

УДК 681.518

**С. Ю. Боровик**, д-р техн. наук, вед. научн. сотр., borovik@iccs.ru,

**М. М. Кутейникова**, мл. научн. сотр., kuteynikova@iccs.ru,

**П. Е. Подлипнов**, инж., perodlypnov@yandex.ru, **Б. К. Райков**, ст. научн. сотр, raikov@iccs.ru,

**Ю. Н. Секисов**, д-р техн. наук, зав. лаб., sekisov@iccs.ru,

**О. П. Скобелев**, д-р техн. наук, гл. научн. сотр., borovik@iccs.ru,

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, г. Самара

## Влияние соседних лопаток на измерение радиальных зазоров в турбине\*

*Исследуется влияние шага установки лопаток на колесе ротора турбины газотурбинного двигателя на результат измерения радиальных и осевых смещений их торцов. Приводится описание модели электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков с торцами контролируемой и соседних лопаток. Рассматривается модель дифференциальной измерительной цепи с импульсным питанием, которая, в сочетании с моделями электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов, обеспечивает получение семейства функций преобразования измерительной цепи и позволяет количественно оценить влияние соседних лопаток. Приводится описание методики получения семейства градуировочных характеристик системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, которая позволяет избежать возможных погрешностей, связанных с влиянием соседних лопаток в процессе эксплуатации системы.*

**Ключевые слова:** турбина, лопатки сложной формы, радиальные и осевые смещения, одновитковый вихретоковый датчик, влияние соседних лопаток, модель электромагнитного взаимодействия, модель измерительной цепи, уменьшение влияния, методика получения градуировочных характеристик

### Введение

Проблема измерения радиальных зазоров (РЗ) между торцами лопаток и статорной оболочкой особенно актуальна на современном этапе развития авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения, в которых предусматриваются системы управления, функционирующие на основе информации, полученной непосредственно с датчиков, установленных в газоздушном тракте и работающих в крайне тяжелых и даже экстремальных условиях (температура выше 1000 °С в турбине, околосвуковая линейная скорость торцов лопаток, повышенный уровень вибраций, загрязненность, ионизация и др.) [1].

Согласно работе [2] наиболее перспективными для работы в таких условиях являются одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника и токовыми (ТВ), выполненными из тех же сплавов, что и лопатки. С помощью ТВ ЧЭ связан с согласующим трансформатором (СТ), размещенным вне статорной оболочки (в благоприятных условиях по сравнению с условиями работы ЧЭ). Изменения индуктивности ЧЭ, связанные с РЗ, трансформируются в соответствующие изменения индук-

тивности первичной обмотки СТ, включенной в измерительную цепь (ИЦ) с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) на выходе.

Однако торцы лопаток совершают многомерные движения, причинами которых являются термические и упругие деформации элементов конструкций лопаточного колеса (ЛК), причем изменения РЗ являются следствием смещений торцов лопаток только в одном радиальном направлении. Поэтому для измерения РЗ с помощью ОВТД приходится использовать так называемые кластерные методы, предусматривающие применение группы (кластера) ОВТД и обеспечивающие измерение нескольких составляющих смещений, число которых равно числу ОВТД в составе кластера [3].

Вместе с тем, приходится констатировать, что все многообразие кластерных методов и реализующих их средств, описание которых приведено в работе [3], в основном ориентировано на применение в компрессорах ГТД. И только в более поздних публикациях [4, 5] рассматривается новый кластерный метод измерения РЗ и осевых смещений ЛК в турбине. При этом предполагается, что турбинные лопатки отличаются от лопаток компрессора более сложной формой и повышенной кривизной поверхности пера (сечения плоскостью, перпендикулярной оси лопатки, — "серповидные", а плоскостью, параллельной оси, — "U-образные", что связано с

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-00802).

наличием выступов в торце лопатки), а толщина лопатки существенно уменьшается от головной к хвостовой части.

Метод предусматривает использование распределенного кластера (РК) из двух ОВТД. Оба датчика включены в дифференциальную ИЦ преобразователя (с АЦП на выходе), который включен в состав технических средств системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток. Разработано программное обеспечение и проведены экспериментальные исследования системы на имитаторе объекта, подтверждающие работоспособность и эффективность метода.

Кроме того, проведен комплекс теоретических исследований, в ходе которых разработаны модель электромагнитного взаимодействия ЧЭ с торцом турбинной лопатки, а также модель ИЦ с датчиками. С помощью разработанных моделей получены семейства функций преобразования (ФП) в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей ЧЭ и цифровых кодов на выходе ИЦ от радиальных и осевых смещений торца контролируемой лопатки с учетом геометрических и физических параметров ЧЭ и лопатки, а также электрических параметров элементов ИЦ, включая датчик [6–9].

Вместе с тем, необходимо отметить, что в современных и перспективных турбинах авиационных ГТД шаг установки лопаток может быть невелик и в линейном выражении соизмерим с длиной ЧЭ. Это означает, что соседние лопатки будут оказыва-

вать влияние на полезные изменения индуктивности ЧЭ, причем это влияние может оказаться весьма существенным.

Однако, несмотря на большой объем проведенных теоретических исследований, результаты которых приведены в работах [3, 6–9], влияние соседних лопаток на сегодняшний день остается неизученным. Настоящая статья призвана устранить существующий пробел.

В статье рассматриваются модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ обоих ОВТД в составе РК с контролируемой и соседними лопатками, приводятся результаты моделирования ИЦ, исходными данными для которого являются результаты моделирования первичного преобразования в ЧЭ. При этом для удобства читателей указанным материалам предшествует краткое описание метода измерения РЗ и осевых смещений ЛК.

Рассматриваются также вопросы уменьшения влияния соседних лопаток, которые связаны с вновь разработанной методикой получения семейства градуировочных характеристик (ГХ) измерительных каналов ОВТД в составе РК.

### Метод измерения

Размещение ЧЭ ОВТД в составе РК относительно ЛК турбины с лопатками под номерами 1, 2, ...,  $n_L - 1$ ,  $n_L$  показано на рис. 1, а. Центры ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> в точках  $O_1$  и  $O_2$  находятся на угловом расстоянии друг от друга  $1,5\psi_L$  (где  $\psi_L$  — шаг установки лопаток\*), а в представленном на рис. 1, а положении ЛК ЧЭ<sub>1</sub> выполняет рабочую функцию (ЧЭ<sub>1</sub>-Р), ЧЭ<sub>2</sub> — компенсационную (ЧЭ<sub>2</sub>-К).

Системы отсчета изображены на рис. 1, б: начала отсчетов (точки  $O$  и  $O'$ ) расположены в середине отрезков  $O_1O'_1$  и  $O_2O'_1$ , направление оси  $Z$  совпадает с направлением вращения, а вдоль оси  $X$  происходят осевые смещения ЛК и торцов лопаток (они характеризуются изменением координаты  $x$ ). Поскольку начала отсчета (точки  $O$  и  $O'$ ) находятся на внутренней поверхности статорной оболочки и ось  $Y$  направлена по радиусу, то РЗ определяет координата  $u$ .

Метод предусматривает фиксацию минимальных значений индуктивностей рабочих ЧЭ ( $L_{ЧЭ1,min}$  и  $L_{ЧЭ2,min}$ ) в моменты времени  $t_{1,min}$  и  $t_{2,min}$  (рис. 1, в), когда торцы лопаток проходят окрестности центров ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> в точках  $O_1$  и  $O_2$ . Если вращение ЛК

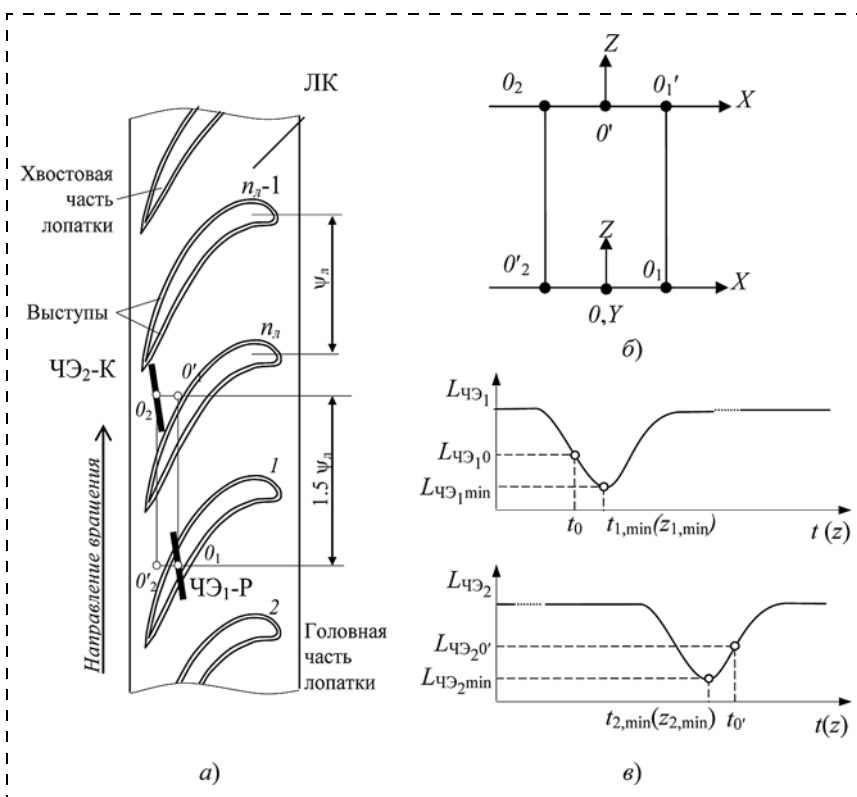


Рис. 1. Размещение лопаток на ЛК, ЧЭ ОВТД в составе РК (а), системы отсчета (б) и изменения индуктивностей  $L_{ЧЭ1}$  и  $L_{ЧЭ2}$  во времени (в)

\* Угловому шагу  $\psi_L$  соответствует шаг  $z_L$  в линейном выражении.

равномерно, то ось времени  $t$  можно заменить на ось  $Z$ . Тогда минимальным значениям индуктивностей  $L_{\text{ЧЭ}_1, \min}$  и  $L_{\text{ЧЭ}_2, \min}$  будут соответствовать  $z_{1, \min}$  и  $z_{2, \min}$  (вместо  $t_{1, \min}$  и  $t_{2, \min}$ ). Кроме того, обязательным условием работоспособности метода является разворот ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> относительно оси  $Z$  на угол 30...60° против часовой стрелки, что связано со специфическими особенностями турбинной лопатки и, в первую очередь, с наличием выступов в ее торцевой части. Если бы ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> размещались симметрично относительно оси  $Z$ , т. е. с углом разворота 30...60° по часовой стрелке, то прохождение ЧЭ выступами контролируемой лопатки сопровождалось бы "двоением" минимальных значений индуктивностей  $L_{\text{ЧЭ}_1, \min}$  и  $L_{\text{ЧЭ}_2, \min}$  вместо одиночных минимумов, изображенных на рис. 1, в. Вместе с тем, чтобы дополнительно уменьшить влияние кривизны поверхностей пера в торцевой части лопатки, ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> смещены в сторону ее хвостовой части (рис. 1, а).

Семейство ФП ЧЭ ОВТД в составе РК представляется в виде зависимости индуктивностей ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> от координат смещений  $x$  и  $y$  ( $L_{\text{ЧЭ}_1}(x, y)$ ,  $L_{\text{ЧЭ}_2}(x, y)$ ).

Семейство ФП (как система из двух уравнений) по значениям  $L_{\text{ЧЭ}_1, \min}$ ,  $L_{\text{ЧЭ}_2, \min}$  позволяет найти искомые координаты  $y$  (РЗ) и  $x$ .

Вместо семейства ФП ( $L_{\text{ЧЭ}_1}(x, y)$ ,  $L_{\text{ЧЭ}_2}(x, y)$ ) в системе измерения, реализующей рассматриваемый метод, обычно используется семейство ГХ — зависимостей цифровых кодов  $C_1(x, y)$  и  $C_2(x, y)$ , полученных экспериментально, и экстремальные значения кодов  $C_1$  и  $C_2$ , соответствующие  $L_{\text{ЧЭ}_1}(x, y)$ ,  $L_{\text{ЧЭ}_2}(x, y)$  [5]. (Здесь и далее полужирным прямым шрифтом обозначены расчетные функции изменения и эмпирические зависимости кодов от координат смещений (ФП и ГХ), а светлым курсивом обозначены значения кодов, полученные после аналогово-цифрового преобразования и обработки).

#### **Модель электромагнитного взаимодействия рабочего и компенсационного ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками. Результаты моделирования**

Основой вновь разработанной модели является существующая модель электромагнитного взаимодействия ЧЭ датчика с торцом контролируемой турбинной лопатки с учетом ее формы и объема, в которой используется метод конечных элементов [6]. 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 четырех перечисленных частей в торце

лопатки, названная дном (пятая часть). Предполагается, что толщины поверхностей спинки, корыта, входной и выходной кромок, а также дна исчезающе малы.

Разбиение на конечные элементы (КЭ) всех перечисленных частей лопатки выполняется с равномерным шагом по длине, ширине и высоте. При этом формируется геометрическое представление модели — объемная сетка из бесконечно тонких проводящих нитей, проходящих по ребрам КЭ. В этом 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.

Каждый проводник КЭ рассматривается как элемент тока. Соединения проводников в точке образуют узел, а замкнутое соединение — контур. В контурах объемной сетки под воздействием магнитного поля, возбуждаемого током ЧЭ, возникают ЭДС и соответствующие контурные (вихревые) токи. Каждый элемент тока в окружающем пространстве создает дополнительное магнитное поле, взаимодействующее с контуром ЧЭ и со всеми контурами КЭ. Далее сетка из проводящих нитей заменяется на электрическую схему, в которой сохраняются контуры сетки, а в ветвях между узлами включены эквивалентные сопротивления, значения которых зависят от электропроводности материала и размеров КЭ.

Предполагается, что в ИЦ используется импульсное питание — через СТ ОВТД и ТВ передний фронт прямоугольного импульса передается 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. В расчетах индукции магнитного поля используется закон Био—Савара.

Результат моделирования для заданного размещения ЧЭ, заданных координат смещений торца контролируемой лопатки, геометрических и электрических параметров контура ЧЭ и лопатки представлен эквивалентной индуктивностью, изменяющейся во времени ( $L_{\text{ЧЭ}}^{\exists}(t)$ ). В момент появления переднего фронта импульса питания  $L_{\text{ЧЭ}}^{\exists}$  скачком уменьшается, а затем, по мере затухания вихревых токов в лопатке, монотонно возрастает и стремится к постоянной величине (при  $t \rightarrow \infty$ ), соответствующей индуктивности при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика ( $L_{\text{ЧЭ}, \infty}^{\exists}$ ). При этом согласно рассматриваемому методу за информативное значение индуктивности рабочего ЧЭ принимается ее минимум, а соответствующее значе-

ние функции  $L_{\text{ЧЭ}}^{\text{э}}(t)$  фиксируется в момент появления заднего фронта импульса питания (не более  $0,2 \cdot 10^{-6}$  с). Индуктивность компенсационного ЧЭ предполагается постоянной и равной  $L_{\text{ЧЭ},\infty}^{\text{э}}$ . Также предполагается, что КЭ не взаимодействуют между соседними лопатками, равно как и между частями одной лопатки.

В отличие от существующей [6] во вновь разработанной модели предусмотрены два варианта: в первом электромагнитное взаимодействие осуществляется между ЧЭ и контролируемой лопаткой, находящейся на минимальном расстоянии от ЧЭ, а также с двумя соседними лопатками, каждая из которых находится на расстоянии шага  $\psi_{\text{л}}$  ( $z_{\text{л}}$ ) от контролируемой (имитируется функционирование рабочего ЧЭ в РК ОВТД, рис. 2, а); во втором варианте электромагнитное взаимодействие осуществляется между ЧЭ и двумя лопатками, находя-

щимися на расстоянии, равном  $0,5\psi_{\text{л}}$  ( $0,5z_{\text{л}}$ ) от ЧЭ (имитируется функционирование компенсационного ЧЭ, рис. 2, б). При этом в изменениях эквивалентных индуктивностей ЧЭ учитывается совокупное влияние вихревых токов во всех лопатках. На рис. 2, в это влияние показано на графиках  $L_{\text{ЧЭ}}^{\text{э}}(t)$  отдельно для ЧЭ-Р и ЧЭ-К, причем графики 1 как для ЧЭ-Р, так и для ЧЭ-К демонстрируют постоянство во времени эквивалентных индуктивностей и равенство  $L_{\text{ЧЭ},\infty}^{\text{э}}$  (при отсутствии лопаток), а штриховые линии ограничивают во времени длительность импульса питания ( $\Delta t$ ) и соответствуют его заднему фронту.

Для ЧЭ-Р графики 2 и 3 — это изменения эквивалентной индуктивности при отсутствии соседних лопаток и их наличии соответственно. Точки пересечения этих графиков со штриховой линией характеризуют информативные значения эквивалентных индуктивностей ЧЭ, а их разность ( $\Delta L_{\text{Рсл}}$ ) — влияние соседних лопаток. Для ЧЭ-К график 2 — это изменение эквивалентной индуктивности с учетом соседних лопаток, а разность эквивалентных индуктивностей (графики 2 и 1) в момент окончания импульса питания (штриховая линия) характеризует влияние соседних лопаток на ЧЭ-К ( $\Delta L_{\text{Ксл}}$ ).

Далее приводятся результаты вычислительных экспериментов, в которых использовалась разработанная модель.

На рис. 3 представлены семейства ФП ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub>, выполняющих рабочие функции в РК ОВТД, в предположении отсутствия соседних лопаток ( $z_{\text{л}} \rightarrow \infty$ ). Методика проведения эксперимента и исходные данные аналогичны тем, что были использованы в экспериментах на существующей модели [6], с той лишь разницей, что длительность импульса питания была уменьшена до  $0,06 \cdot 10^{-6}$  с, а сопротивление контура ЧЭ увеличено до 0,4 Ом. Как и ожидалось, семейства ФП на рис. 3 идентичны тем, что получены ранее [7].

Влияние соседних лопаток на семейства ФП, представленные на рис. 3, оценивается с помощью разности информативных значений эквивалентных индуктивностей ЧЭ, выполняющих рабочие функции —  $\Delta L_{\text{Рсл}}$  (см. рис. 2, в). Результаты вычислений, в свою очередь, представлены на рис. 4 в виде семейств функций влияния (ФВ)  $\delta L_{\text{Рсл}_1}(x, y)$  и  $\delta L_{\text{Рсл}_2}(x, y)$  при  $y = \text{const}$  (0,5; 1,0; 1,5 мм) для шага  $z_{\text{л}}$ , равного 32 мм (а) и 26 мм (б).

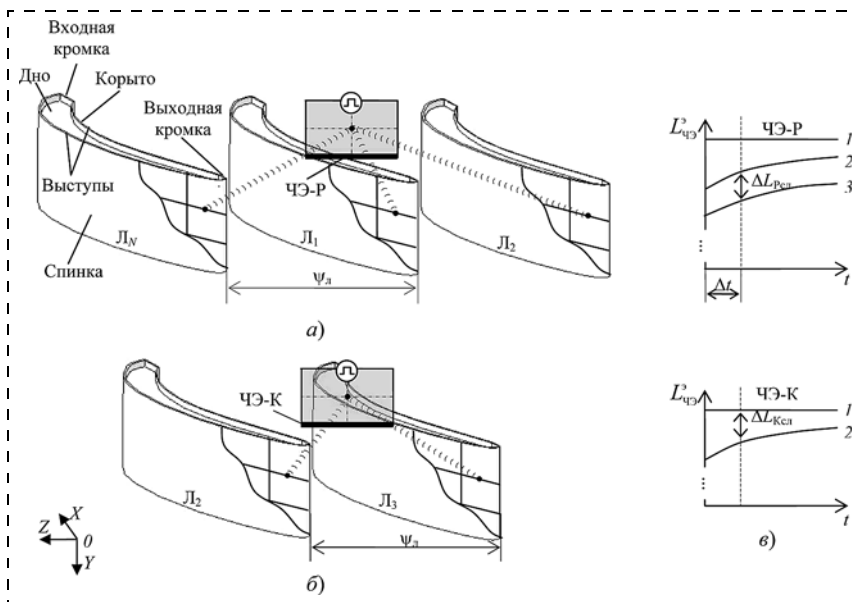


Рис. 2. Взаимодействие ЧЭ-Р с контролируемой и соседними лопатками (а) и ЧЭ-К — с соседними лопатками (б), а также изменения эквивалентных индуктивностей ЧЭ-Р и ЧЭ-К во времени (в)

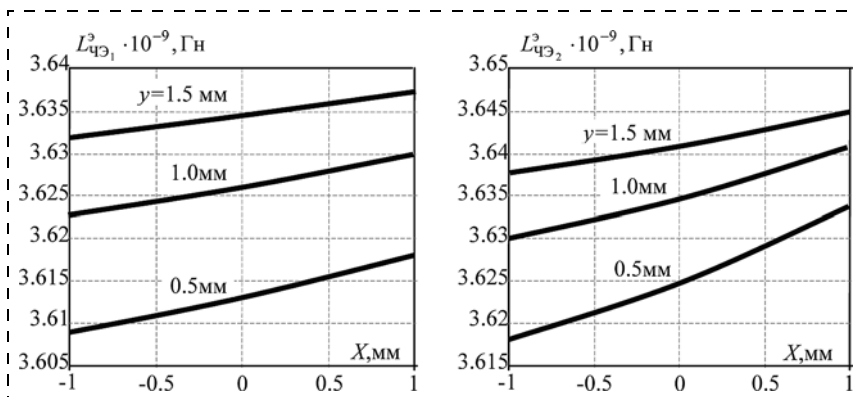


Рис. 3. Семейства ФП ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> без учета влияния соседних лопаток

При этом ФВ рассчитывали по формуле

$$\delta L_{Pcl} = \frac{\Delta L_{Pcl}}{L_{ЧЭ, \infty}} \cdot 100 \%,$$

где  $L_{ЧЭ, \infty}$  — эквивалентная индуктивность ЧЭ при отсутствии лопатки.

Из графиков следует, что с уменьшением шага  $z_{л}$  (от 32 до 26 мм) влияние соседних лопаток возрастает в несколько раз, причем это влияние тем больше, чем меньше РЗ ( $y$ ). Вместе с тем, это влияние не превышает 0,03 %.

Как уже отмечалось, эквивалентная индуктивность ЧЭ при отсутствии лопаток (т. е. при  $z_{л} \rightarrow \infty$ ) постоянна во времени и, в соответствии с рис. 2, *в*, имеет наибольшее значение ( $3,657 \cdot 10^{-9}$  Гн). Соседние лопатки оказывают влияние не только на информативные значения эквивалентных индуктивностей рабочих ЧЭ, но и на индуктивности ЧЭ, выполняющих компенсационные функции. На рис. 5 представлены результаты моделирования семейств ФП ( $L_{ЧЭ_1}^3(x, y)$  и  $L_{ЧЭ_2}^3(x, y)$ ), полученные для компенсационных ЧЭ. Поскольку ЧЭ-К, как и ЧЭ-Р, через СТ включены в общую ИЦ, то в процессе моделирования ФП фиксация эквивалентных индуктивностей ЧЭ-К проводится при таких значениях координаты  $z$ , которым соответствуют минимумы информативных значений эквивалентных индуктивностей ЧЭ-Р. При этом ЧЭ<sub>1</sub>-К в ИЦ функционирует в паре с ЧЭ<sub>2</sub>-Р, а ЧЭ<sub>2</sub>-К — в паре с ЧЭ<sub>1</sub>-Р.

Из графиков следует, что под влиянием соседних лопаток индуктивность компенсационных ЧЭ утрачивает свое постоянство и становится зависимой как от координат смещений торцов лопаток ( $x$  и  $y$ ), так и от шага  $z_{л}$ . Однако большая часть значений эквивалентных индуктивностей компенсационных ЧЭ в семействе ФП (рис. 5) по-прежнему превышает все возможные значения эквивалентных индуктивностей семейства ФП рабочих ЧЭ на рис. 3.

Из графиков следует, что под влиянием соседних лопаток индуктивность компенсационных ЧЭ утрачивает свое постоянство и становится зависимой как от координат смещений торцов лопаток ( $x$  и  $y$ ), так и от шага  $z_{л}$ . Однако большая часть значений эквивалентных индуктивностей компенсационных ЧЭ в семействе ФП (рис. 5) по-прежнему превышает все возможные значения эквивалентных индуктивностей семейства ФП рабочих ЧЭ на рис. 3.

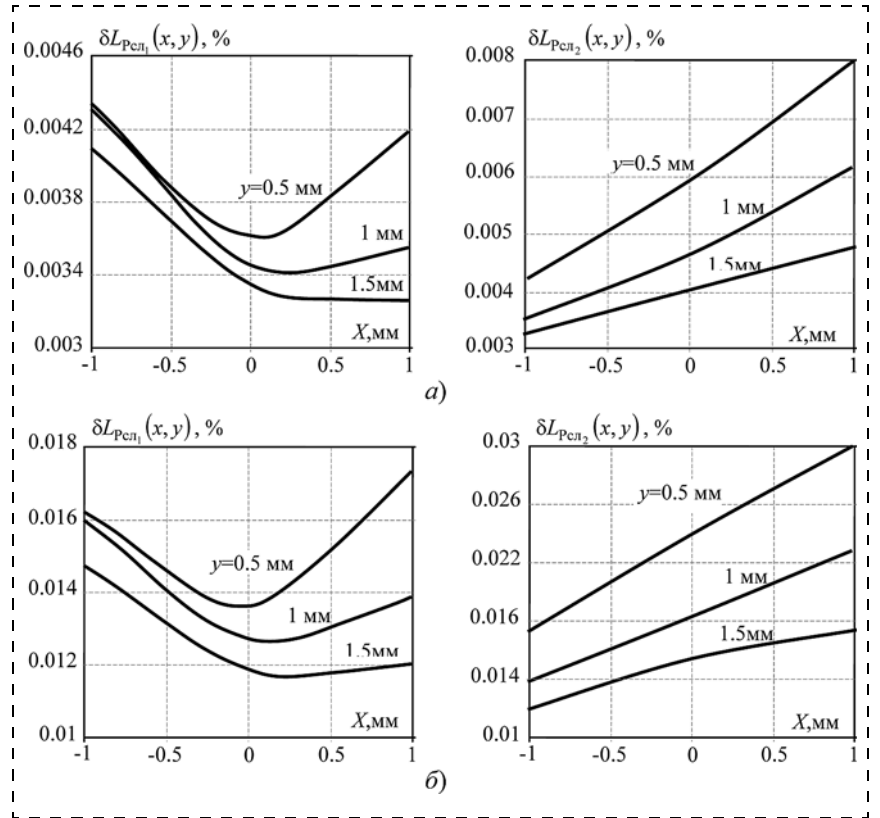


Рис. 4. ФВ соседних лопаток на рабочие ЧЭ ( $\delta L_{Pcl_1}(x, y)$  и  $\delta L_{Pcl_2}(x, y)$  при  $z_{л}$ , равном 32 (а) и 26 мм (б)

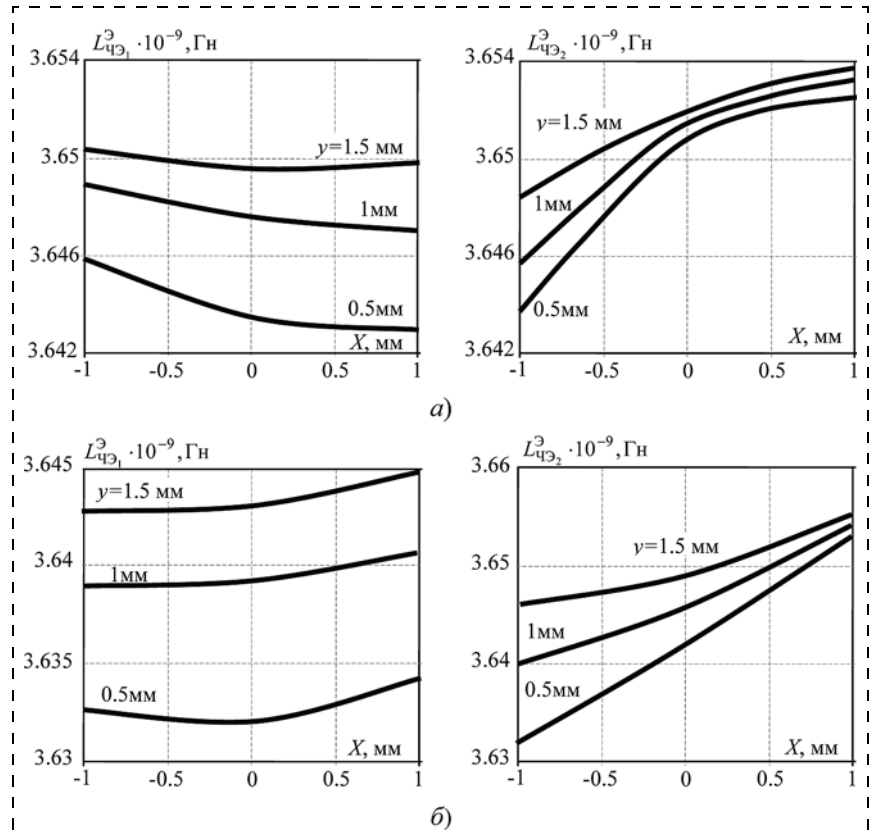


Рис. 5. Семейства ФП компенсационных ЧЭ при наличии соседних лопаток, установленных с шагом  $z_{л}$ , равным 32 (а) и 26 мм (б) (ЧЭ<sub>1</sub>-К функционирует в паре с ЧЭ<sub>2</sub>-Р, а ЧЭ<sub>2</sub>-К — с ЧЭ<sub>1</sub>-Р)

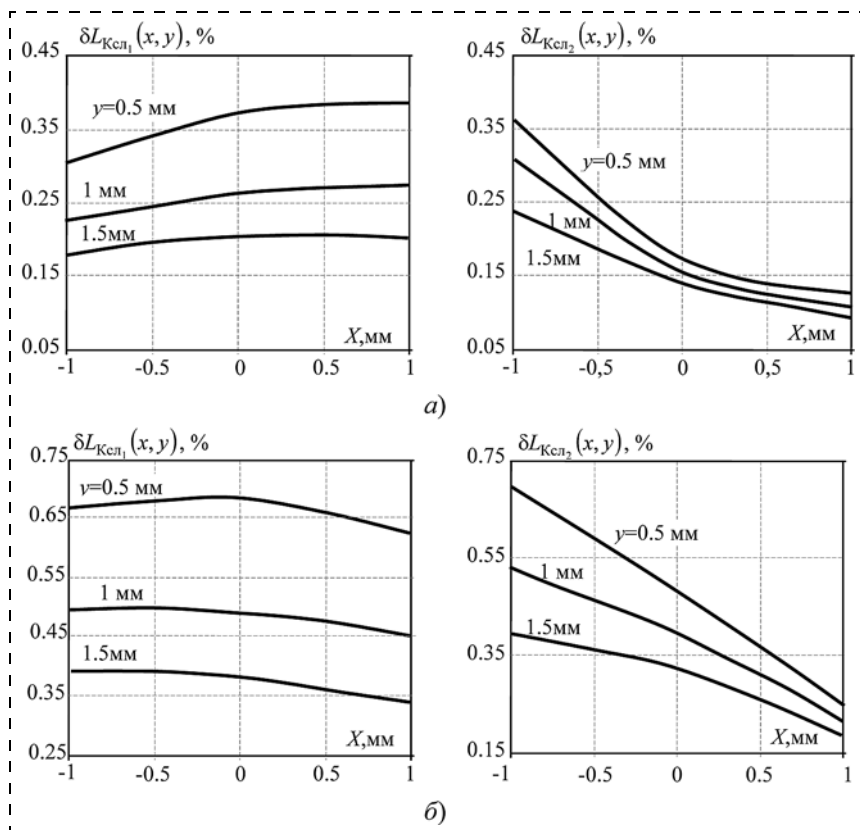


Рис. 6. Семейства ФВ соседних лопаток на компенсационные ЧЭ ( $\delta L_{Kcл_1}(x, y)$  и  $\delta L_{Kcл_2}(x, y)$  при шаге  $z_d$  равном 32 (а) и 26 мм (б))

Сравнение ФВ соседних лопаток на компенсационные ЧЭ, вычисленные аналогично ФВ соседних лопаток на рабочие ЧЭ по формуле

$$\delta L_{Kcл} = \frac{\Delta L_{Kcл}}{L_{ЧЭ, \infty}} \cdot 100 \%$$

и с учетом рис. 2, в, показывают многократное превышение  $\delta L_{Kcл}$  над  $\delta L_{Pcл}$  (значение  $\delta L_{Kcл}$  достигает 0,75 % при уменьшении  $z_d$  до 26 мм, рис. 6). Учитывая суммарное действие рабочего и компенсационного ЧЭ в дифференциальной ИЦ, можно ожидать значительное увеличение вклада компенсационного ЧЭ за счет соседних лопаток и его доминирующее влияние на ФП ИЦ.

#### Влияние соседних лопаток на результаты моделирования измерительной цепи

Входная часть ИЦ — это дифференциальная схема, в ветви которой включены первичные обмотки СТ<sub>1</sub> и СТ<sub>2</sub> датчиков в составе РК, осуществляющие связь с ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> соответственно. Питание схемы — прямоугольные импульсы малой длительности ( $\Delta t$  не более  $0,2 \cdot 10^{-6}$  с) с частотой повторения порядка 1 МГц. Токи в ветвях преобразуются в напряжения на выходах преобразователей "ток — напряжения" (ПТН<sub>1</sub> и ПТН<sub>2</sub>), а их разно-

стное напряжение подается на дифференциальные входы масштабирующего усилителя (МУс) (ПТН и МУс выполнены на операционных усилителях). Предполагается, что при отсутствии лопаток в зонах чувствительности ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> эквивалентные индуктивности обоих ЧЭ равны, а в одну из ветвей дифференциальной схемы последовательно с первичной обмоткой СТ<sub>2</sub> включена дополнительная катушка индуктивности, причем значения индуктивности, коэффициентов передачи входных токов в ПТН<sub>1</sub>, ПТН<sub>2</sub> и напряжений в МУс подбираются таким образом, чтобы выходное напряжение МУс было однополярным и с появлением лопаток в зонах чувствительности ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> 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 [5].

Описание модели ИЦ, а также результатов моделирования рассматриваются в работах [8, 9]. В модели оба датчика могут быть представлены эквивалентными индуктивностями первичных обмоток СТ, которые согласно работе [10], могут быть выражены в виде  $L^{\exists} = n^2 L_{ЧЭ}^{\exists}(t)$  (где  $n$  — коэффициент трансформации СТ) в начале переходного процесса, возбуждаемого импульсом питания. При этом  $L_{ЧЭ}^{\exists}(t)$  определяется в результате моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ с торцевой частью турбинной лопатки. Однако в процессе моделирования ИЦ в работе [8] не учитывалось влияние соседних лопаток, и значения эквивалентных индуктивностей ЧЭ, выполняющих компенсационные функции, принимались постоянными во времени и равными  $L_{ЧЭ, \infty}^{\exists}$ .

Поэтому в настоящей работе в вычислительных экспериментах по исследованию ФП ИЦ ( $C_1(x, y)$  и  $C_2(x, y)$ ) использовалась модель электромагнитного взаимодействия ЧЭ с учетом влияния соседних лопаток как на рабочие, так и на компенсационные ЧЭ, т. е. эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ рабочего и компенсационного датчиков представлены как функции времени. Кроме того, в исходные данные модели ИЦ (по сравнению с работой [8]) внесены изменения, которые, в первую очередь, касаются трансформации  $L_{ЧЭ}^{\exists}(t)$  в первичную обмотку СТ и ее сопротивления. По экспериментальным данным, которыми располагают авторы, индуктивность ТВ в реальных конструкциях ОВТД (в отличие от идеальных, в которых индуктивность ТВ нулевая) составляет порядка  $2L_{ЧЭ, \infty}$ .

В связи с этим приведенное выше выражение должно быть скорректировано и представлено формулой  $L^3 = n^2(2L_{\text{чЭ},\infty}^3 + L_{\text{чЭ}}^3(t))$ , что приближает результаты расчета к данным, полученным на измерителе RLC-параметров E7-12 (величина  $L^3$  примерно втрое больше той, что была использована в работе [9]). Скорректировано и значение сопротивления первичной обмотки СТ, которое выбрано максимально приближенным к активному сопротивлению, измеренному на том же приборе на частоте 1 МГц\*.

Поскольку длительность импульса питания  $\Delta t$  уменьшена до  $0,06 \cdot 10^{-6}$  с, то увеличены коэффициенты передачи ПТН и МУс (сопротивления в цепи обратной связи ПТН и МУс выбраны 281 Ом и 680 Ом соответственно, а на входе МУс — 12 Ом).

Результаты моделирования семейств ФП ИЦ ( $C_1(x, y)$  и  $C_2(x, y)$ ) без учета влияния соседних лопаток ( $z_{\text{л}} \rightarrow \infty$ ) изображены на рис. 7, а на рис. 8 — влияние шага установки лопаток только на характеристики  $C_1(x)$  и  $C_2(x)$  при  $y = 0,5$  мм для  $z_{\text{л}} \rightarrow \infty$ , а также равном 32 и 26 мм. На графиках (рис. 8) видны существенные изменения кодов, связанные с влиянием соседних лопаток, которые достигают нескольких сотен единиц ( $C_1$  в сторону понижения,  $C_2$  в сторону повышения). При этом характер изменений  $C_1(x)$  изменяется с падающего на возрастающий.

В полном объеме семейство ФП ИЦ представлены на рис. 9 при  $z_{\text{л}}$ , равном 32 мм (рис. 9, а) и 26 мм (рис. 9, б), а на основе полученных здесь данных построены семейства ФВ ( $\delta C_1(x, y)$  и  $\delta C_2(x, y)$ ) соседних лопаток ( $\delta C = \frac{\Delta C}{\Delta C_{\text{max}}} \cdot 100$  %, где

$\Delta C$  — изменения кодов из-за влияния соседних лопаток при выбранном значении  $y$  (изменения  $\Delta C$  при  $y = 0,5$  мм показаны на рис. 8),  $\Delta C_{\text{max}}$  — диапазоны изменений ко-

\* Индуктивность около  $9 \cdot 10^{-6}$  Гн, активное сопротивление 17,5 Ом по экспериментальным данным при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика (по данным измерителя RLC-параметров E7-12).

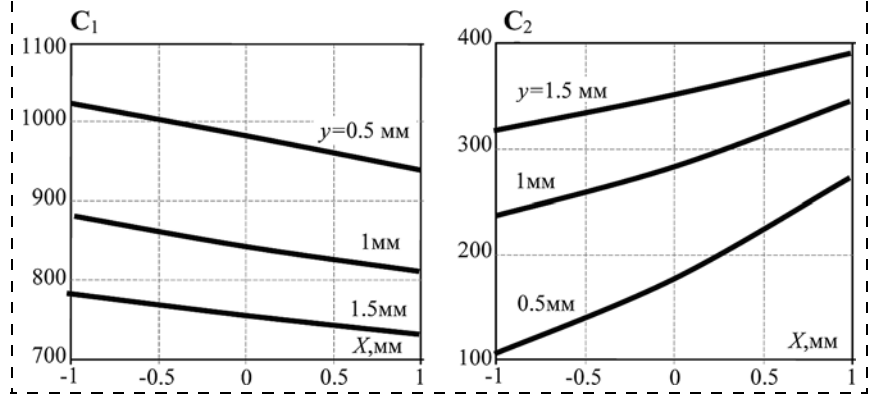


Рис. 7. Семейство ФП ИЦ ( $C_1(x, y)$ ,  $C_2(x, y)$ ) без учета влияния соседних лопаток ( $z_{\text{л}} \rightarrow \infty$ )

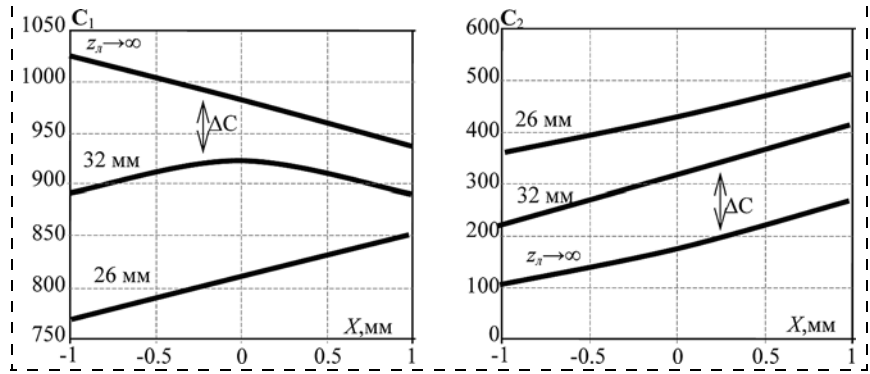


Рис. 8. Влияние шага лопаток ( $z_{\text{л}}$ ) на характеристики  $C_1(x)$  и  $C_2(x)$  при  $y = 0,5$  мм

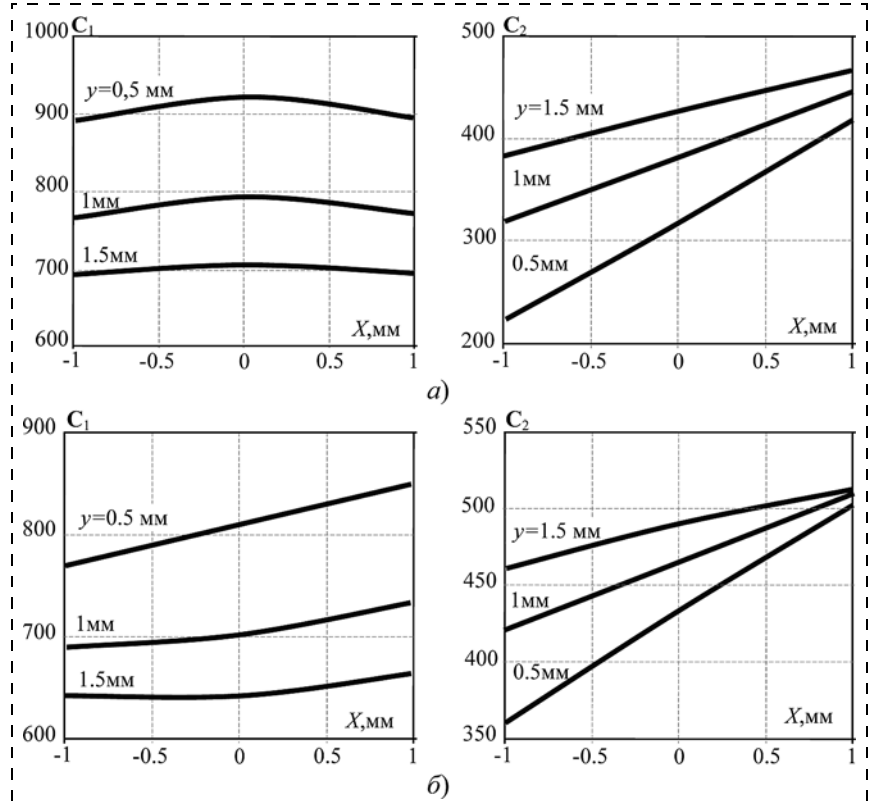


Рис. 9. Семейство ФП ИЦ ( $C_1(x, y)$ ,  $C_2(x, y)$ ) с учетом влияния соседних лопаток при  $z_{\text{л}}$ , равном 32 (а) и 26 мм (б)

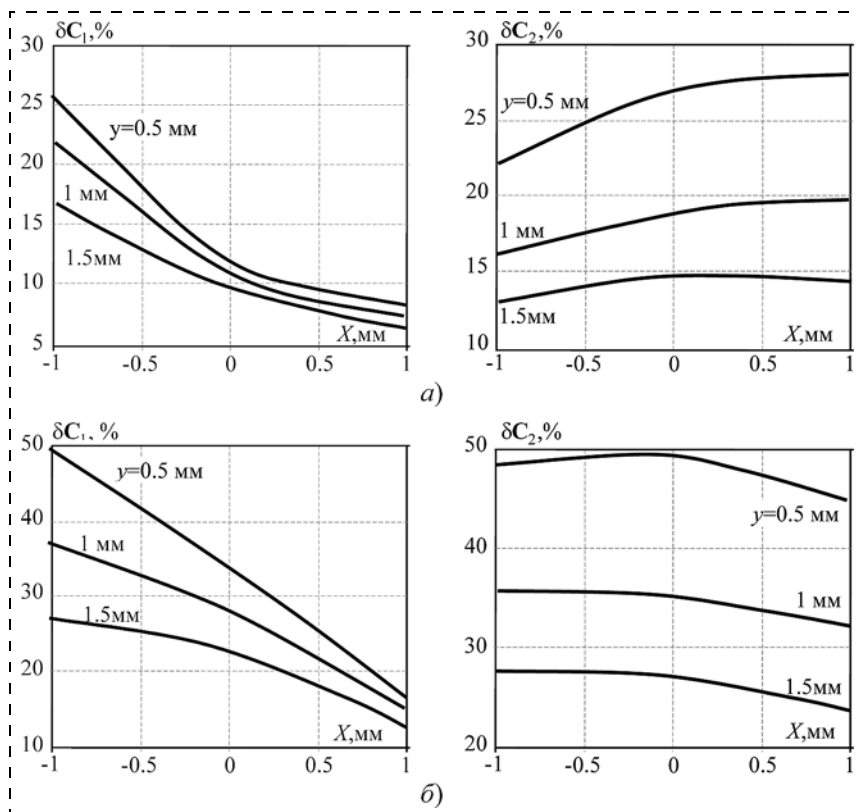


Рис. 10. ФВ соседних лопаток ( $\delta C_1(x, y)$ ,  $\delta C_2(x, y)$ ) при  $z_d$ , равном 32 (а) и 26 мм (б)

дов  $C_1$  и  $C_2$  (в рассматриваемой ИЦ  $\Delta C_{\max}$  составляет 512 единиц).

Семейства ФВ соседних лопаток изображены на рис. 10 и демонстрируют весьма значительные изменения  $\delta C_1(x, y)$  и  $\delta C_2(x, y)$ , которые достигают 50 % при шаге 26 мм. При этом следует подчеркнуть, что характер изменений ФВ определяют компенсационные ЧЭ ( $\delta C_1(x, y)$  идентичны  $\delta L_{K_{сл_2}}(x, y)$ , а  $\delta C_2(x, y)$  — соответственно  $\delta L_{K_{сл_1}}(x, y)$  ( $L_{K_{сл_1}}(x, y)$  и  $\delta L_{K_{сл_2}}(x, y)$  представлены на рис. 6)).

Возвращаясь к семействам ФП ИЦ (см. рис. 9, а), в которых учтено влияние соседних лопаток, необходимо отметить, что при  $z_d = 32$  мм наблюдается немонотонный характер  $C_1(x, y)$  и наличие экстремумов при всех значениях  $y$  (0,5; 1,0; 1,5 мм) (без учета соседних лопаток оба семейства ФП ( $C_1(x, y)$  и  $C_2(x, y)$ ) — монотонны). Это означает, что при решении системы уравнений, в которой используются семейства ФП, нельзя использовать метод секущих Ньютона и реализующие его алгоритмы [3]. Решение возможно, если воспользоваться алгоритмом, рассмотренном в работе [11].

#### Уменьшение влияния соседних лопаток

Известно, что в существующих системах измерения РЗ, в том числе в системах, реализующих кластерные методы, для вычислений текущих значений РЗ используют ФП, полученные экспериментально, т. е. ГХ [2]. Однако осуществить процедуру полу-

чения ГХ (и тем более семейств ГХ для РК ОБТД) на ЛК реальных компрессоров или турбин ГТД не представляется возможным. Поэтому для их получения применяются специальные градуировочные устройства [1], которые оснащены необходимым измерительным оборудованием, причем в каждом из них предусматривается установка одной лопатки того же типа и тех же размеров, что используется на объекте измерения. В свою очередь, в существующей методике получения ГХ предполагается, что только ЧЭ датчика, выполняющего рабочие функции, взаимодействует с торцом лопатки, а компенсационный ЧЭ расположен вне зоны взаимодействия. Иначе говоря, в существующей методике градуировки систем измерения с ОБТД на входе не учитываются влияния соседних лопаток на ЧЭ датчиков, выполняющих не только рабочие, но и компенсационные функции, и это, как уже отмечалось, может стать причиной больших погрешностей.

Несмотря на очевидный недостаток, такая методика многократно применялась в экспериментальных исследованиях компрессоров, лопатки которых имеют сравнительно малую кривизну и толщину торцевой части, а ЧЭ ориентированы "квазипараллельно" торцам лопаток, что снижает влияние соседних лопаток на компенсационный и, тем более, на рабочий ЧЭ.

Существующая методика градуировки остается в силе и в случае применения подобных систем для исследований РЗ в турбинах с лопатками сложной формы и повышенной кривизной поверхностей пера, но только при условии достаточно большого шага установки лопаток на ЛК (как было показано выше, уже при шаге 32 мм существующая методика градуировки может быть причиной погрешностей более 20 %).

В отличие от существующей, в предлагаемой методике градуировки предусмотрено использование не одной, а пяти лопаток, применяемых в реальной турбине. Лопатки устанавливаются на общем основании с тем же шагом в линейном выражении, что и на ЛК реальной турбины. В сущности, такая конструкция имитирует фрагмент ЛК, а в совокупности с элементами конструкции, позволяющими осуществлять трехкоординатное смещение "имитатора" (в направлении осей  $X, Y, Z$  системы отсчета), измерительным инструментом — индикаторами перемещений часового типа с требуемой разрешающей способностью (до 0,01 мм), а также РК из двух ОБТД, ЧЭ которых размещены в соответствии с рис. 1 по отношению к имитатору, она обеспечивает получение семейства ГХ с учетом соседних лопаток.



Сравнение результатов экспериментальных исследований, проведенных по существующей и предлагаемой методикам получения ГХ, показали эффективность последней, и это означает реальную возможность существенного уменьшения влияния соседних лопаток и связанных с ним погрешностей.

### Заключение

Разработана новая модель электромагнитного взаимодействия как рабочего ЧЭ с контролируемой и ближайшими соседними лопатками, так и компенсационного ЧЭ с ближайшими соседними лопатками. С помощью разработанной модели получены семейства ФП в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей рабочего и компенсационного ЧЭ от  $x$ ,  $y$ -координат смещений торцов лопаток сложной формы, которые далее использованы для расчета ФВ соседних лопаток при различных значениях шага установки лопаток. Показано, что влияние соседних лопаток на компенсационный ЧЭ намного больше, чем на рабочий, и возрастает с уменьшением шага их установки.

С помощью модели дифференциальной ИЦ, исходными данными для которой являются результаты моделирования электромагнитного взаимодействия рабочего и компенсационного ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками, которые представлены эквивалентными индуктивностями, изменяющимися во времени, получены семейства ФП в виде зависимостей цифровых кодов от  $x$ ,  $y$ -координат, и они использованы для расчета ФВ соседних лопаток при различных значениях шага их установки. Показано, что влияние соседних лопаток велико (десятки процентов), причем доминирующая роль принадлежит компенсационному ЧЭ.

Разработана методика получения семейства ГХ систем измерения  $x$ ,  $y$ -координат смещений торцов лопаток, основной отличительной особенностью которой является использование имитатора ЛК с несколькими лопатками из числа тех, что устанавливаются на реальном объекте. Методика позволяет в процессе градуировки учесть влияние соседних лопаток и избежать возможных погрешностей при дальнейшей эксплуатации систем.

### Список литературы

1. Donald L. Simon, Sanjay Garg, Gary W. Hunter, Ten-Huei Guo and Kenneth J. Semega. Sensor Needs for Control and Health Management of Intelligent Aircraft Engines // Proc. Of ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air. Vol. 2: Turbo Expo 2004 (Vienna, Austria, June 14–17, 2004). Vienna, 2004.
2. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Секисова Ю. Н., Скобелева О. Н. Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. 188 с.
3. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Под общ. ред. Скобелева О. П. М.: Машиностроение, 2011. 298 с.
4. Бельский Л. Б., Кутейникова М. М., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Способ измерения радиальных зазоров и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины. Патент РФ 2457432. 2012. Бюл. 21.
5. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К., Секисов О. П., Скобелев О. П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихрековых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 10. С. 38–46.
6. Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихрекового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XV Междунар. конф. Самара, 25–28 июня 2013 г. С. 627–635.
7. Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихрековых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XV Междунар. конф. Самара, 25–28 июня 2013 г. С. 636–641.
8. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Модель измерительной цепи с переменными во времени эквивалентными индуктивностями одновитковых вихрековых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XVI Междунар. конф. Самара, 30 июня–03 июля, 2014. С. 692–696.
9. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Результаты моделирования измерительных цепей с одновитковыми вихрековыми датчиками и приближенным дифференцированием // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XVI Междунар. конф. Самара, 30 июня–03 июля, 2014 г. С. 697–703.
10. Хритин А. А. Система измерения радиальных зазоров в турбомашине: дисс. канд. техн. наук: 05.11.16. Самара, 1993. 180 с.
11. Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XII Междунар. конф. Самара, 21–23 июня 2010 г. С. 323–327.

## Adjacent Blades' Effect on the Tip Clearance Measurements in Turbines

S. Yu. Borovik, borovik@iccs.ru, M. M. Kuteynikova, kuteynikova@iccs.ru,  
P. E. Podlipnov, pepodlypnov@yandex.ru, B. K. Raykov, raykov@iccs.ru,  
Yu. N. Sekisov, sekisov@iccs.ru, O. P. Skobelev, borovik@iccs.ru,  
Institute for Complex Systems Control of RAS, Samara, 443020, Russian Federation

Received on December 01, 2014

*The article investigates the blade pitch effect on the measurements of the blade tips radial and axial displacements in the turbines of the gas-turbine engines and gives a model description of the electromagnetic interaction between the work and compensating sensitive elements of the eddy-current single-coil sensors in the amount of the distributed cluster of sensors and in-*

spected and adjacent blades. By means of the developed model the families of the conversion functions as dependences of the equivalent inductances of the sensitive elements from the radial and axial displacements of the irregular shaped blades are defined. These conversion functions were later used for computation of the dominant functions of the adjacent blades at various blade pitches. The authors demonstrated that the adjacent blades effect on the compensating sensitive element is far greater than on the work of the sensitive element and it increases with the blade pitch decrease. A model of differential measuring circuit with pulsed power was considered. The inputs of this model are the modeling results of the electromagnetic interactions between the sensitive elements and the rotor blades presented as the equivalent inductances changing in time. The families of the conversion functions as dependences of the digital codes from the radial and axial displacements of controlled blades were obtained. They are used, as before, for computation of the dominant functions of the adjacent blades at various blade pitches. The method is presented for obtaining of the calibration characteristics of the systems for measurement of the blade tips' radial and axial displacements. It gives an opportunity to avoid possible errors, typical for the adjacent blades effect, during the system operation.

**Keywords:** turbine, irregular shaped blades, radial and axial displacements, eddy-current single-coil sensor, adjacent blades effect, electromagnetic interactions model, measuring circuit model, influence reduction, method for obtaining of the calibration characteristics

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 14-08-00802

For citation:

**Borovik S. Yu., Kutejnikova M. M., Podlipnov P. E., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Adjacent Blades' Effect on the Tip Clearance Measurements in Turbines, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 327–336.

DOI: 10.17587/mau.16.327-336

### References

1. **Donald L. Simon, Sanjay Garg, Gary W. Hunter, Ten-Huei Guo and Kenneth J. Semega.** Sensor Needs for Control and Health Management of Intelligent Aircraft Engines, *Proc. of ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air*, 2004, vol. 2.

2. **Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Metody i sredstva izmereniya mnogomernyx peremeshhenij e'lementov konstrukcij silovyx ustanovok* (Methods and tools for measuring of multi-dimensional displacements of power-plant constructional elements), Samara, Samarskij nauchnyj centr RAN (Samara scientific center of Russian academy of sciences), 2001, 188 p. (in Russian).

3. **Skobelev O. P.** *Klasternye metody i sredstva izmereniya deformacij statora i koordinat smeshhenij torcov lopatok i lopastej v gazo-turbinnyx dvigatelyax* (Cluster methods and tools for measuring of stator deformations and coordinates of blade tips displacements in gas-turbine engines), Moscow, Mashinostroenie, 2011, 298 p. (in Russian).

4. **Belen'kij L. B., Kutejnikova M. M., Rajkov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Sposob izmereniya radial'nyx zazorov i osevyx smeshhenij torcov lopatok rabocheho koleasa turbiny* (The method of measurement of radial clearances and axial displacements of blade tips of turbine blade wheel), Patent RF 2457432. 2012, Byul. 21 (in Russian).

5. **Borovik S. Yu., Kutejnikova M. M., Rajkov B. K., Sekisov O. P., Skobelev O. P.** *Izmerenie radial'nyx zazorov mezhdur statorom turbiny i torcami lopatok slozhnoj formy s pomoshh'yu odnovitkovyx vixretkovyx datchikov* (The measurement of radial clearances between a turbine stator and blade tips with irregular form using single-coil eddy-current sensors), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 10, pp. 38–46 (in Russian).

6. **Kutejnikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Model' e'lektromagnitnogo vzaimodejstviya chuvstvitel'nogo e'lementa odnovitkovogo vixre-tokovogo datchika s torcom lopatki slozhnoj formy* (The model of electromagnetic interactions between the sensitive element of an eddy-current single-coil sensor and irregular form blade tip), *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyx sistemax: Trudy XV Mezhdunarodnoj konferencii* (Samara, 25–28 iyunya 2013) (Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XV international

conference (Samara, June, 25–28, 2013)), Samara, 2013, pp. 627–635 (in Russian).

7. **Kutejnikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Rezul'taty modelirovaniya e'lektromagnitnogo vzaimodejstviya chuvstvitel'nyx e'lementov odnovitkovyx vixretkovyx datchikov v sostave klastera s torcom lopatki slozhnoj formy* (The modeling results of electromagnetic interactions between sensitive elements of eddy-current single-coil sensors and irregular form blade tip), *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyx sistemax: Trudy XV Mezhdunarodnoj konferencii* (Samara, 25–28 iyunya 2013). (Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XV international conference (Samara, June, 25–28, 2013)), Samara, 2013, pp. 636–641 (in Russian).

8. **Borovik S. Yu., Kutejnikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Model' izmeritel'noj cepi s peremennymi vo vremeni e'kvivalentnymi induktivnostyami odnovitkovyx vixretkovyx datchikov* (The model of differential measuring circuit with equivalent inductances (being changing in time) of eddy-current single-coil sensors), *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyx sistemax: Trudy XVI Mezhdunarodnoj konferencii* (Samara, 30 iyunya–03 iyulya, 2014). (Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XVI international conference (Samara, June, 30-July, 03, 2014)), Samara, 2014, pp. 692–696 (in Russian).

9. **Borovik S. Yu., Kutejnikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Rezul'taty modelirovaniya izmeritel'nyx cepej s odnovitkovymi vixretkovymi datchikami i priblizhonnym differencirovaniem* (The modeling results of operating of measuring circuits with eddy-current single-coil sensors and approximate differentiation), *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyx sistemax: Trudy XVI Mezhdunarodnoj konferencii* (Samara, 30 iyunya–03 iyulya, 2014). (Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XVI international conference (Samara, June, 30-July, 03, 2014)), Samara, 2014, pp. 697–703 (in Russian).

10. **Khritin A. A.** *Sistema izmereniya radial'nyx zazorov v turbomashinax: diss. hand. texn. nauk: 05.11.16.* (The system for radial clearances measurements in turbomachines: PhD thesis), Samara, 1993, 180 p. (in Russian).

11. **Kutejnikova M. M., Sekisov Yu. N.** *Algoritm vychisleniya radial'nyx i osevyx smeshhenij torcov lopatok* (The algorithm for calculation of blade tips radial clearances and axial displacements), *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyx sistemax. Trudy XII Mezhdunarodnoj konferencii* (Samara, 21–23 iyunya 2010) (Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XII international conference (Samara, June, 21–23, 2010)), Samara, 2010, pp. 323–327 (in Russian).

Corresponding author:

**Borovik Sergey Yu.**, D. Sc, Leading Researcher, Institute for Complex Systems Control of RAS, Samara, 443020, Russian Federation, e-mail: borovik@iccs.ru, phone: +7 (846) 3332677