

**КЛАСТЕРНЫЕ МЕТОДЫ
И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ
РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ
В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ
ТУРБИНЫ**

ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

КЛАСТЕРНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ

Под общей редакцией
О.П. Скобелева

МОСКВА
ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
2018

УДК 621.452.3
ББК 31.16
К47



*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований по проекту №18-18-00057
Издание РФФИ не подлежит продаже*

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.П. Данильченко,
д-р техн. наук, проф. А.А. Трофимов

Авторы: В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова,
П.Е. Подлипов, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

К47 Кластерные методы и средства измерения радиальных зазоров в проточной части турбины / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова и др.; под общ. ред. О.П. Скобелева. — М.: Инновационное машиностроение, 2018. — 224 с., ил.

ISBN 978-5-907104-07-5

Приведено описание предложенных авторами кластерных методов измерения радиальных зазоров в турбине газотурбинного двигателя, предусматривающих использование новых разновидностей высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков. Исследовано электромагнитное взаимодействие чувствительного элемента такого датчика (отрезка проводника) с торцевой частью лопатки и переходные процессы в датчиках, включённых в дифференциальную измерительную цепь с импульсным питанием. Рассмотрены принципы построения системы измерения, реализующей предложенные методы, и результаты исследований возможных погрешностей. Приведено описание технических и программных средств системы, даны экспериментальные оценки её метрологических показателей и работоспособности.

Для специалистов в области измерений, разработчиков газотурбинных двигателей и систем их испытаний, диагностики и управления.

УДК 621.452.3
ББК 31.16

ISBN 978-5-907104-07-5

© Белопухов В.Н., Боровик С.Ю.,
Кутейникова М.М., Подлипов П.Е.,
Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., 2018

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами
Российской академии наук, 2018

Оглавление

| | |
|--|------------|
| Сокращения | 5 |
| Введение | 6 |
| Раздел 1. Новые разновидности высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков и кластерных методов измерения радиальных зазоров в турбинах. | 12 |
| 1.1. Высокотемпературные одновитковые вихретоковые датчики для турбины | 13 |
| 1.2. Методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток | 16 |
| 1.2.1. Метод измерения с фиксацией минимальных значений эквивалентных индуктивностей чувствительных элементов | 17 |
| 1.2.2. Метод измерения с повышенной чувствительностью к радиальным смещениям в расширенном диапазоне осевых смещений торцов лопаток | 21 |
| Заключение к разделу 1 | 24 |
| Раздел 2. Модели переходных процессов в одновитковом вихретоковом датчике при импульсном питании | 26 |
| 2.1. Модель передачи импульсного напряжения питания через согласующий трансформатор | 27 |
| 2.2. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента и лопатки | 34 |
| 2.3. Модель трансформации эквивалентной индуктивности чувствительного элемента | 48 |
| 2.4. Результаты экспериментальных исследований переходных процессов в датчике | 51 |
| 2.5. Семейства функций преобразования датчиков в составе кластера | 55 |
| Заключение к разделу 2 | 67 |
| Раздел 3. Исследования измерительных цепей | 70 |
| 3.1. Структурные схемы измерительных цепей и их функционирование | 74 |
| 3.2. Моделирование измерительных цепей | 79 |
| 3.3. Верификация результатов моделирования | 83 |
| 3.4. Результаты исследований измерительных цепей | 89 |
| 3.4.1. Изменения во времени токов и напряжений | 89 |
| 3.4.2. Семейства функций преобразования | 96 |
| Заключение к разделу 3 | 101 |
| Раздел 4. Принципы построения системы, реализующей кластерные методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине | 104 |

| | |
|---|------------|
| 4.1. Обобщенная структурно-функциональная схема системы | 104 |
| 4.2. Алгоритм предварительной обработки информации о координатах смещений торцов лопаток | 106 |
| 4.3. Алгоритмы вычисления экстремальных значений кодов | 114 |
| 4.3.1. Алгоритм вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации выборок кодов ортогональными полиномами Чебышёва I рода | 117 |
| 4.3.2. Алгоритм вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации зоны экстремума квадратичной параболой | 123 |
| 4.4. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток | 124 |
| Заключение к разделу 4 | 131 |
| Раздел 5. Погрешности системы измерения | 133 |
| 5.1. Влияние соседних лопаток и уменьшение связанных с ним погрешностей | 135 |
| 5.1.1. Исследование влияния соседних лопаток на эквивалентные индуктивности чувствительных элементов .. | 135 |
| 5.1.2. Исследование влияния соседних лопаток на выходные коды измерительной цепи | 142 |
| 5.2. Влияние температуры и уменьшение связанных с ней погрешностей | 147 |
| 5.2.1. Исследования влияния температуры на выходные коды измерительной цепи | 148 |
| 5.2.2. Погрешности измерения температуры чувствительного элемента датчика в канале термокоррекции | 164 |
| 5.3. Погрешности, связанные с изменениями частоты импульсного питания и скорости вращения | 172 |
| 5.3.1. Оценки погрешностей по экстремальным значениям кодов без использования алгоритмов аппроксимации | 174 |
| 5.3.2. Оценка погрешностей при использовании алгоритмов аппроксимации кодов | 177 |
| 5.4. Погрешность алгоритма вычисления координат x, y | 179 |
| Заклучение к разделу 5 | 186 |
| Раздел 6. Система измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток | 191 |
| 6.1. Технические средства | 191 |
| 6.2. Программное обеспечение системы | 193 |
| 6.2.1. Программное обеспечение нижнего уровня | 193 |
| 6.2.2. Программное обеспечение верхнего уровня | 194 |
| 6.3. Результаты экспериментальных исследований | 197 |
| 6.3.1. Метрологические показатели | 198 |
| 6.3.2. Оценка работоспособности | 206 |
| Заклучение к разделу 6 | 214 |
| Список литературы | 216 |