

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.518

ВЛИЯНИЕ ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ТУРБОМАШИНЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ САМОКОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДАТЧИК

М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

Рассматривается метод измерения радиальных зазоров, в котором используется самокомпенсация температурных воздействий на одновитковый вихретоковый датчик с чувствительным элементом в виде отрезка проводника. Приведены результаты вычислительных экспериментов, полученных на модели электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента с торцами лопаток рабочего колеса компрессора и турбины. Результаты представлены количественными оценками влияния осевых смещений рабочего колеса как компрессора, так и турбины. Показано, что такое влияние возрастает почти вдвое в турбине, причем в меньшем диапазоне изменений осевых смещений, что связано с повышенной кривизной поверхности пера турбинной лопатки.

Ключевые слова: одновитковый вихретоковый датчик, метод измерения радиальных зазоров, газотурбинный двигатель, температурные воздействия на датчик, влияние осевых смещений, модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента и лопатки.

Введение

От радиальных зазоров (РЗ) между статором и торцами лопаток рабочего колеса (РК) компрессора или турбины зависят экономичность и надежность современных турбомашин и, в частности, авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Поэтому проблема измерения РЗ в тяжелейших условиях (температура свыше 1000 °С, высокая линейная скорость перемещения торцов лопаток, превышающая скорость звука, и другие мешающие факторы (МФ)) по-прежнему актуальна как при экспериментальных исследованиях ГТД в процессе их доводки в стендовых условиях, так и в процессе эксплуатации ГТД в системах управления и диагностики, где используется информация о РЗ.

В работе [1] приведено описание компьютеризированных систем, ориентированных на стендовые испытания ГТД, в которых для измерения РЗ применяются одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительными элементами в виде отрезка проводника, размещаемого непосредственно в газоздушном тракте компрессора или турбины ГТД. ЧЭ с помощью тоководов (ТВ) в виде соосных цилиндров связан с объемным витком (ОВ) согласующего трансформатора (СТ), первич-

*Марина Михайловна Кутейникова (к.т.н.), старший научный сотрудник,
Петр Евгеньевич Подлипов, младший научный сотрудник.*

ная обмотка которого включена в измерительную цепь (ИЦ). При этом ЧЭ, ТВ и ОВ СТ изготовлены из тех же жаропрочных сплавов, что и лопатки РК, обеспечивающие работоспособность ОВТД при высоких температурах. При этом для уменьшения влияния температуры на результаты измерения РЗ согласно [1] используется дополнительный ОВТД, выполняющий компенсационные функции в дифференциальной ИЦ, причем его ЧЭ находится в тех же температурных условиях, что и рабочий ОВТД, но занимает положение, в котором электромагнитного взаимодействия его ЧЭ с торцами лопаток не происходит. Недостаток такого способа связан с трудностями подбора пар температурно-идентичных ОВТД при существующей технологии их изготовления, а также необходимости выполнения дополнительного установочного отверстия в статорной оболочке.

Необходимо также отметить, что при решении задачи измерения РЗ с помощью ОВТД серьезными МФ (кроме температуры среды в газозоудном тракте) являются многомерные смещения торцов лопаток РК. В системе отсчета $OXYZ$, где точка O (начало отсчета) расположена на статоре, ось X направлена вдоль оси РК, ось Y по его радиусу, ось Z – в направлении вращения РК, искомые РЗ определяются координатой y , а МФ являются осевые смещения РК (координата x), изгиб лопатки в направлении оси Z (координата z), крутильные колебания относительно оси Y и другие. Наиболее радикальным способом устранения влияния этого вида МФ, например осевых смещений (координата x), является измерение не только искомой координаты y , но и координаты x . С увеличением числа МФ соответственно возрастает и число измеряемых координат (y, x, z, \dots).

Реализация такого способа возможна с помощью так называемых кластерных методов [2], предусматривающих применение кластера (группы) ОВТД по числу измеряемых координат, что требует выполнения соответствующего числа установочных отверстий в статорной оболочке, причем число отверстий приходится удваивать с учетом ОВТД, выполняющих компенсационные функции.

Поэтому, признавая практическую значимость кластерных методов при решении исследовательских задач, связанных с многомерными измерениями смещений торцов лопаток (в стендовых условиях), следует отметить, что их применение вряд ли возможно в процессе эксплуатации ГТД при решении задач управления и диагностики, когда число установочных отверстий предельно ограничено.

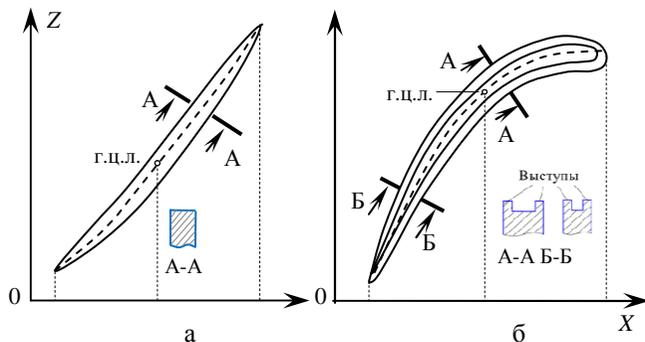
Возвращаясь к температурным воздействиям, отметим, что представляется весьма заманчивой идея их самокомпенсации, при реализации которой достаточно одного ОВТД, выполняющего как рабочие, так и компенсационные функции [3]. Метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий ориентирован на применение в системах измерения и диагностики в эксплуатационном режиме, и его краткое описание приведено в настоящей статье. Что же касается МФ в виде многомерных смещений торцов лопаток, то количественная оценка влияния осевых смещений РК как наиболее значимого МФ по степени воздействия на результаты измерения РЗ также приводится в настоящей статье. При этом такие оценки получены на модели электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ датчика с торцевой частью лопаток, применяемых как в компрессоре, так и в турбине¹ [4].

¹ Следует отметить, что согласие конструкторов ГТД на выполнение всего двух установочных отверстий для ОВТД, образующих кластер, с выполнением необходимых условий на расстояние между ними и угол разворота ЧЭ [2], а также использование самокомпенсации температурных воздействий в каждом измерительном канале позволяют избавиться от влияния обоих видов МФ, обеспечив пользователя информацией о координатах y (РЗ) и x (осевые смещения).

Метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий

Как отмечалось во введении, рассматриваемый метод ориентирован на применение в компрессорах и турбинах ГТД.

На рис. 1 представлены возможные конструктивные разновидности лопаток, применяемых в компрессоре (а) и в турбине (б) (вид со стороны статора), а также их сечения плоскостью, параллельной оси лопатки и координатной оси Y системы отсчета $OXYZ$, направленной по радиусу РК. Там же показаны геометрические центры лопаток (г.ц.л.), полученные в предположении, что изображения торцевой части обеих разновидностей лопаток находятся в плоскости ZX , а г.ц.л. определяются как точки пересечения прямых, проходящих через центры их проекций на ось X , с изображениями средних линий, показанных пунктиром.



Р и с. 1. Компрессорная (а) и турбинная (б) лопатки

На рис. 2 изображены по два положения РК компрессора и турбины относительно ЧЭ ОВТД и систем отсчета $OXYZ$, начала которых (точки 0) и ось Y совпадают с центрами ЧЭ. При этом в левой части рис. 2, а (как и в левой части рис. 2, б) положение г.ц.л. под номером 1 совпадает с центрами ЧЭ и точками 0 (положение РК I). Напротив, в правой части обоих рисунков (а, б) показаны новые положения РК II, смещенные в направлении оси Z на угол $0,5\Delta\Psi$, где $\Delta\Psi$ – шаг размещения лопаток 1, 2, ..., n_l-1 , n_l (n_l – число лопаток). В этом положении РК центры ЧЭ и точек 0 совпадают с центрами промежутков между лопатками 1 и 2.

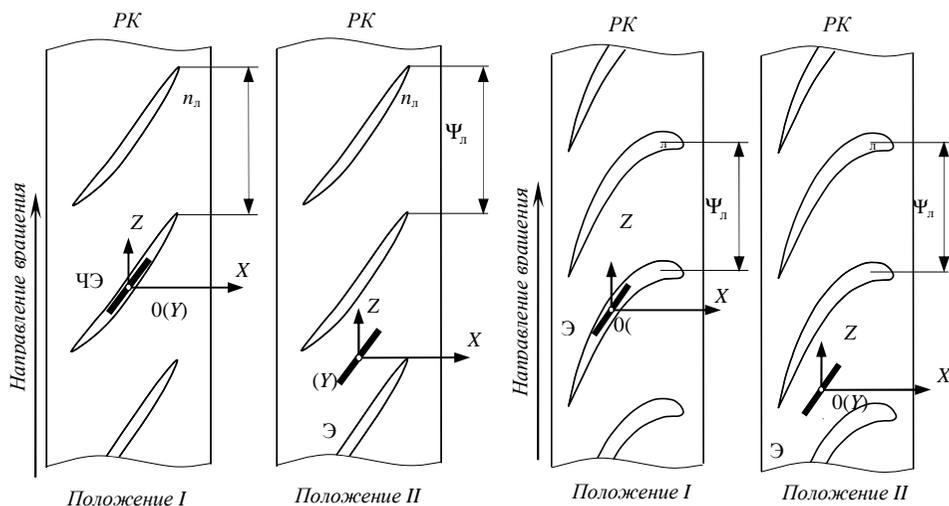


Рис. 2. Размещение ЧЭ ОВТД и системы отсчета $OXYZ$ относительно лопаток РК в компрессоре (а) и турбине (б)

Если предположить, что вращение РК происходит в нормальных температурных условиях, то эквивалентная индуктивность ЧЭ будет иметь максимально возможное значение (L_0) при совпадении центра ЧЭ (и точки 0) и центра межлопаточного промежутка. Вместе с тем при совпадении центра ЧЭ (и точки 0) с центром лопатки (положение РК I) согласно [1] индуктивность уменьшается и становится равной $L_0 - \Delta L_y$, где ΔL_y – изменение эквивалентной индуктивности, связанное с изменением координаты y (РЗ) (1).

При воздействии температуры на элементы конструкции ОВТД (и датчик в целом), как показали результаты исследований, приведенных в [5], эквивалентная индуктивность СТ и, можно считать, эквивалентная индуктивность ЧЭ возрастают на величину ΔL_Θ независимо от положения лопатки относительно ЧЭ ОВТД.

В итоге для первого (I) из двух (I и II) рассмотренных положений РК относительно ЧЭ (когда торец контролируемой лопатки находится в зоне чувствительности датчика) эквивалентную индуктивность ЧЭ можно представить в виде

$$L_{\text{ЧЭ(I)}}^3 = L_0 + \Delta L_\Theta - \Delta L_y. \quad (1)$$

Для второго положения (II) (когда в зоне чувствительности датчика торец контролируемой лопатки отсутствует) выражение (1) примет вид

$$L_{\text{ЧЭ(II)}}^3 = L_0 + \Delta L_\Theta, \quad (2)$$

где $L_{\text{ЧЭ(I)}}^3$ и $L_{\text{ЧЭ(II)}}^3$ – экстремальные значения эквивалентной индуктивности ЧЭ.

Предлагаемый метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД предусматривает фиксацию $L_{\text{ЧЭ}}^3$ в положениях I, II РК и получение разности

$$\Delta L_{\text{ЧЭ}}^3 = L_{\text{ЧЭ(II)}}^3 - L_{\text{ЧЭ(I)}}^3 = \Delta L_y, \quad (3)$$

которая не зависит от температурных воздействий на ОВТД (ΔL_Θ) и определяется только искомыми изменениями индуктивности ЧЭ (ΔL_y).

Полагая, что РК находится в процессе равномерного вращения, эквивалентную индуктивность ЧЭ можно представить в виде функции времени $L_{\text{ЧЭ}}(t)$ или координаты z - $L_{\text{ЧЭ}}(z)$ (рис. 3).

Как было показано в работе [6], из-за наличия выступов в торцевой части турбинной лопатки наблюдается эффект «двоения» минимальных значений. Поэтому информативным принято считать наименьший из двух минимумов (рис. 3, б, эпюры 1). На том же рисунке представлены результаты преобразования, полученные в соответствии с выражением (3), – экстремальное (максимальное) значение разности $\Delta L_{\text{ЧЭ}}^3$ (эпюра 2).

Как уже отмечалось, изменения эквивалентной индуктивности, связанные с температурными воздействиями непосредственно на ОВТД (ΔL_Θ), могут быть намного больше, чем изменения эквивалентной индуктивности от искомого РЗ – координаты y (ΔL_y), причем в наибольшей степени это проявляется в турбине по сравнению с компрессором, где температура в проточной части отличается почти вдвое.

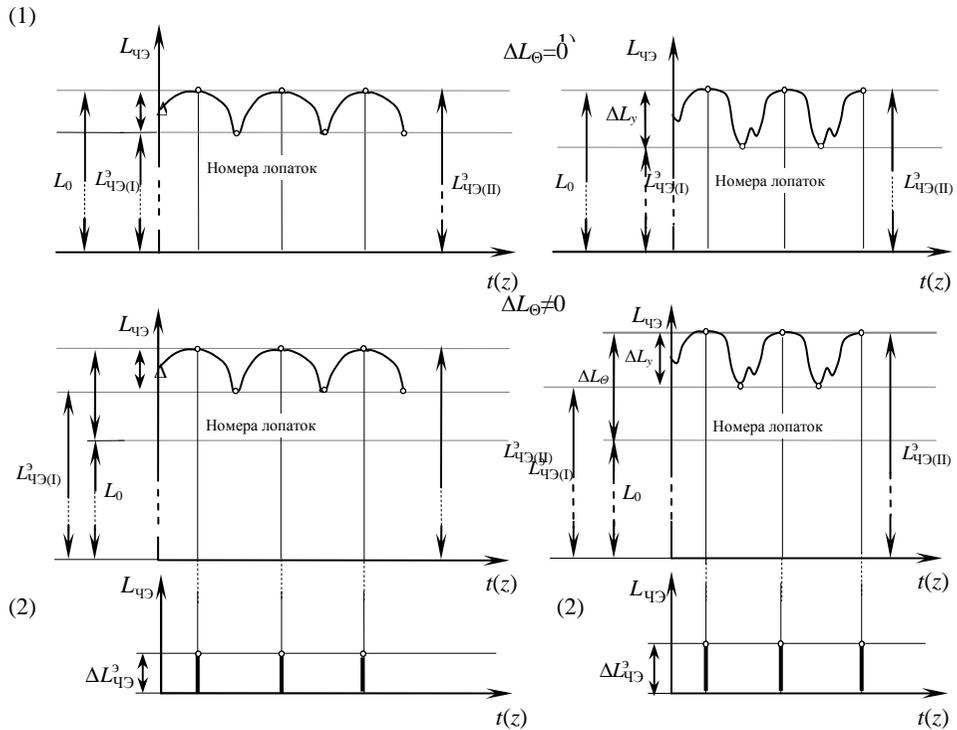


Рис. 3. Функции $L_{ЧЭ}(t)$ ($L_{ЧЭ}(z)$) при $\Delta L_\theta=0$ и $\Delta L_\theta \neq 0$ (эпюры 1) в компрессоре (а) и турбине (б), а также разности экстремальных значений этих функций (эпюры 2)

Влияние осевых смещений РК на измерения РЗ

Действительно, осевые смещения РК наблюдаются на всех ступенях компрессора (кроме одной – высокого давления) и на ступенях турбины.

Для количественной оценки влияния осевых смещений на результат измерения РЗ с помощью рассмотренного метода использовалась известная модель ЭМВ ЧЭ с торцевой частью турбинной лопатки [4]. При этом размеры лопатки и ЧЭ, а также другие параметры, необходимые для моделирования, полностью совпадают с исходными данными, которые использовались ранее [4, 7]. Кроме того, несмотря на принципиальные отличительные особенности формы торцевой части лопаток, применяемых в турбине и компрессоре, та же модель использовалась и для компрессорной лопатки упрощенной формы, близкой к прямоугольной, с малой кривизной пера и отсутствием выступов. В исходные данные были внесены изменения геометрических параметров торца лопатки (в соответствии с реальными размерами компрессорной лопатки)², а все остальные исходные данные оставались неизменными.

Результаты моделирования, полученные в предположении применения рассматриваемого метода в компрессоре с учетом размещения ЧЭ ОВТД и системы

² Для компрессорной лопатки длина хорды спинки и корыта [4, 7, 8] составила 29 мм; ширина выходной и входной кромок 2,0 мм; выступов в торцевой части лопатки нет (в модели равны нулю); степень кривизны лопатки определяется изгибом ее спинки и корыта относительно центра хорды и составляет 0,1 мм.

отсчета $OXYZ$ в г.ц.л. (в соответствии с рис. 2, *a*), представлены в виде зависимостей экстремальных значений эквивалентной индуктивности ЧЭ от координаты x при постоянных y (0,5 и 1,5 мм) (рис. 4, *a*).

Полагая, что на экстремальные значения эквивалентной индуктивности ЧЭ ($L_{\text{ЧЭ}}^3$) не оказывают влияние температурные воздействия, но происходят смещения контролируемой лопатки с изменениями координат y и x , по аналогии с выражениями (1), (2) можно записать

$$L_{\text{ЧЭ(I)}}^3 = L_0 - \Delta L_{\text{ЧЭ}(x,y)} = L_{\text{ЧЭ}\infty} - \Delta L_{\text{ЧЭ}(x,y)} \quad L_{\text{ЧЭ(II)}}^3 = L_0 = L_{\text{ЧЭ}\infty}, \quad (4)$$

где $L_{\text{ЧЭ(I)}}^3$ – результат моделирования (положение РК I), $L_{\text{ЧЭ(II)}}^3$ – результат моделирования (положение РК II), который согласно [7] определяется индуктивностью ЧЭ при $y \rightarrow \infty$ ($L_{\text{ЧЭ}\infty} = 3,657 \cdot 10^{-9}$ Гн).

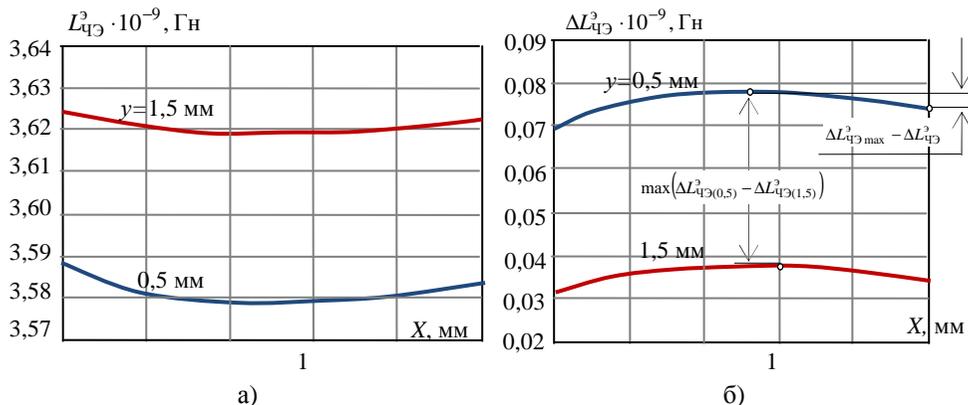


Рис. 4. Зависимости $L_{\text{ЧЭ}}^3(x)$ (*a*) и $\Delta L_{\text{ЧЭ}}^3(x)$ (*б*) при $y = \text{const}$ (0,5 и 1,5 мм).

Контролируемая лопатка – компрессорная

В соответствии с рассматриваемым методом и выражением (3) искомые изменения индуктивности ЧЭ представляются в виде

$$\Delta L_{\text{ЧЭ}}^3 = L_{\text{ЧЭ(II)}}^3 - L_{\text{ЧЭ(I)}}^3 = \Delta L_{\text{ЧЭ}(x,y)}.$$

Однако тот же результат может быть получен из выражения (4)

$$\Delta L_{\text{ЧЭ}}^3 = \Delta L_{\text{ЧЭ}(x,y)} = 3,657 \cdot 10^{-9} - L_{\text{ЧЭ(I)}}^3,$$

где результаты моделирования представлены функцией $L_{\text{ЧЭ}}^3(x, y)$ (рис. 4, *a*), т. е. $L_{\text{ЧЭ(I)}}^3$ и числовым значением в Гн индуктивности $L_{\text{ЧЭ}\infty}$.

В графическом виде $\Delta L_{\text{ЧЭ}}^3$ как функция координаты x при постоянных значениях y (0,5 и 1,5 мм) изображена на рис. 4, *б*. На ее основе получены количественные оценки функций влияния (ФВ) осевых смещений (x -координаты):

$$\delta L_{\text{ЧЭ}}^3(x) = \frac{\Delta L_{\text{ЧЭ}\max}^3 - \Delta L_{\text{ЧЭ}}^3}{\max(\Delta L_{\text{ЧЭ}(0,5)}^3 - \Delta L_{\text{ЧЭ}(1,5)}^3)} \cdot 100\%.$$

Расчеты ФВ в диапазоне изменений x от -3 мм до +3 мм показали, что применительно к компрессорной лопатке $\delta L_{\text{ЧЭ}}^3(x)$ не превышает 6 % при $y = 0,5$ мм и уменьшается до 4 % при $y = 1,5$ мм (рис. 5, *a*), но чувствительность к изменениям y -координаты (РЗ) снижается.

За указанными пределами координаты x ФВ, а следовательно, погрешности, связанные с изменениями x , возрастают.

Необходимо также подчеркнуть, что результаты экспериментальных исследований, проведенных на реально существующей компрессорной лопатке, подтвердили результаты моделирования.

Результаты моделирования, выполненного в предположении использования предлагаемого метода в турбине для размещения ЧЭ ОВТД и системы отсчета $OXYZ$ по отношению к лопаткам, как показано на рис. 2, б, показали характер изменений $L_{ЧЭ}^{\exists}(x)$ и $\Delta L_{ЧЭ}^{\exists}(x)$ при $y = const$ (0,5 и 1,5 мм) аналогичный тем же функциям, что приведены на рис. 4.

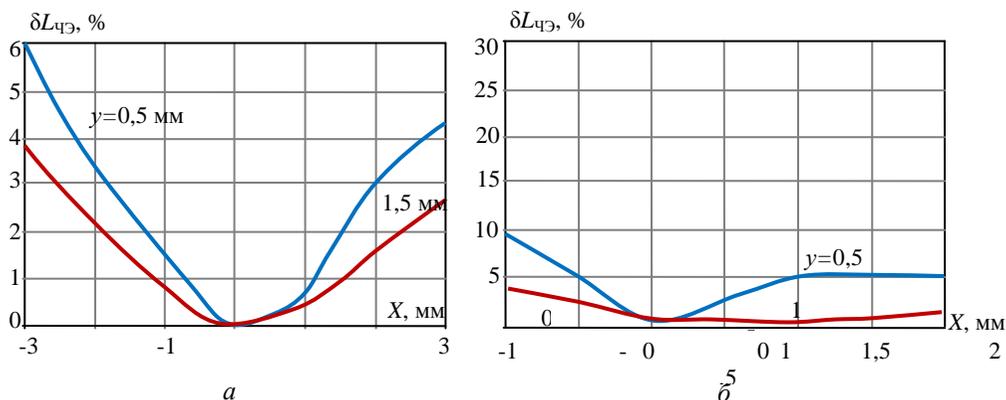


Рис. 5. Влияние осевых смещений (контролируемые лопатки – компрессорная (а) и турбинная (б))

Что же касается ФВ (рис. 5, б), то очевидная их несимметрия относительно точки $x = 0$ связана с высокой степенью кривизны боковых поверхностей спинки и корыта турбинной лопатки в ее головной части. При этом в том же диапазоне изменений x -координаты (± 3 мм) ФВ, а следовательно, погрешность возрастают почти вдвое по сравнению с компрессором (до 10 %).

Заключение

Приведено описание метода измерения РЗ, ориентированного на применение как в компрессоре, так и в турбине. Его отличительная особенность от известных методов, в которых используется ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника, – это самокомпенсация температурных воздействий на датчик в целом и его элементы конструкции. При этом благодаря самокомпенсации отпадает необходимость в дополнительном ОВТД для термокоррекции и дополнительном установочном отверстии в статорной оболочке.

С помощью ранее разработанной модели ЭМВ ЧЭ с торцами лопаток исследовано влияние осевых смещений РК. Показано, что в диапазоне изменений осевых смещений (x -координаты) от -3 до +3 мм ФВ, а следовательно, погрешности не превышают 6 % в компрессоре. Погрешности возрастают почти вдвое в турбине, причем в меньшем диапазоне изменений x – от -1 до +2 мм, что связано с повышенной кривизной спинки и корыта турбинной лопатки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.
2. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Под общ. ред. О.П. Скобелева. – М.: Машиностроение, 2011. – 298 с.
3. Патент 2587644 РФ, МПК G01В 7/14. Способ измерения радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомашин / Белоухов В.Н., Подлипов П.Е., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., -2014154334/28; Заявл. 30.12.2014; Оpubл. 20.06.2016, бюл. 17.
4. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XV Междунар. конф. / Самара: Из-во СамНЦ РАН, 2013. – С. 627–635.
5. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. [и др.]. Анализ влияния температуры на информативные параметры одновитковых вихретоковых датчиков // Автометрия. – 2017. – № 4. – С. 104–111.
6. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К. [и др.]. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Автометрия. – 2015. – № 3. – С. 104–112.
7. 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 // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XVI Междунар. конф./ Самара: Из-во СамНЦ РАН, 2013. – С. 636–641.
8. ГОСТ 23537-79 Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. – Москва: Издательство стандартов, 1979. – 33 с.

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2017 г.

INFLUENCE OF AXIAL DISPLACEMENTS OF TURBOMACHINE IMPELLER ON THE RESULTS OF MEASUREMENT OF RADIAL CLEARANCES WITH THE SELF-COMPENSATION OF TEMPERATURE IMPACT ON THE SENSOR

М.М. Kuteynikova, P.E. Podlipnov³

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

The method for measuring of radial clearance is considered. This method involves self-compensation of temperature impact on a single coil eddy-current sensor with sensitive element made as a conductor strip. The results of computational experiments based on the model of the electromagnetic interaction between an idealized sensing element of single-coil eddy current sensor with turbine and compressor blade tips are obtained. These results are given as quantitative evaluation of the influence of radial and axial displacements blades wheels in turbine and compressor. It's shown that the impact is doubled in turbines with a smaller range of variation in axial displacements. This is associated with an increase of the blade airfoil camber.

Keywords: *single-coil eddy-current sensor, method for measuring of radial clearance, gas turbine engine, temperature impact on sensor, influence of axial displacements, model of the electromagnetic interaction.*

³*Marina M. Kuteynikova (Ph.D. (Techn.)), Senior Scientist.
Petr E. Podlipnov, Scientist.*