

## Информационные технологии

УДК 681.518

### О КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК, СВЯЗАННОЙ С НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ ШАГА ИХ УСТАНОВКИ НА КОЛЕСЕ РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ<sup>1</sup>

*С.Ю. Боровик*

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

*Приведен анализ методической погрешности измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток компрессора или турбины газотурбинного двигателя с помощью кластеров одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительными элементами в виде отрезка проводника, обусловленной неравномерным шагом установки лопаток на колесе ротора турбомашин. Рассматривается метод уменьшения указанной погрешности и даются количественные оценки, подтверждающие его работоспособность и эффективность.*

**Ключевые слова:** радиальные и осевые смещения торцов лопаток, кластер одновитковых вихретоковых датчиков, неравномерный шаг установки лопаток, погрешность измерения, уменьшение погрешности.

#### Введение

Известно, что в системах сбора измерительной информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток в компрессорах и турбинах газотурбинных двигателей (ГТД) реализуются кластерные методы измерения, предусматривающие использование одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1, 2]. В соответствии с указанными методами производится предварительное измерение периода вращения лопаточного колеса ( $T_{лк}$ ) и по полученным результатам и известному числу лопаток ( $n_{л}$ ) вычисляются моменты времени, в которые подаются импульсы питания измерительной цепи<sup>2</sup>, период которых  $T_0 = T_{лк}/n_{л}$ . Последовательность импульсов питания синхронизируется с вращением лопаточного колеса с помощью «метки», расположенной на валу ГТД. Это гарантирует получение искомой измерительной информации точно в моменты прохождения основаниями (замками) лопаток определенных точек кластеров ОВТД – геометрического центра (г.ц.) сосредоточенного кластера ОВТД или г.ц. и виртуального г.ц. (в.г.ц.) распределенного кластера ОВТД [4-6].

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №11-08-01032а).

<sup>2</sup>Предусматривается применение измерительной цепи с импульсным питанием, в которой реализован метод первой производной [3].

Сергей Юрьевич Боровик (д.т.н.), ведущий научный сотрудник.

Следует отметить, что вычисление моментов подачи импульсов питания измерительной цепи, предусмотренное кластерными методами, выполняется в предположении равномерного изначального размещения на колесе оснований (замков) лопаток, что регламентируется соответствующими техническими требованиями. В то же время существует технологический допуск на установку и точность изготовления пера лопаток. Так, в соответствии с [7] точность изготовления пера лопатки находится в пределах  $\pm 0.03$  мм, а замковую часть, при помощи которой лопатки крепятся к дискам, изготавливают с точностью  $\pm 0.01 \dots \pm 0.02$  мм [8]. Кроме того, в процессе работы силовой установки в зонах концентрации напряжений замковых соединений, особенно первых ступеней, могут возникнуть пластические деформации, а также возможны нарушения формы лопатки вследствие эрозии и попадания посторонних предметов [9]. В этой связи торцевые части лопаток даже на неработающем двигателе могут оказаться на неравном расстоянии друг от друга, что может стать причиной погрешности, которую следует рассматривать как статическую составляющую методической погрешности. В работе [10] приведена методика оценки составляющей погрешности, связанной с неравномерностью шага в торцевой части лопаток, и показано, что при неравномерности шага торцов лопаток в пределах от  $-0.05$  до  $+0.05$  мм указанная составляющая погрешности может достигать 6 %.

Очевидно, что погрешности, связанные с неравномерностью шага установки лопаток, могут быть уменьшены с помощью учета в процессе опроса ОВТД конкретного углового положения каждой лопатки на контролируемом колесе ротора компрессора или турбины. Последнее достигается путем формирования специальных корректировочных таблиц. Ниже рассматривается одна из возможных реализаций метода уменьшения указанной погрешности и приводятся результаты его экспериментальной проверки на лабораторном стенде, включающем в себя реальное лопаточное колесо компрессора ГТД с регулируемым электроприводом.

### **Коррекция погрешности, связанной с неравномерным шагом установки лопаток**

Предлагаемый метод предусматривает наличие исходных данных о неравномерном шаге установки лопаток. Исходные данные могут быть получены на этапе сборки ГТД или в процессе холодной прокрутки на испытательном стенде с помощью тех же технических средств, которые используются для измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в компрессоре или в турбине ГТД в рабочем режиме [1, 2]. Однако в отличие от рабочего режима измерений предполагается, что подача импульсов питания измерительной цепи осуществляется с постоянной и максимально возможной частотой (минимально возможным периодом  $T_{0,\min}$ , который не зависит от скорости вращения лопаточного колеса (периода  $T_{\text{лр}}$ )).

Методика получения данных о неравномерности шага установки лопаток сводится к вычислению от лопатки к лопатке угловых смещений  $\Delta\psi$  реального положения ее торцевой части относительно расчетного, полученного в предположении, что все лопатки на колесе компрессора или турбины установлены равномерно. Вычисленные значения  $\Delta\psi$  для каждой лопатки ( $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2, \dots, \Delta\psi_{n\text{л}}$ ) и являются искомыми исходными данными, располагая которыми ведут расчет корректирующих интервалов времени  $\Delta T_{01}, \Delta T_{02}, \dots, \Delta T_{0n\text{л}}$ . Они определяются после вычисления угловой скорости по измеренному значению периода на пер-

вом обороте лопаточного колеса  $\omega=2\pi/T_{лк}$ . В предположении, что скорость вращения лопаточного колеса не изменяется во времени ( $\omega=const$ ), корректирующие интервалы будут определяться как  $\Delta T_{01}=\Delta\psi_1/\omega$ ,  $\Delta T_{02}=\Delta\psi_2/\omega$ , ...,  $\Delta T_{0n_l}=\Delta\psi_{n_l}/\omega$ , причем знак корректирующего интервала времени будет зависеть от знака  $\Delta\psi_1$ ,  $\Delta\psi_2$ , ...,  $\Delta\psi_{n_l}$ . Тогда скорректированные моменты прохождения замками лопаток г.ц. сосредоточенного кластера ОВТД [2, 5] можно представить в виде  $T_{01,k}=T_{01}+\Delta T_{01}$ ,  $T_{02,k}=T_{02}+\Delta T_{02}$ , ...,  $T_{0n_l,k}=T_{0n_l}+\Delta T_{0n_l}$ , где  $T_{01}=T_0=T_{лк}/n_l$ ,  $T_{02}=2T_0$ , ...,  $T_{0n_l}=n_l \cdot T_0$ . В зависимости от знака  $\Delta T_{01}$ ,  $\Delta T_{02}$ , ...,  $\Delta T_{0n_l}$  моменты  $T_{01,k}$ ,  $T_{02,k}$ , ...,  $T_{0n_l,k}$  будут опережать моменты  $T_{01}$ ,  $T_{02}$ , ...,  $T_{0n_l}$  или отставать от них. Аналогичным образом, но с учетом углового сдвига датчиков в распределенном кластере из двух ОВТД [2, 6], осуществляется коррекция моментов прохождения замками лопаток в.г.ц. распределенного кластера ОВТД ( $T_{01,k}^{(PK)}$ ,  $T_{02,k}^{(PK)}$ , ...,  $T_{0n_l,k}^{(PK)}$ ).

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма определения угловых смещений ( $\Delta\psi$ ) реальных положений торцевых частей лопаток относительно их расчетных значений.

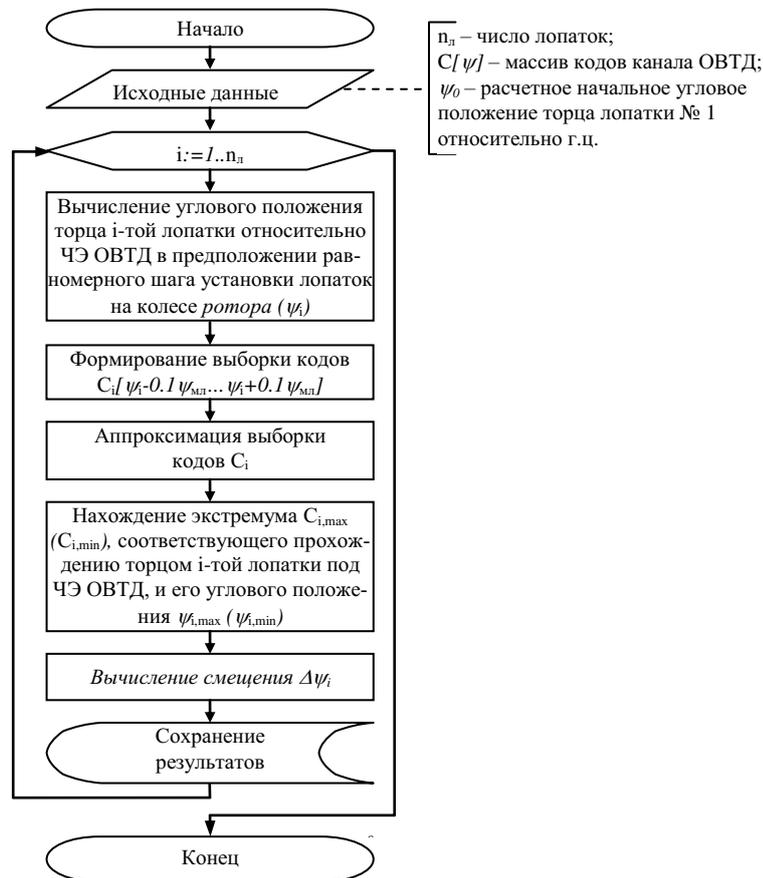


Рис. 1. Алгоритм вычисления угловых смещений реальных положений торцевых частей лопаток относительно их расчетных значений

Исходными данными (блок 2) для алгоритма являются значения числа лопаток контролируемого колеса компрессора или турбины ( $n_l$ ), массив с кодами, полученными в канале с ОВТД за один период вращения лопаточного колеса ( $S[\psi]$ ) с максимально возможной частотой опроса, а также начальное угловое смещение лопатки под номером 1 относительно г.ц. кластера ОВТД ( $\psi_0$ ).

Работа алгоритма осуществляется в цикле по всем  $n_l$  лопаткам (блоки 3–9). На первом шаге (блок 4) для каждой  $i$ -той лопатки производится расчет углового положения ее торцевой части относительно ЧЭ ОВТД в предположении о равномерном шаге установки лопаток на колесе ( $\psi_i$ ). Расчет ведется с учетом начального углового смещения  $\psi_0$ , размеров и топологии размещения ОВТД в составе кластера.

Далее (блок 5) из общего массива  $S[\psi]$  для каждой  $i$ -той лопатки формируется выборка кодов в пределах  $\psi_i \pm 0.2\psi_{мл}$  ( $\psi_{мл} = 2\pi/n_l$  – угол, соответствующий межлопаточному промежутку) в предположении, что реальное положение торца лопатки не может отличаться от своего расчетного значения более чем на 20 %. Полученная выборка аппроксимируется с помощью интерполяционных многочленов по методу наименьших квадратов (блок 6), а затем локализуются глобальные экстремумы полученной полиномиальной функции одной переменной, соответствующие моментам прохождения  $i$ -той лопаткой под ЧЭ ОВТД, и производится уточнение значений переменной и функции в точке экстремума (блок 7)<sup>3</sup>. Уточненные значения переменной  $\psi_i$  и принимаются за реальное угловое положение торцевой части  $i$ -той лопатки относительно ЧЭ ОВТД.

На завершающем этапе работы алгоритма для каждой  $i$ -той лопатки вычисляется угловое смещение реального положения ее торцевой части относительно расчетного  $\Delta\psi_i$  (блок 8) и полученные результаты сохраняются в памяти системы (блок 9).

### **Экспериментальная проверка метода коррекции погрешности**

Проверка работоспособности и эффективности предлагаемого метода коррекции погрешности проводилась в лабораторных условиях на специализированном стенде, содержащем лопаточное колесо компрессора высокого давления двигателя НК-16 со 114 лопатками и электропривод с регулируемой скоростью вращения [2]. Для получения информации об угловых положениях торцов лопаток исследуемого колеса использовались технические и программные средства системы СИ-LCE-02K(T) с распределенным кластером из двух ОВТД, предназначенной для измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в компрессоре и турбине ГТД [2, 12].

С помощью электропривода колесо компрессора раскручивалось до скорости вращения, равной 360 об/мин, которая затем поддерживалась на указанном постоянном уровне. Система измерения СИ-LCE-02K(T) запускалась в старто-стопном режиме с максимальной постоянной частотой опроса 400 кГц<sup>4</sup>. Опрос синхронизировался с периодом вращения лопаточного колеса. Результаты аналого-цифрового преобразования выходных напряжений измерительной цепи за

---

<sup>3</sup> Подробное описание алгоритма аппроксимации и поиска экстремальных значений кодов в каналах с ОВТД приведено в работе [11].

<sup>4</sup> Максимальная частота дискретизации определяется техническими возможностями входящего в состав СИ-LCE-02K(T) стандартного модуля аналого-цифрового преобразования E14-440 производства фирмы L-Card [13].

полный период вращения лопаточного колеса сохранялись на жесткий диск ПЭВМ и далее обрабатывались в специально разработанной программе, реализующей предлагаемый метод коррекции погрешности.

На рис. 2 представлены результаты определения отклонений реальных угловых положений торцов лопаток относительно их расчетных значений для первого ОВТД в составе распределенного кластера датчиков. Для второго ОВТД они аналогичны по направлению и незначительно отличаются по абсолютным значениям, что связано с неточностью задания углового сдвига датчиков в кластере.

Как видно из диаграммы, максимальные отклонения реальных угловых положений торцов лопаток от их расчетных значений могут достигать  $-0.18...+0.14$  угловых градусов ( $-1.3...+1.1$  мм в линейных единицах)<sup>5</sup>. В соответствии с градуировочными характеристиками измерительного канала системы СИ-LCE-02К(Т) с распределенным кластером из двух ОВТД [14] такая неравномерность шага торцов лопаток приводит к погрешностям до 38 %. Очевидно, что применение метода, позволяющего существенно уменьшить указанную погрешность измерения, следует признать целесообразным и эффективным.

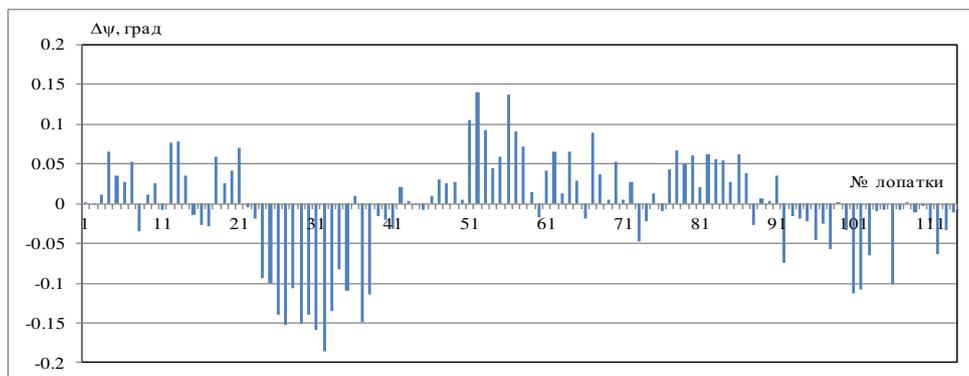


Рис. 2. Отклонения реальных угловых положений торцов лопаток относительно их расчетных значений для первого ОВТД из распределенного кластера датчиков

### Заключение

Предложен метод уменьшения методической погрешности измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток компрессора или турбины ГТД, предусматривающий коррекцию моментов опроса ОВТД с учетом неравномерного шага установки лопаток на колесе ротора турбокомпрессора. Метод обеспечивает получение данных о реальном шаге торцов лопаток в процессе холодной прокрутки контролируемого лопаточного колеса с помощью тех же технических средств, которые используются для измерения искомых смещений торцов лопаток в рабочем режиме. Проведенные в лабораторных условиях на специализиро-

<sup>5</sup> Полученные на лабораторном стенде отклонения существенно (на порядок) превышают величины, указанные во вводной части статьи. Это связано с особенностью используемого в экспериментах лопаточного колеса, которое перед установкой на стенд было снято с реального ГТД и отбраковано после попадания посторонних предметов в газоздушный тракт двигателя, что привело к существенным нарушениям формы и искривлению лопаток.

ванном стенде экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность предложенного метода.

#### 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. Скобелев О.П. Методы преобразования информации на основе тестовых переходных процессов // Измерение, контроль, автоматизация. – 1980. – № 1-2 (23-24). – С. 11-17.
4. Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Методы получения информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. VIII Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2006. – С. 232-239.
5. Бельский Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К. [и др.]. Метод получения измерительной информации о многокоординатных смещениях торцов лопастей винтовентилятора с одновременным преобразованием сигналов кластерных датчиков. Ч. 1. Обоснование предлагаемого метода и его описание // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1(23). – С. 89-94.
6. Бельский Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К. [и др.]. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Ч. 1. Обоснование предлагаемых методов и их описание // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 4. – С. 16-19.
7. Гейкин В. Совершенство двигателя определяется совершенством технологий // Двигатель. – 2003. – № 3. – С. 11-15.
8. Разработка и анализ технологического процесса обработки сопловых лопаток ТНД. – Режим доступа: <http://new.turbinist.ru/main/turbine/98-razrabotka-i-analiz-tehnologicheskogo-processa.html>. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
9. Чичков Б.А. Рабочие лопатки авиационных ГТД. Ч. 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток. – [http://airspot.ru/book/file/942/rabochije\\_lopatki\\_aviacionnyh\\_gtd.pdf](http://airspot.ru/book/file/942/rabochije_lopatki_aviacionnyh_gtd.pdf) – Яз. рус.
10. Боровик С.Ю., Скобелев О.П. Методические погрешности систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 4. – С. 31-35.
11. Белоухов В.Н., Боровик С.Ю. Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XV Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2013. – С. 650-654.
12. Боровик С.Ю. Система измерения смещений торцов лопаток с распределенным кластером однотиповых вихрековых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 4. – С. 36-41.
13. Внешние модули АЦП/ЦАП | E14-440 – Режим доступа: <http://www.lcard.ru/products/external/e-440>. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
14. Боровик С.Ю. Кластерные методы и системы измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях: Дис. ... д-ра техн. наук. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – 306 с.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2013 г.

## **ON THE ERROR CORRECTION OF MEASUREMENTS OF BLADES TIPS RADIAL AND AXIAL DISPLACEMENTS CAUSED BY IRREGULAR BLADE PITCH ON TURBOMACHINE WHEEL**

***S.Yu. Borovik***<sup>6</sup>

Institute for the Control of Complex Systems of Russian academy of sciences  
61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russian Federation

*The analysis of method error of measuring of blades tips radial and axial displacements in compressor or turbine of gas-turbine engine caused by irregular blade pitch on the turbomachine wheel (measuring methods are realized with the help of clusters of single-coil eddy-current sensors with sensitive element made as a conductor strip) is considered in the paper. The inaccuracy-reduction techniques, as well as quantitative estimates of method efficiency and reliability, are proposed too.*

**Keywords:** *blades tips radial and axial displacements, a cluster of single-coil eddy-current sensors, irregular blade pitch, measuring error, inaccuracy-reduction.*

---

<sup>6</sup>*Sergey Yurievich Borovik (Dr. Sci. (Techn.)), Leading Scientist.*