и это означает, что напряжения  $\Delta U$ ,  $U_m$  и код  $C$  будут уменьшаться на ту же величину. В этой связи могут возникнуть трудности в идентификации экстремальных значений кодов  $C_1$  (ОВТД<sub>1</sub>) и  $C_2$  (ОВТД<sub>2</sub>), которые не должны выходить за пределы 1024–512 и 512–0 соответственно. В таком случае представляется целесообразной разработка способов коррекции и, более того, устранения возможных изменений кода, вызванных температурными изменениями эквивалентных индуктивностей  $\Delta L_\theta$ . Предлагаются два способа: алгоритмический и аппаратный.

Первый способ предусматривает умножение кода  $C$  на безразмерное число  $k_\theta = \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} + \frac{L_d}{L_0}\right)$ , определяемое знаменателем выражения (1), что обеспечивает постоянство кода ( $C = C_0$ ) в условиях температурных воздействий на ОВТД (при отсутствии лопатки в зоне чувствительности). При этом отношение  $\Delta L/L_0$  является текущим значением функции влияния температуры  $\Delta L/L_0 = \bar{f}(\theta)$  при известных значениях  $\theta$ , полученных по результатам обработки в ПЭВМ данных с термопар, встроенных в ОВТД (после нормализации и аналого-цифрового преобразования в системе измерения).

Второй способ также предусматривает использование тех же термопар, устройств нормализации и аналого-цифрового преобразования, а также обработки данных в ПЭВМ с последующим цифроаналоговым преобразованием. При таком способе осуществляется воздействие на напряжение питания ИЦ, когда с уменьшением  $\Delta U_0$  и соответствующего значения кода  $C$ , связанных с повышением температуры  $\theta$ , увеличивается напряжение питания на требуемую величину ( $\Delta E$ ). Тогда напряжение питания после коррекции ( $E_k$ ) равно  $E + \Delta E$ , где  $\Delta E$  — регулируемая с помощью цифроаналогового преобразования составляющая напряжения питания, изменяющаяся в пределах от 0 примерно до  $0,05E$  в зависимости от температуры (см. рис. 1).

**Анализ ИЦ в предположении наличия лопатки в зоне чувствительности ЧЭ.** Температурным воздействиям подвергаются как ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub>, так и лопатка. Кроме того, предполагается, что из двух способов выбран второй, в соответствии с которым напряжение питания ИЦ скорректировано и при температуре  $\theta = 1000$  °С увеличено на  $\Delta E = 0,049E$  ( $E_k = 1,049E$ ) [9]. Предполагается также, что изменения эквивалентных индуктивностей, вызванные смещениями торцов лопаток ( $\Delta L$ ), не превышают 0,5 % от  $L_0$ , а температурные изменения эквивалентных индуктивностей, связанные с лопаткой ( $\Delta L_{\theta,л}$ ), определяются только температурными изменениями удельного сопротивления  $\rho$  материала лопатки, одинаковы для обоих датчиков и составляют около 0,16 % от  $L_0$ .

Пусть рабочие функции выполняет ЧЭ<sub>1</sub>, а компенсационные — ЧЭ<sub>2</sub>. Тогда  $L_1 = L_0 + \Delta L_\theta - \Delta L + \Delta L_{\theta, л}$ ,  $L_2 = L_0 + \Delta L_\theta + L_d + \Delta L_{\theta, д}$ ,

$$U_M = E_K \frac{L_d}{L_0} k_M \frac{\left(1 + \frac{\Delta L_{д, \theta}}{L_d}\right) + \frac{\Delta L}{L_d} - \frac{\Delta L_{\theta, л}}{L_d}}{\left[\left(1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0}\right) - \frac{\Delta L}{L_0} + \frac{\Delta L_{\theta, л}}{L_0}\right] \left(1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} + \frac{\Delta L_{д, \theta}}{L_0}\right)}.$$

Так как  $\frac{\Delta L}{L_0}, \frac{\Delta L_{\theta, л}}{L_0} \ll \frac{\Delta L_\theta}{L_0}$ , а  $\frac{\Delta L_{д, \theta}}{L_0} \ll \frac{L_d}{L_0}$ , то

$$U_M = E_K \frac{L_d}{L_0} k_M \frac{\left(1 + \frac{\Delta L_{д, \theta}}{L_d}\right) + \frac{\Delta L}{L_d} - \frac{\Delta L_{\theta, л}}{L_d}}{\left(1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0} + \frac{L_d}{L_0}\right)}.$$

Поскольку температурные изменения  $\Delta L_{д, \theta}/L_d$ ,  $\Delta L_\theta/L_0$  компенсируются следящими за температурой изменениями напряжения питания  $E_K$ , то  $U_M$  будет определяться как  $\Delta L/L_d$ ,  $\Delta L_{\theta, л}/L_d$ , поэтому и в кодах на выходе ИЦ будут две составляющие, одна из которых ( $\Delta C$ ) зависит от  $\Delta L/L_d$ , а вторая ( $\Delta C_{\theta, л}$ ) — от  $\Delta L_{\theta, л}/L_d$ , причём с противоположными знаками:

$$C_1 = C_0 + \Delta C - \Delta C_{\theta, л}. \quad (2)$$

Если рабочие функции выполняет ЧЭ<sub>2</sub>, а компенсационные — ЧЭ<sub>1</sub>, то  $L_1 = L_0 + \Delta L_\theta$ ,  $L_2 = L_0 + \Delta L_\theta + L_d + \Delta L_{д, \theta} - \Delta L + \Delta L_{\theta, л}$ . Тогда нетрудно показать, что

$$U_M = E_K \frac{L_d}{L_0} k_M \frac{\left(1 + \frac{\Delta L_{д, \theta}}{L_d}\right) - \frac{\Delta L}{L_d} + \frac{\Delta L_{\theta, л}}{L_d}}{\left(1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0} + \frac{L_d}{L_0}\right)},$$

$$C_2 = C_0 - \Delta C + \Delta C_{\theta, л}. \quad (3)$$

Сравнивая выражения (2) и (3), можно констатировать различные по знаку изменения кодов, вызванные смещениями торцов лопаток ( $\pm \Delta C$ ), и изменения кодов, связанные с температурой лопатки ( $\mp \Delta C_{\theta, л}$ ). При этом величину  $\Delta C_{\theta, л}$  можно считать соизмеримой с  $\Delta C$ .

В то же время нельзя не отметить, что в представленном приближённом анализе были приняты серьёзные упрощающие допущения, в частности, в отношении к изменениям эквивалентных индуктивностей  $\Delta L$ ,  $\Delta L_\theta$ ,  $\Delta L_{\theta, л}$ , которые считались равными для обоих датчиков, хотя в некоторых результатах предварительных исследований наблюдаются заметные расхождения [9]. Поэтому в последующих вычислительных экспериментах на моделях ИЦ, исходными данными для которых являются результаты моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ и лопатки [10, 11], неравенства  $\Delta C$  и  $\Delta C_{\theta, л}$  в кодах  $C_1$  и  $C_2$  вполне ожидаемы.

**Результаты моделирования ИЦ.** На рис. 2 представлены результаты моделирования ИЦ — семейства ФП в виде зависимостей  $C_1(x)$  и  $C_2(x)$  при постоянных величинах  $y = 0,5; 1; 1,5$  мм и температуре 1000 °С (сплошные кривые)\*. Для сравнения штриховыми кривыми показаны те же зависимости, полученные для нормальной температуры (20 °С). Предполагается, что в системе измерения в процессе моделирования используется коррекция напряжения питания  $E_K$ .

\* В системе отсчёта OXYZ начало отсчёта (точка 0) расположено на внутренней поверхности статора, координата  $x$  соответствует осевым смещениям рабочего колеса,  $y$  — смещениям торца лопатки в радиальном направлении и РЗ, а координата  $z$  — смещениям в направлении вращения.

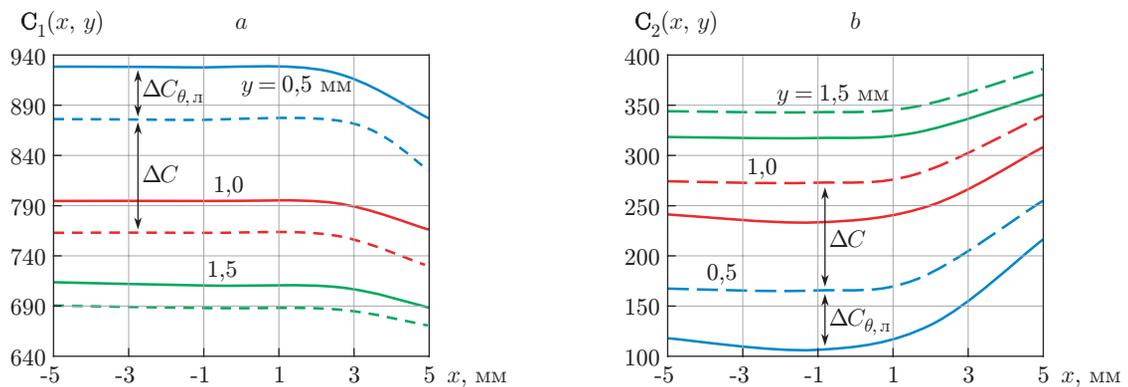


Рис. 2

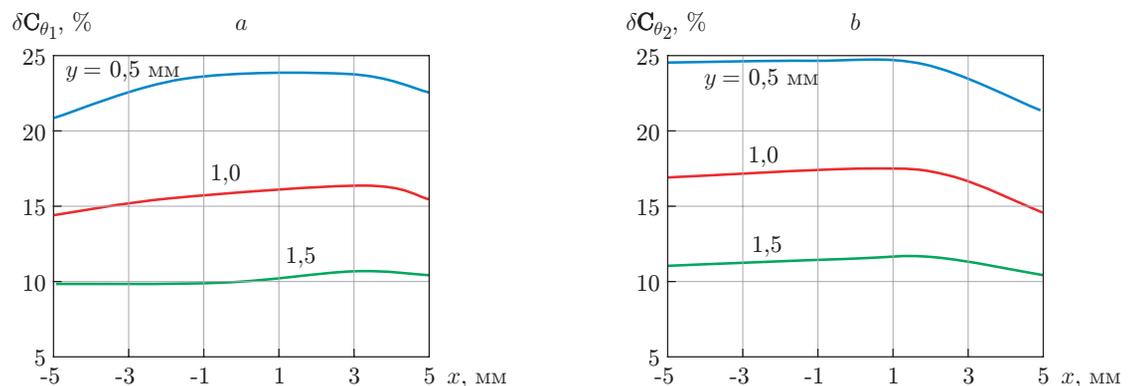


Рис. 3

Из графиков  $C_1(x, y)$  и  $C_2(x, y)$  видно, что температурные изменения кодов по знаку соответствуют результатам упрощённого анализа (выражения (2) и (3)), а также следует, что, несмотря на изменения температуры более чем на  $900\text{ }^\circ\text{C}$  (от нормальной), коды  $C_1$  и  $C_2$  остаются в установленных для них интервалах 1024–512 и 512–0.

Сравнение семейств ФП, полученных при нормальной температуре и при  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , позволяет найти ФВ температуры как отношение  $\Delta C_{\theta, \pi}$  (см. рис. 2) к максимально возможной разности кодов  $C_1$  и  $C_2$  в диапазонах изменений искоемых координат  $x, y$ :  $\delta C_{\theta} = (\Delta C_{\theta, \pi} / \Delta C_{\max}) \cdot 100\%$ , где  $\Delta C_{\max}$  для семейств ФП составляет 200 единиц.\*

Семейства ФВ ( $\delta C_{\theta_1}(x, y)$  и  $\delta C_{\theta_2}(x, y)$ ) представлены на рис. 3 и характеризуют возможные температурные погрешности. Максимальная погрешность не превышает 25%. Если с увеличением диапазона изменений или повышением чувствительности к координате  $y$  удастся получить  $\Delta C_{\max} = 512$ , то погрешность уменьшается до 10%.

Как уже отмечалось, результаты вычислительных экспериментов, приведённые на рис. 2 и 3, получены в предположении использования в системе измерения аппаратного способа устранения температурных воздействий на ОВТД путём изменения напряжения питания  $E_k$ . Аналогичные вычислительные эксперименты были проведены и в предположении использования в системе измерения алгоритмического способа устранения температурных воздействий на ОВТД. Их результаты показали идентичность семейств ФП и ФВ температуры тем семействам, которые представлены на рис. 2 и 3 (расхождение в ФВ не превышает 1,6%).

\*Предельные значения  $\Delta C_{\max}$  обеспечивают минимальные значения ФВ и, как следствие, минимально возможные температурные погрешности.

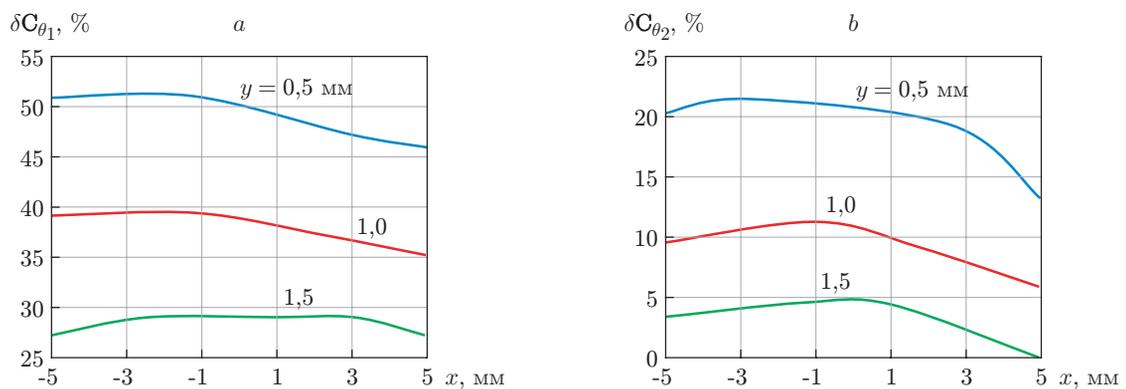


Рис. 4

И наконец, рассматриваются результаты вычислительных экспериментов, выполненных в предположении отсутствия в системе как алгоритмического, так и аппаратного способов устранения влияния температуры, воздействующей на ОВТД (рис. 4).

В частности, анализ полученных семейств ФП  $C_1(x, y)$  и  $C_2(x, y)$  показал, что они остаются в пределах изменений кодов 1024–512 и 512–0 (графики изменений аналогичны рис. 2 и здесь не приводятся). Однако наблюдается существенное увеличение функций  $\delta C_{\theta_1}(x, y)$ , характеризующих возможные температурные погрешности (составляют около 55 %). При этом  $\delta C_{\theta_2}$  уменьшается примерно до 20 %, что демонстрирует высокую степень несимметрии ФВ температуры.

**Об исследовании влияния температурных воздействий на лопатку.** Как уже отмечалось, влияние температурных воздействий на ОВТД и его информативные параметры устраняется в ИЦ благодаря применению алгоритмического и аппаратного способов\*.

Что же касается уменьшения влияния температурных воздействий на лопатку, далее на информативные параметры ОВТД и коды на выходе ИЦ, то в настоящее время приходится использовать известный способ, предусматривающий экспериментальное получение семейства ГХ, применяемый в практике стендовых испытаний ГТД несмотря на его недостатки. Однако наиболее перспективна (согласно предложенному в работе [9] подходу) замена таких семейств ГХ семействами ФП, найденными путём моделирования. При этом предполагается, что в ближайшие годы будет завершена ведущаяся сейчас разработка так называемой интегрированной модели ОВТД, в которой предусмотрено не только электромагнитное взаимодействие ЧЭ и контролируемой лопатки, но и других элементов конструкции ОВТД между собой и лопаткой. Более того, планируется создание тепловой модели ОВТД, в которой учтён теплообмен между элементами конструкции ОВТД и окружающей средой, включая крепёжное устройство и статорную оболочку ГТД. Такая модель позволит получить распределение температуры по объёму ОВТД и внести поправки в температурные изменения удельного сопротивления материала и линейных размеров конечных элементов, распределённых по объёму ОВТД в его интегрированной модели. В итоге это окажет положительное влияние на адекватность разработанной модели ОВТД и повысит достоверность семейства ФП, снижая возможные температурные погрешности.

**Заключение.** Проведённый упрощённый анализ ИЦ в предположении отсутствия лопатки в зоне чувствительности ЧЭ ОВТД и воздействия температуры непосредственно на ОВТД выявил неполную компенсацию температурных воздействий, несмотря на дифференциальное включение ОВТД в ИЦ. Показано, что это приводит к смещению кодов на выходе ИЦ не только при отсутствии лопатки, но и при её наличии в зоне чувствительности

\*Проведённый анализ ИЦ и разработка способов, эффективность которых подтверждается результатами моделирования, практически завершают начальный этап реализации предложенного подхода [9].

ЧЭ ОВТД, оказывая негативное влияние на идентификацию кодов  $C_1$  и  $C_2$  в процессе функционирования системы измерения. Предложены алгоритмический и аппаратный способы устранения влияния температурных воздействий на ОВТД, предусматривающие использование информации о температуре со встроенных в ОВТД ТП. Кроме того, с помощью вычислительных экспериментов, проведённых на модели ИЦ, исходными данными для которой были результаты моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ и торцевой части лопатки, для этих способов получены семейства ФП при номинальной и нормальной температурах, а по их разности вычислены семейства ФВ температуры, характеризующие возможные температурные погрешности. Показано, что коды  $C_1$  и  $C_2$  остаются в установленных пределах, а ФВ температуры примерно равны и достигают 25 %, что связано с температурным воздействием исключительно на лопатку. Максимальное значение таких погрешностей увеличивается более чем вдвое, если в системе измерения не используются предложенные способы, что подтверждает их эффективность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **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.
3. **Герасимов В. Г., Ключев В. В., Шатерников В. Е.** Методы и приборы электромагнитного контроля /Под ред. В. Е. Шатерникова. М.: Спектр, 2010. 256 с.
4. **Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained in IAEA-TECDOC-628. Rev. 2 "Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques"**. Vienna, Austria: IAEA, 2011. Training Course Ser. N 48. 237 p.
5. **Eddy Current Displacement Transducer — High Temperature Specifications** // *Specifications Sheet*. 2013. P. 1–5.
6. **Lai Y.** Eddy Current Displacement Sensor with LTCC Technology: Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Angewandte Wissenschaften der Albert-Ludwigs Universität Freiburg im Breisgau, 2005. 118 p.
7. **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.
8. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К. и др.** Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 10. С. 38–46.
9. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Анализ влияния температуры на информативные параметры одновитковых вихретоковых датчиков // *Автометрия*. 2017. **53**, № 4. С. 104–111.
10. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Модель измерительной цепи с переменными во времени эквивалентными индуктивностями одновитковых вихретоковых датчиков // *Тр. XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»*. Самара: СамНЦ РАН, 2014. С. 687–691.
11. **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.