УДК 681.518

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ РАБОЧИХ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ*

С. Ю. Боровик, М. М. Кутейникова, 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 краткие описания отличительных особенностей метода измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы (применяемых в турбинах) с помощью распределённого кластера одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника, известных моделей электромагнитного взаимодействия ЧЭ ОВТД с контролируемой и соседними лопатками, а также измерительной цепи (ИЦ) с двумя ОВТД в составе кластера, предназначенными для проведения вычислительных экспериментов. Рассматриваются результаты экспериментов в виде семейств функций преобразования (зависимостей эквивалентных индуктивностей ЧЭ или цифровых кодов на выходе ИЦ от искомых радиальных и осевых смещений торцевой части лопатки) и семейств функций влияния соседних лопаток как на эквивалентные индуктивности ЧЭ, так и на выходные коды ИЦ.

Ключевые слова: лопатки сложной формы, радиальные и осевые смещения, одновитковый вихретоковый датчик, влияние соседних лопаток, функции преобразования и влияния.

Введение. Известно, что новое поколение газотурбинных двигателей (ГТД) ориентировано на применение систем управления, предусматривающих активное регулирование радиальных зазоров (РЗ) между статором и торцами лопаток в компрессоре и турбине при получении измерительной информации о РЗ (важнейший параметр, характеризующий экономичность и надёжность ГТД) непосредственно в газовоздушном тракте с помощью специально разработанных датчиков [1–5]. Такие датчики должны быть метрологически состоятельными в тяжелейших условиях работы: температура в турбине выше 1000 °C, околозвуковая линейная скорость перемещения торцов лопаток, высокий уровень вибраций, высокая загрязнённость среды измерения и т. д.

Известны конструкции одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника, изготовленных из тех же сплавов, что и лопатки, которые успешно использовались в составе систем измерения, предназначенных для испытаний ГТД [6]. Известно также, что выходной параметр ОВТД (индуктивность) реагирует на все возможные составляющие многомерных смещений торцов лопаток в процессе эксплуатации ГТД. Если в системе координат XYZ начало отсчёта (точка O) расположено на внутренней поверхности статора, ось X направлена вдоль оси рабочего колеса, ось Y — по его радиусу, а ось Z ориентирована в направлении вращения, то лишь одна

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-08-00802).

координата (y) характеризует РЗ, а для её достоверной оценки необходимо определение остальных координат (x и z).

Многокоординатные измерения смещений торцов лопаток (в том числе и РЗ) обеспечивают кластерные методы, которые предусматривают использование группы (кластера) ОВТД. Число датчиков в кластере зависит от числа искомых координат при определённой топологии размещения ЧЭ относительно торцевой части лопаток. Однако кластерные методы, подробно изложенные в [7], в основном ориентированы на применение в компрессорах, лопатки которых имеют сравнительно простую форму и невысокую степень кривизны поверхности пера.

В работах [8, 9] приведено описание двух кластерных методов измерения радиальных и осевых смещений (координат x, y) турбинных лопаток сложной формы и с повышенной кривизной поверхности (сечение плоскостью, перпендикулярной оси лопатки, имеет ярко выраженную серповидную форму, а сечение плоскостью, параллельной её оси, — U-образную, что связано с выступами боковых поверхностей её «спинки» и «корыта» над «дном»). Методы отличаются местом размещения распределённого кластера (РК) из двух ОВТД относительно контролируемой лопатки, углом разворота ЧЭ относительно оси Z и информативными значениями индуктивности ЧЭ, выполняющего рабочие функции при его прохождении контролируемой лопаткой.

В соответствии с первым методом (meth1) РК ОВТД смещён в сторону хвостовой части лопатки, угол разворота ЧЭ относительно оси Z составляет 30–60° против часовой стрелки, а информативным параметром является минимальное значение индуктивности датчика. Согласно второму методу (meth2) РК ОВТД смещён в сторону головной части лопатки, разворот ЧЭ составляет 60° по часовой стрелке, а фиксируется наименьшее значение индуктивности из двух минимумов (эффект «двоения» минимумов связан с прохождением ЧЭ датчика двумя выступами в торцевой части турбинной лопатки). Как следует из [9], meth2 обеспечивает вдвое бóльшую чувствительность к РЗ и расширение диапазона измерений осевых смещений в 5 раз, причём эти оценки определены путём сравнения семейств функций преобразования (ФП) РК из двух ОВТД (зависимостей индуктивностей датчиков от координат x, y смещений реальной турбинной лопатки), полученных экспериментально для meth1 и meth2.

В то же время необходимо подчеркнуть широкие возможности для дополнительных исследований, которые обеспечивают разработанные и апробированные модель электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ датчика с лопаткой сложной формы с учётом объёма и кривизны поверхности в её торцевой части [10], модель ЭМВ ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками (СЛ) [11], а также модель дифференциальной измерительной цепи (ИЦ), в которую включены оба ОВТД в составе РК [12]. В качестве исходных данных используются результаты, полученные на моделях ЭМВ с лопатками [13].

Перечисленные выше модели применялись для исследования семейств ФП на уровне датчиков и ИЦ, а также семейств функций влияния (ФВ) соседних лопаток применительно к meth1 [11, 13, 14]. Представляется необходимым проведение аналогичных исследований и для meth2, но указанные характеристики до сих пор оставались неизученными. Данная работа призвана устранить существующий пробел. Здесь приводится краткое описание известных моделей [10–12] как инструмента проведения вычислительных экспериментов, а также их результаты в виде семейств ФП и ФВ соседних лопаток на эквивалентные индуктивности ЧЭ и выходные коды дифференциальной ИЦ, включающей ОВТД в составе РК.

Существующие модели. Как уже отмечалось, известны две модели ЭМВ рабочего ЧЭ с торцевой частью контролируемой турбинной лопатки, которые различаются тем, что в первой модели не учитывается влияние лопаток, размещённых по соседству с контролируемой [10], а во второй — это влияние учтено не только для ЧЭ, выполняющего рабочие функции (ЧЭ-Р), но и для компенсационного ЧЭ (ЧЭ-К) ОВТД в составе РК [11]. Известна и модель дифференциальной ИЦ, в которую включены оба датчика РК, ЧЭ которых поочерёдно выполняют рабочие и компенсационные функции. Далее приводится краткое описание всех трёх моделей, предшествующее изложению результатов, полученных на этих моделях.

Модель ЭМВ рабочего ЧЭ с контролируемой лопаткой. Предполагается, что угловой шаг установки лопаток $\psi_л$ на рабочем колесе и его линейный эквивалент $z_л$ настолько велики, что влиянием соседних лопаток на индуктивности как ЧЭ-Р (рис. 1, a), так и ЧЭ-К (рис. 1, b) можно пренебречь. В такой модели лопатка разделена на пять частей: выпуклая и вогнутая поверхности пера, названные спинкой и корытом соответственно, поверхности сопряжения спинки и корыта со стороны входа и выхода газового потока — входная и выходная кромки, а также поверхность между выступами всех перечисленных частей в торце лопатки, названная дном. Предполагается, что толщины поверхностей спинки, корыта, входной и выходной кромок, а также дна исчезающе малы.

Разбиение на конечные элементы (КЭ) всех перечисленных частей лопатки производится с равномерным шагом по длине, ширине и высоте. При этом формируется геометрическое представление модели — объёмная сетка из бесконечно тонких проводящих нитей, проходящих по рёбрам КЭ. В таком случае электрически представленный КЭ сохраняет пространственное положение и геометрию исходного КЭ, а потому и все объекты электромагнитного взаимодействия, которые складываются из электрических эквивалентов соответствующих КЭ, в своих электрических представлениях будут адекватны исходным геометрическим представлениям.

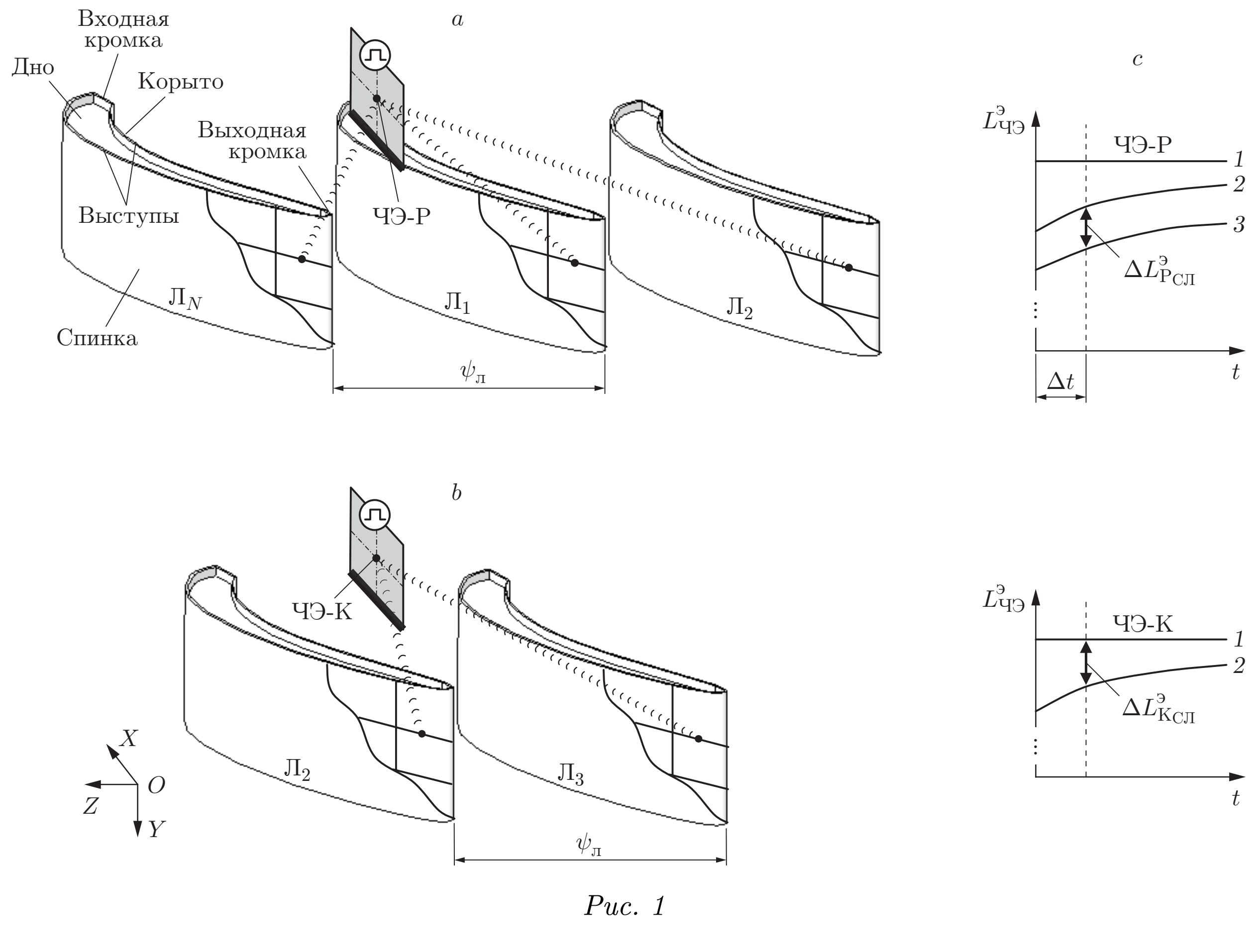


Рис. 1

Каждый проводник КЭ рассматривается как элемент тока. Соединение проводников в точке образует узел, а замкнутое соединение — контур. В контурах объёмной сетки под воздействием магнитного поля, возбуждаемого током ЧЭ, возникают э.д.с. и соответствующие контурные (вихревые) токи. Каждый элемент тока в окружающем пространстве создаёт дополнительное магнитное поле, взаимодействующее с контуром ЧЭ и со всеми контурами КЭ. Далее производится замена сетки из проводящих нитей электрической схемой, в которой сохраняются контуры сетки, а в ветвях между узлами включены эквивалентные сопротивления, величины которых зависят от электропроводности материала и размеров КЭ.

Предполагается, что в ИЦ используется импульсное питание: через элементы конструкции ОВТД (согласующий трансформатор (СТ) и токовод [6, 7]) передний фронт прямоугольного импульса передаётся без искажений в контур ЧЭ. Математическое описание процессов в эквивалентной схеме при импульсном возбуждении ЧЭ можно представить системой дифференциальных уравнений, составленных на основе законов Кирхгофа. Число уравнений в системе определяется общим числом контуров и узлов. В расчётах индукции магнитного поля используется закон Био-Савара.

Результат моделирования для заданных размещения ЧЭ и координат смещений торца контролируемой лопатки, геометрических и электрических параметров контуров ЧЭ и лопатки представлен эквивалентной индуктивностью, изменяющейся во времени ($L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}}(t)$). В момент появления переднего фронта импульса питания $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}}$ скачком уменьшается, а затем, по мере затухания вихревых токов в лопатке, монотонно возрастает и стремится к постоянной величине (при $t \to \infty$), соответствующей индуктивности при отсутствии контролируемой лопатки в зоне чувствительности датчика ($L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ},\,\infty}$). При этом согласно рассматриваемому методу (meth2) за информативное значение индуктивности ЧЭ-Р принимается минимальное из двух минимумов [9], а соответствующее значение функции $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}}(t)$ фиксируется в момент появления заднего фронта импульса питания через интервал времени Δt, который не превышает $0{,}2 \cdot 10^{-6}$ с. Индуктивность ЧЭ-К предполагается постоянной и равной $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ},\,\infty}$. На рис. 1, *c* значения $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ},\,\infty}$ как для ЧЭ-Р, так и для ЧЭ-К представлены графиком *1*, функция $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}}(t)$ для ЧЭ-Р — графиком *2*, а моменту её фиксации соответствует пунктирная линия. Также предполагается, что КЭ не взаимодействуют между соседними лопатками, равно как и между частями одной лопатки.

Модель ЭМВ ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками. В рассматриваемой модели, в свою очередь, представлены два варианта: в первом ЭМВ осуществляется между ЧЭ-Р и контролируемой лопаткой, находящейся на минимальном расстоянии от ЧЭ-Р, а также с двумя соседними лопатками, каждая из которых находится на расстоянии сравнительно небольшого шага $\psi_{\text{л}}$ ($z_{\text{л}}$) от контролируемой (шаг $z_{\text{л}}$ соизмерим с длиной ЧЭ, см. рис. 1, *a*); во втором варианте ЭМВ осуществляется между ЧЭ-К и двумя лопатками, находящимися на расстоянии $0{,}5\psi_{\text{л}}$ ($0{,}5z_{\text{л}}$) от ЧЭ-К (см. рис. 1, *b*). При этом все части каждой из соседних лопаток и контролируемой разбиваются на КЭ аналогично рассмотренной модели и в конечном счёте в изменениях эквивалентных индуктивностей обоих ЧЭ учитывается совокупное влияние вихревых токов во всех лопатках. На рис. 1, *c* это влияние показано графиками *3* для ЧЭ-Р (верхняя диаграмма) и *2* для ЧЭ-К (нижняя диаграмма), причём разность $\Delta L_{\text{Р}_{\text{СЛ}}}$ характеризует влияние соседних лопаток на ЧЭ-Р, а разность $\Delta L_{\text{К}_{\text{СЛ}}}$ — влияние соседних лопаток на ЧЭ-К.

Модель дифференциальной ИЦ. Входная часть ИЦ — это дифференциальная схема, в ветви которой включены первичные обмотки СТ_1 и СТ_2 датчиков в составе РК, осуществляющие связь с ЧЭ_1 и ЧЭ_2 соответственно. Питание схемы — прямоугольные импульсы малой длительности с частотой повторения порядка 1 МГц. Токи в ветвях преобразуются в напряжение на выходах преобразователей ток—напряжение (ПТН_1 и ПТН_2), а их разностное напряжение подаётся на дифференциальные входы масштабирующего усилителя (МУс) (ПТН и МУс выполнены на операционных усилителях). Предполагается, что при отсутствии лопаток в зонах чувствительности $ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$ эквивалентные индуктивности обоих ЧЭ равны, а в одну из ветвей дифференциальной схемы последовательно с первичной обмоткой $СТ_2$ включена дополнительная катушка индуктивности, причём величины индуктивности, коэффициентов передачи входных токов в $ПТН_1$, $ПТН_2$ и напряжения в МУс подбираются таким образом, чтобы выходное напряжение МУс было однополярным и с появлением лопатки изменялось в пределах от 0,5 до 1,0 В и от 0,5 до 0 В при смене функций ЧЭ. Тогда включение на выходе МУс десятиразрядного АЦП с однополярным входом (0–1 В) обеспечивает изменения выходных кодов C_1 в пределах от 512 до 1024 и кодов C_2 от 512 до 0 [8].

Описание модели ИЦ, а также результат моделирования рассматриваются в работах [12, 14]. В модели оба датчика могут быть представлены эквивалентными индуктивностями первичных обмоток СТ, которые согласно [11] могут быть выражены в виде

$$L^{э}(t) = n^2(2L^{э}_{ЧЭ,\infty} + L^{э}_{ЧЭ}(t))$$

(здесь n — коэффициент трансформации СТ) в начале переходного процесса, возбуждаемого импульсом питания. При этом $L^{э}_{ЧЭ}(t)$ определяется в результате моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью турбинной лопатки. Однако в процессе моделирования ИЦ в [12, 14] не учитывалось влияние соседних лопаток и значения эквивалентных индуктивностей ЧЭ-К принимались постоянными во времени и равными $L^{э}_{ЧЭ,\infty}$.

Поэтому в данной работе, как и в [11], в вычислительных экспериментах по исследованию ФП ИЦ ($\mathbf{C}_1(x,y)$ и $\mathbf{C}_2(x,y)$) использовалась модель ЭМВ ЧЭ с учётом влияния соседних лопаток как на ЧЭ-Р, так и на ЧЭ-К, т. е. эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ рабочего и компенсационного датчиков представлены как функции времени.

Результаты исследований семейств функций преобразования ЧЭ РК ОВТД и влияния на них соседних лопаток. Методика проведения вычислительных экспериментов и исходные данные во многом аналогичны тем, что были использованы в экспериментах на моделях [10, 11] за исключением тех, которые связаны со спецификой meth2.

Цель исследований — получение семейства ФП без учёта и с учётом влияния соседних лопаток, а на их основе — количественная оценка влияния соседних лопаток. При этом определению семейства ФП, т. е. зависимостей $L^{э}_{ЧЭ_1}(x,y)$ и $L^{э}_{ЧЭ_2}(x,y)$, предшествует поиск минимальных значений индуктивностей из двух минимумов на каждой из функций $L^{э}_{ЧЭ_1}(z)$ и $L^{э}_{ЧЭ_2}(z)$ при заданных значениях пары координат x и y в диапазонах их изменений. Предполагается, что в соответствии с meth2 угол разворота обоих ЧЭ равен 60° от оси Z (по часовой стрелке), смещения геометрических центров (г.ц.) РК от г.ц. лопатки (г.ц.л.), а также начала системы отсчёта (точек O, O') составляют 2 мм в сторону головной части лопатки, угловое положение хорды лопатки равно 37° от оси Z.

Рис. 2 иллюстрирует получение функций $L^{э}_{ЧЭ_1}(z)$ и $L^{э}_{ЧЭ_2}(z)$ в предположении, что $ЧЭ_1$ является рабочим, а $ЧЭ_2$ — компенсационным (рис. 2, a), и в предположении, что рабочим является $ЧЭ_2$, а компенсационным — $ЧЭ_1$ (рис. 2, b). При этом смещения лопатки относительно системы $OXYZ$ отражают координаты точки K, расположенной на поверхности спинки в месте пересечения с вертикальной прямой, смещённой относительно г.ц.л. на расстояние $O_1O'_2$ (O'_1O_2) в направлении оси X.

Если координаты центров $ЧЭ_1$ (точка O_1) и $ЧЭ_2$ (точка O_2) по оси X составляют $+1$ и -1 мм соответственно, то указанное расстояние от г.ц.л. до точки K равно 2 мм, а

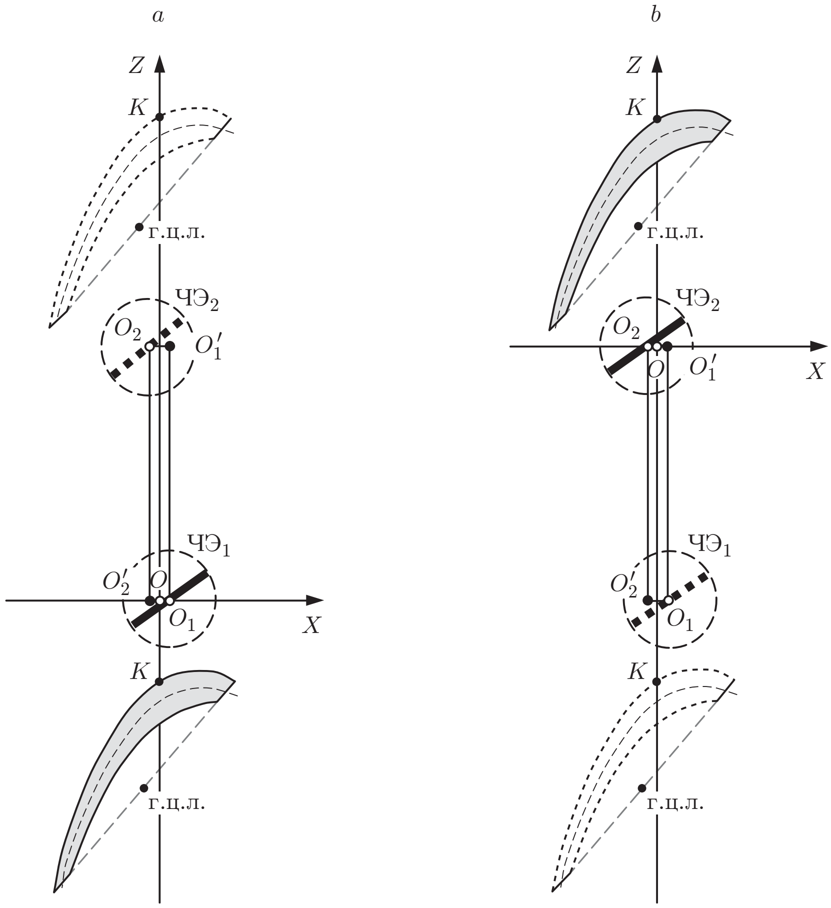


Рис. 2

это означает, что в исходном состоянии лопатки положение точки K совпадает с началом системы отсчёта. Расчёт функций $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_1}(z)$ и $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_2}(z)$ производится для трёх значений координаты x $(-5, 0, +5$ мм) при $y = 0{,}5$ мм (на рис. 2 показаны перемещения лопатки по оси Z при $x = 0$).

Результаты вычислительных экспериментов приведены на рис. 3. Графики $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_1}(z)$ и $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_2}(z)$ подтверждают наличие эффекта «двоения» минимальных значений индуктивностей. Кроме того, графики $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_1}(z)$ (рис. 3, a) показывают наиболее заметное увеличение первого минимума индуктивностей при росте отрицательных осевых смещений лопатки ($x = -5$ мм) по сравнению со вторым минимумом и с теми значениями, которые наблюдаются при осевых смещениях, приближающихся к нулевым, где оба минимума стремятся к равенству (при $x = -5$ мм происходит ЭМВ ЧЭ$_1$ с входной кромкой лопатки). Напротив, при увеличении осевых смещений в положительном направлении ($x = +5$ мм) растёт индуктивность второго минимума по сравнению с первым и с теми значениями, которые наблюдались при осевых смещениях, приближающихся к нулевым. Подобный характер изменений наблюдается и на графиках функций $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_2}(z)$ (рис. 3, b).

Последующие вычислительные эксперименты связаны с получением ФП $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_1}(x, y)$ и $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_2}(x, y)$, где координаты x, y также соответствуют точке K на лопатке. Результаты расчёта семейства ФП представлены на рис. 4 в виде зависимостей $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_1}(x)$ и $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ}_2}(x)$ при $y = \text{const}$ (0,5; 1,0; 1,5 мм). При $y = 1{,}5$ мм на обоих графиках наблюдается уменьшение индуктивностей, а затем при $y = 0{,}5$ мм — их наиболее заметный рост при изменении

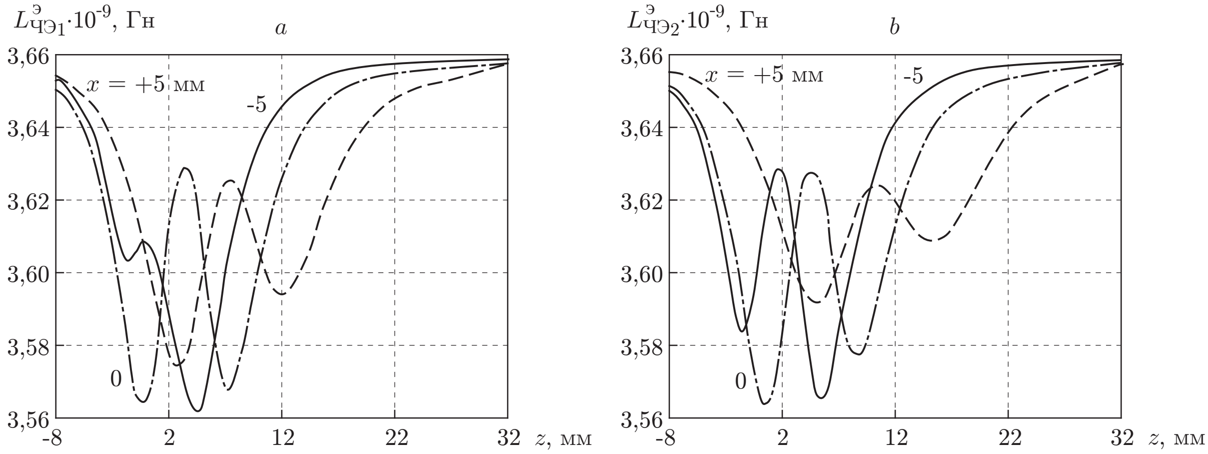


Рис. 3

координаты x в сторону отрицательных значений. Иначе говоря, часть графиков $L^{э}_{ЧЭ_1}(x)$ и $L^{э}_{ЧЭ_2}(x)$ демонстрирует неоднозначность функций, когда выбранному значению $L^{э}_{ЧЭ_1}$ (или $L^{э}_{ЧЭ_2}$) при заданных значениях y соответствуют два значения x. Вместе с тем зависимости $L^{э}_{ЧЭ_1}(y)$ и $L^{э}_{ЧЭ_2}(y)$ при $x = \text{const}$ монотонно возрастают с увеличением координаты y.

Характер изменений индуктивностей $L^{э}_{ЧЭ_1}(x)$ и $L^{э}_{ЧЭ_2}(x)$ при $y = \text{const}$ семейства ФП, полученных в результате моделирования, в целом соответствует характеру экспериментальных зависимостей (для тех же исходных данных) [5]. Однако экспериментальные данные демонстрируют более выраженные минимумы на графиках и их неоднозначность.

Возвращаясь к семействам ФП, представленным на рис. 4, необходимо подчеркнуть, что они наглядно показывают отличительные особенности обоих методов в отношении чувствительности к РЗ (координата y) и диапазона изменений осевых смещений (координата x). Расчёт чувствительности S производился по наибольшим изменениям индуктивности ($\Delta L^{э}_{ЧЭ}$) по формуле $S = \Delta L^{э}_{ЧЭ}/\Delta y$. Тогда чувствительность, обеспечиваемая meth2, более чем вдвое превышает чувствительность meth1 [11]. При этом диапазон измерений координат x возрастает в 5 раз. Однако при вычислении искомых координат смещений в системе измерения, реализующей meth2, приходится использовать специально разработанные алгоритмы [15].

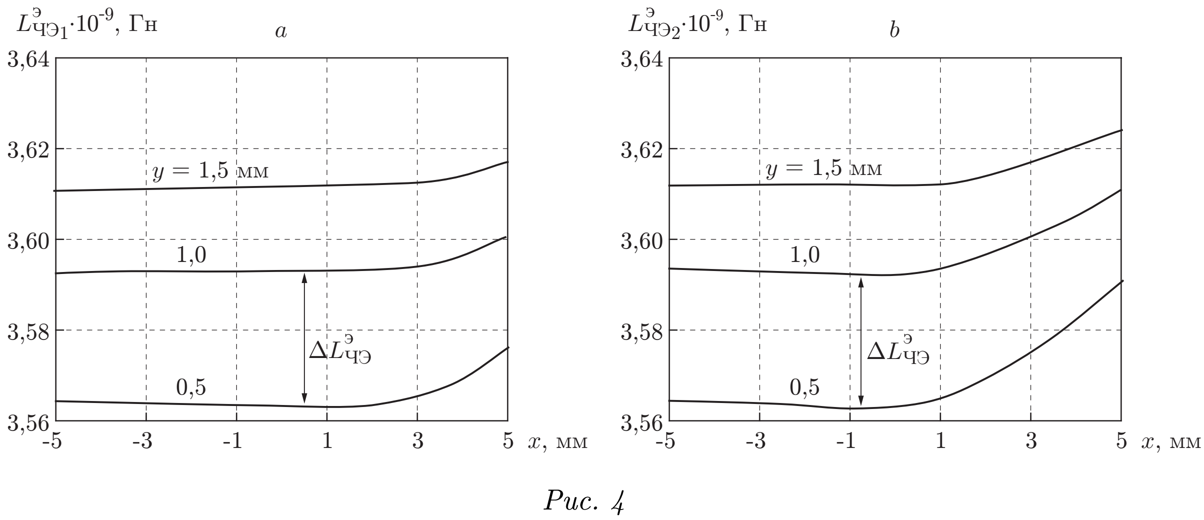


Рис. 4

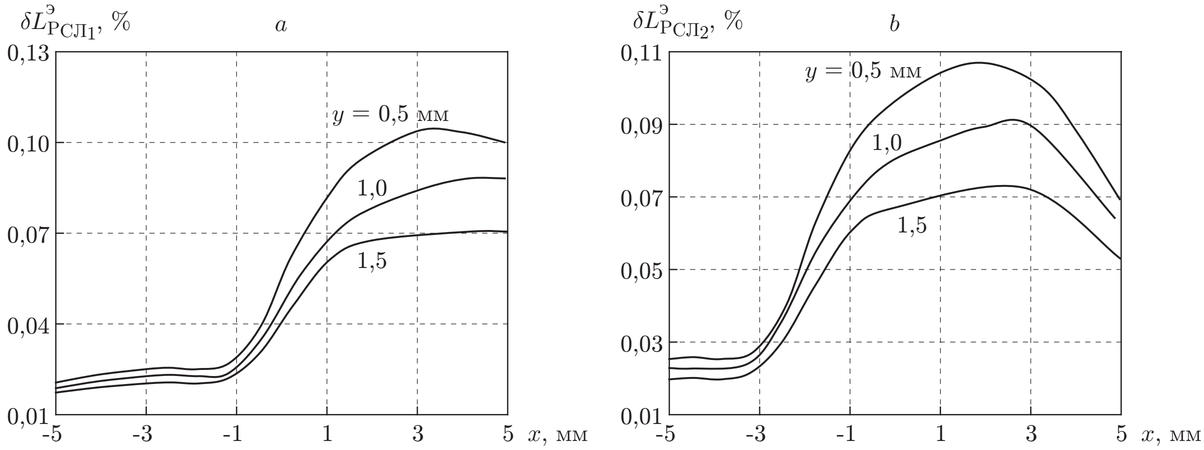


Рис. 5

Влияние соседних лопаток на семейства ФП (см. рис. 4) оценивается с помощью разности информативных значений эквивалентных индуктивностей ЧЭ, выполняющих рабочие функции: $\Delta L^{\text{э}}_{\text{РСЛ}}$ (см. рис. 1, c). Результаты вычислений показаны на рис. 5 в виде семейства ФВ $\delta L^{\text{э}}_{\text{РСЛ1}}(x, y)$ и $\delta L^{\text{э}}_{\text{РСЛ2}}(x, y)$ при $y = \text{const}$ (0,5; 1,0; 1,5 мм) для шага $z_{\text{л}} = 26$ мм (примерно $2{,}5 l_{\text{ЧЭ}}$, где $l_{\text{ЧЭ}}$ — длина ЧЭ ОВТД). При этом расчёт ФВ осуществлялся по формуле

$$\delta L^{\text{э}}_{\text{РСЛ}} = \frac{\Delta L^{\text{э}}_{\text{РСЛ}}}{L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ},\infty}} \cdot 100\ \%,$$

где $L^{\text{э}}_{\text{ЧЭ},\infty}$ — эквивалентная индуктивность ЧЭ при отсутствии лопатки.

Из графиков следует, что влияние соседних лопаток неравномерно по x, это связано с изменением кривизны поверхности пера в головной части лопатки, и тем больше, чем меньше РЗ (y). Вместе с тем данное влияние не превышает 0,1 % и примерно втрое больше, чем в meth1 [11].

Как уже отмечалось, эквивалентная индуктивность ЧЭ при отсутствии лопаток (т. е. при $z_{\text{л}} \to \infty$) постоянна во времени и в соответствии с рис. 1, c имеет наибольшую величину ($3{,}657 \cdot 10^{-9}$ Гн). Однако соседние лопатки оказывают влияние не только на информативное значение эквивалентной индуктивности рабочего ЧЭ, но и на индуктивность ЧЭ, выполняющего компенсационные функции. На рис. 6 представлены результаты мо-

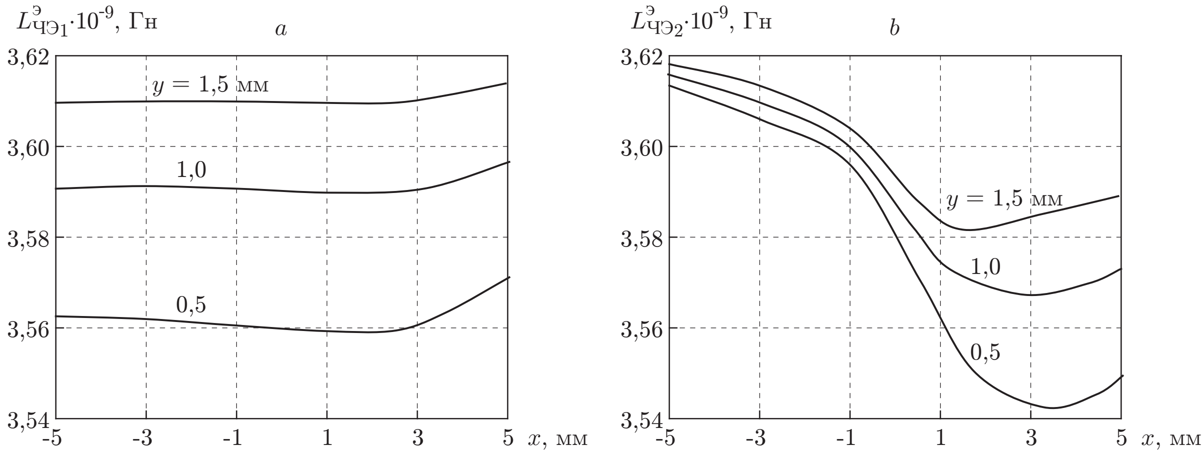


Рис. 6

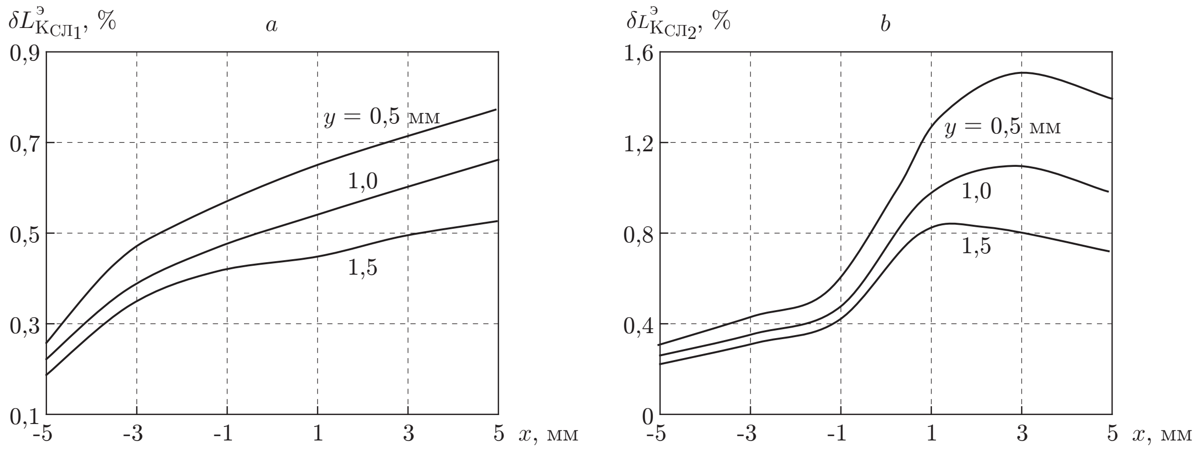


Рис. 7

делирования семейств ФП ($L^{э}_{ЧЭ_1}(x,y)$ и $L^{э}_{ЧЭ_2}(x,\ y)$), полученные для компенсационного ЧЭ при $z_л = 26$ мм. Поскольку ЧЭ-К, как и ЧЭ-Р, через СТ включён в общую ИЦ, то в процессе моделирования ФП фиксация эквивалентной индуктивности ЧЭ-К производится при таких значениях координаты z, которым соответствуют минимальное из двух минимумов информативное значение эквивалентной индуктивности ЧЭ-Р. При этом ЧЭ$_1$-К в ИЦ функционирует в паре с ЧЭ$_2$-Р, а ЧЭ$_2$-К — в паре с ЧЭ$_1$-Р.

Из графиков следует, что под влиянием соседних лопаток индуктивность компенсационного ЧЭ утрачивает своё постоянство и становится зависимой от координат смещений торцов лопаток (x и y) (и, разумеется, от шага $z_л$), причём значения эквивалентной индуктивности компенсационного ЧЭ по-прежнему превышают значения эквивалентной индуктивности рабочего ЧЭ.

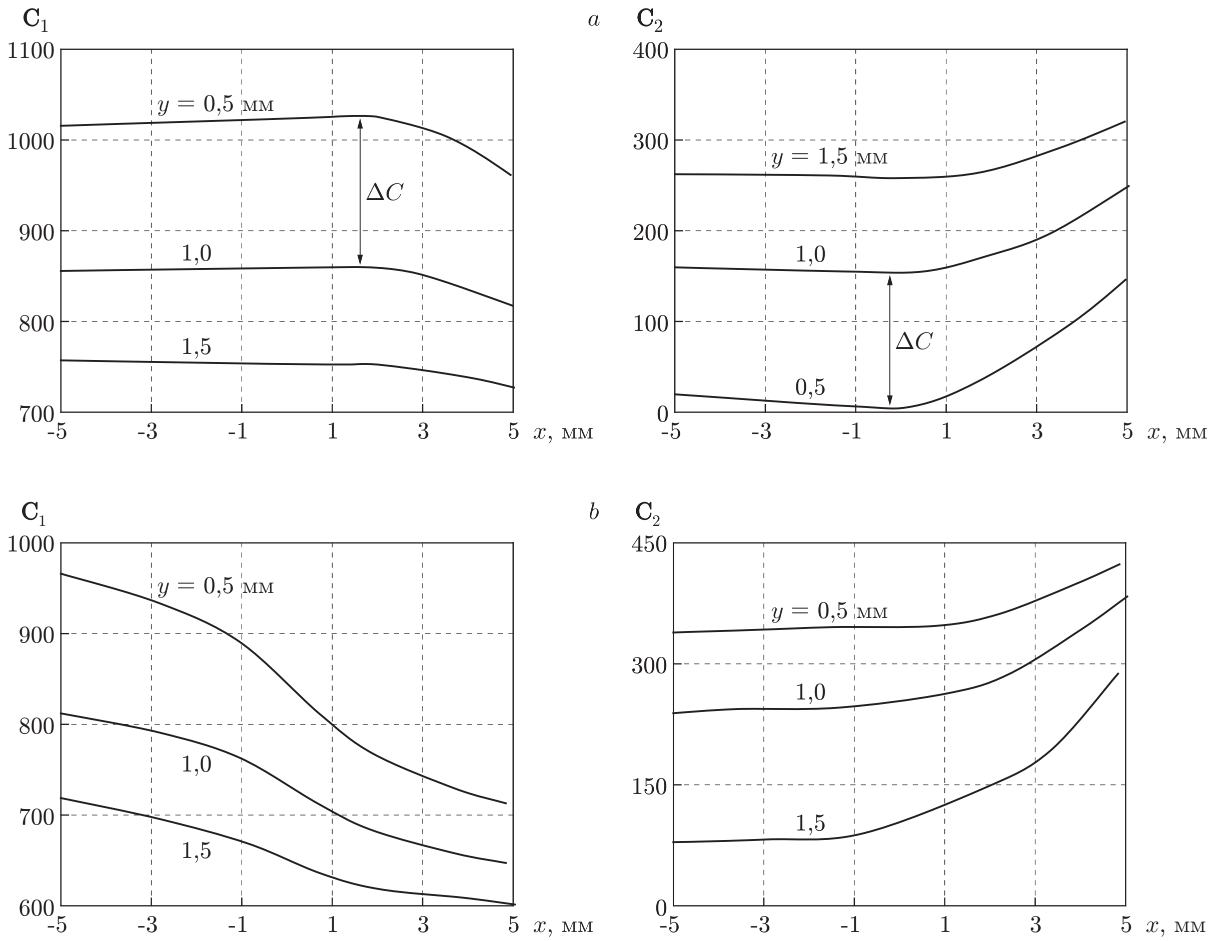
Сравнение ФВ соседних лопаток на компенсационный ЧЭ, вычисленных аналогично ФВ соседних лопаток на рабочий ЧЭ по формуле

$$\delta L^{э}_{К_{СЛ}} = \frac{\Delta L^{э}_{К_{СЛ}}}{L^{э}_{ЧЭ,\infty}} \cdot 100\ \%$$

и с учётом рис. 1, *c*, показывает многократное превышение $\delta L^{э}_{К_{СЛ}}$ над $\delta L^{э}_{Р_{СЛ}}$. Действительно, величина $\delta L^{э}_{К_{СЛ}}$ достигает 1,5 % при уменьшении $z_л$ до 26 мм (рис. 7), что вдвое больше максимального значения $\delta L^{э}_{К_{СЛ}}$ при использовании meth1 [11]. Доминирующее влияние компенсационного ЧЭ на ФП ИЦ, как и в meth1, сохраняется.

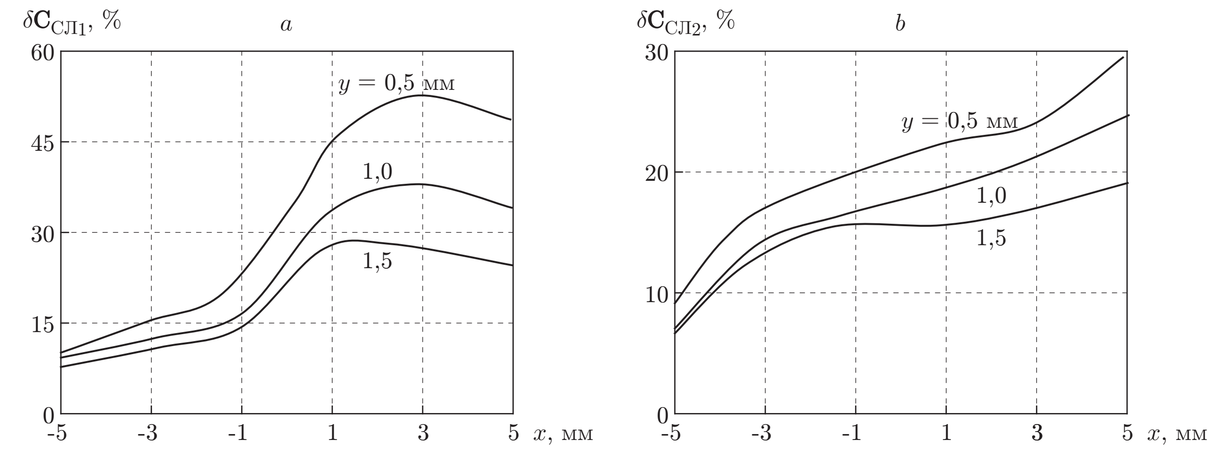
Результаты исследования семейств функций преобразования ИЦ и влияния на них соседних лопаток. Исходные данные для моделирования ИЦ в основном те же, что и в работе [14]. Изменения и уточнения касаются трансформации индуктивностей ЧЭ в первичные обмотки СТ$_1$ и СТ$_2$, величин их активного сопротивления, уменьшения длительности импульса питания ИЦ и связанного с этим увеличения коэффициентов передачи ПТН$_1$, ПТН$_2$ и МУс (указанные изменения представлены в [11]).

На рис. 8 приведено семейство ФП ИЦ — зависимости выходных кодов АЦП $\mathbf{C}_1(x,y)$ и $\mathbf{C}_2(x,y)$, полученные в результате вычислительных экспериментов в предположении отсутствия соседних лопаток, т. е. при $z_л \to \infty$ (рис. 8, *a*), а также с учётом соседних лопаток при $z_л = 26$ мм (рис. 8, *b*). Сравнение обоих семейств ФП показывает в целом одинаковый характер изменений кодов — падение $\mathbf{C}_1$ и рост $\mathbf{C}_2$ с увеличением x. Однако при $z_л = 26$ мм падение $\mathbf{C}_1$ и рост $\mathbf{C}_2$ становятся более выраженными, а изменения кодов ΔC (при $\Delta y = 0{,}5$ мм) уменьшаются.



a
b
C1
C2
1100
1000
900
800
700
600
400
450
300
200
150
100
0
-5
-3
-1
1
3
5
x, мм
y = 0,5 мм
y = 1,5 мм
1,0
1,5
0,5
ΔC

Рис. 8



δCСЛ1, %
δCСЛ2, %
a
b
60
45
30
15
0
20
10
-5
-3
-1
1
3
5
x, мм
y = 0,5 мм
1,0
1,5

Рис. 9

Семейства ФВ соседних лопаток ($\delta\mathbf{C}_{\text{СЛ}_1}(x,y)$ и $\delta\mathbf{C}_{\text{СЛ}_2}(x,y)$) (рис. 9) получены по формуле

$$\delta\mathbf{C}_{\text{СЛ}_1} = (\delta C/\delta C_{\max}) \cdot 100\ \%,$$

где ΔC — разность между кодами C_1 (или C_2); $\Delta C_{\max}$ составляет 512 единиц. Максимальные изменения $\delta\mathbf{C}(x,y)$ (52 %) примерно вдвое превышают аналогичные значения, полученные для meth1 [11], что соответствует соотношению значений ФВ компенсационного датчика для обоих методов. При этом, как и ожидалось, характер изменений ФВ $\delta\mathbf{C}_{\text{СЛ}_1}(x,y)$ определяется ФВ $\delta L^{\text{э}}_{\text{К}_{\text{СЛ}2}}(x,y)$, а $\delta\mathbf{C}_{\text{СЛ}_2}(x,y)$, напротив, — $\delta L^{\text{э}}_{\text{Р}_{\text{СЛ}1}}(x,y)$.

Заключение. С помощью моделей ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки сложной формы (без учёта и с учётом влияния соседних лопаток) получены семейства ФП в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей рабочих ЧЭ от координат x, y смещений, а на их основе — семейства ФВ соседних лопаток на ЧЭ, выполняющие рабочие и компенсационные функции. Показано, что влияние соседних лопаток на компенсационные ЧЭ многократно превышает влияние на рабочие.

С помощью модели дифференциальной ИЦ, включающей первичные обмотки СТ обоих ОВТД в составе РК, выполняющих рабочие и компенсационные функции, исходными данными для которой являются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки (изменяющиеся во времени эквивалентные индуктивности ЧЭ), получены семейства ФП ИЦ в виде зависимостей цифровых кодов от координат x, y смещений торцов лопаток без учёта и с учётом влияния соседних лопаток. На основе ФП определено семейство ФВ и показано существенное влияние соседних лопаток, причём решающая роль в этом влиянии принадлежит датчикам, выполняющим компенсационные функции.

Вместе с тем следует отметить завышенные оценки влияния соседних лопаток из-за ряда упрощающих допущений в моделях ЭМВ ЧЭ и лопаток, в которых не учитывалось экранирующее действие токовода ОВТД, крепёжной арматуры и статорной оболочки. Но и с применением более совершенных моделей можно ожидать достаточно серьёзного влияния соседних лопаток, которое устраняется при экспериментальном получении семейства ФП (градуировочных характеристик). Описание предложенной методики градуировки и градуировочного устройства приведено в работе [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Данильченко В. П., Лукачев С. В., Ковылов Ю. Л. и др.** Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2008. 620 с.
2. **Прокопец А. О., Ревзин Б. С., Рожков А. В.** Необходимость диагностирования радиальных зазоров в проточной части газотурбинных двигателей // Газотурбинные технологии. 2004. № 4. С. 5–7.
3. **Иноземцев А. А., Бажин С. В., Снитко М. А.** Вопросы оптимизации радиальных зазоров ТВД авиационного ГТД // Вестн. двигателестроения. 2012. № 2. С. 149–154.
4. **Simon D. L., Gang S., Hunter G. W. et al.** Sensor needs for control and health management of intelligent aircraft engines // Proc. of ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air. Vienna, Austria, 2004. Vol. 2. 17 p.
5. **Герасимов В. Г., Клюев В. В., Шатерников В. Е.** Методы и приборы электромагнитного контроля /Под ред. В. Е. Шатерникова: М.: Издательский дом «Спектр», 2010. 256 с.
6. **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.

7. **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.
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., Райков Б. К. и др.** Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Автометрия. 2015. **51**, № 3. С. 104–112.
10. **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.
11. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипнов П. Е. 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., 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. 692–696.
13. **Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: СамНЦ РАН, 2013. С. 636–641.
14. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Результаты моделирования измерительных цепей с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближённым дифференцированием // Тр. XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: СамНЦ РАН, 2014. С. 697–703.
15. **Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н.** Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Тр. XII Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: СамНЦ РАН, 2010. С. 323–327.

Поступила в редакцию 16 февраля 2015 г.