

# Модель прогнозирования натягов в рабочем колесе компрессора

Р.Р. Гинятулин  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
rustamgi@mail.ru

Е.Ю. Печенина  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
ek-ko@list.ru

В.А. Печенин  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
vadim.pechenin2015@gmail.com

**Аннотация**—Разработана модель, позволяющая прогнозировать угловые развороты лопаток в рабочем колесе при сборке, характеризующие натяги в соединениях. На входе в модель поступают данные с контрольных операций деталей. В модели используются метод случайного леса, обучение модели производилось на множестве численных экспериментов, выполненных в среде ANSYS.

**Ключевые слова**— лопатка, сборка, натяг, конечно-элементная модель, метод случайного леса

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Заданная степень повышения давления, устойчивость и надежность работы компрессора зависит от обеспечения равномерности сборочных параметров между лопатками. Равномерность натягов по антивибрационным полкам обеспечивается точностью изготовления лопаток и их сборкой. Сужение допусков на изготовление экономически не целесообразно. Существенным резервом повышения эксплуатационных показателей является улучшение технологии сборки лопаточных венцов за счет применения компьютерного моделирования и прогнозирования результирующих сборочных параметров [1].

В настоящее время существуют все возможности учитывать данные, поступающие с контрольно-измерительных операций лопаток, и на основании этих данных строить математические модели расчета натягов и производить сборку быстро и с требуемым качеством [2]. Целью исследования является построение модели расчета углов закрутки лопаток, характеризующих натяги между антивибрационными полками рабочих лопаток колеса 8 ступени компрессора, позволяющая быстро получать результаты расчетов на основании метода случайного леса [3].

## 2. РАЗРАБОТАННАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА УГЛОВ

Номинальные размеры и допуски на изготовление лопаток предполагают наличие натяга между антивибрационными полками, его величина определяется конструктором. Натяги определяются сочетанием геометрических отклонений соседних лопаток, а также геометрическими отклонениями пазов диска, в которые они вставляются. Натяги контролируются в двух сечениях угломерами (рисунок 1): измеряется угол установки лопаток  $\beta$  в свободном и собранном состояниях; разница этих углов  $\delta\beta$  представляет собой косвенную характеристику натяга в соединении.

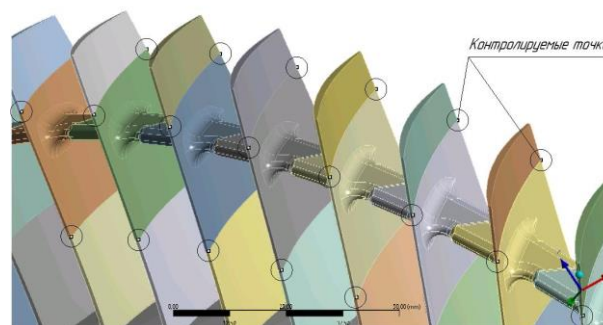


Рис. 1. Расположение контролируемых точек на пере лопаток

Разработанная модель состоит из двух подмоделей: оценка натягов в виде площадей; использование рассчитанных площадей как входных параметров в регрессионную модель оценки изменения углов установки лопаток. Для построения регрессионной модели требуется, кроме того, создание достаточной обучающей выборки, основанной на применении метода конечных элементов.

### А. Оценка натягов в виде площадей

Исходными данными, получаемыми при контроле рабочих лопаток, являются: а) фактические значения стыковых размеров по рабочим торцам антивибрационных полок лопаток; б) расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта в) углы профилей торцов полок. Ввиду контроля только параметров, находящихся в плоском сечении полки, оценка натягов была представлена как задача на плоскости.

Натяг  $G$  между двумя лопатками (со стороны корыта пера первой лопатки  $S_{p1}$  и спинки второй  $S_{s2}$ ) вычисляется по формуле:

$$G = S_{p1} + S_{s2} \quad (1)$$

Для расчета площадей натяга рассчитываются координаты точек четырехугольника, образованного пересечением линий плоского сечения антивибрационной полки с прямыми линиями со стороны корыта и спинки, ограничивающими площадь нулевого натяга. В зависимости от измеряемых параметров лопаток, вершины четырехугольника перемещаются, тем самым изменяется площади, сумма которых образует натяг из (1). Для каждой лопатки получается набор из двух таких площадей: со стороны спинки и корыта. В зависимости от положения лопаток между собой, образуется сочетание натягов.

### Б. Конечно-элементная модель в ANSYS

Расчет изменения углов установки пера можно выполнить с использованием конечно-элементных

моделей (КЭМ) в среде ANSYS. В КЭМ упрощен хвостовик и пазы диска, осуществляется сдвиг и разворот торцевых контактных плоскостей antivибрационной полки. Создание конечно-элементной модели, как отмечалось выше, выполнялось в системе ANSYS Workbench, с использованием модуля Static Structural. Этапы формирования КЭМ: 1) задание механических свойств; 2) импортирование и связка параметризованных моделей лопаток и диска; 3) задание граничных условий; 4) задание выводимых параметров в препроцессоре.

Для автоматизации задания параметров модели (геометрических отклонений, измеренных на деталях или сгенерированных) в пакете MATLAB был написан скрипт, управляющий процессом в ANSYS с помощью отправки APDL команд. Скрипт так же позволяет автоматически сохранять результаты расчетов. Исходные геометрические параметры загружаются из файла формата \*.xlsx. После расчета величины деформаций вдоль координатных осей для контрольных точек экспортируются в формате \*.txt.

#### В. Расчет углов установки лопаток

Для расчета углов  $\delta\beta$  был разработан алгоритм, реализованный в среде MATLAB. Он позволяет преобразовать деформации, полученные из КЭМ, и координаты исходных точек геометрической модели в углы установки профилей. В результате для каждой лопатки рассчитываются величины изменений углов установки профилей.

#### Г. Расчет углов установки лопаток

Расчет в КЭМ длится долго (около двух часов для комплекта из 84 лопаток), требует долгой настройки и поэтому данный расчет проблематично использовать в производстве.

Моделирование посредством ANSYS случаев сборки используется для генерации выборки, достаточной для создания регрессионной модели, в которой на входе будут значения натягов со стороны спинки и корыта лопатки (рассчитываемые по геометрической модели из раздела А), на выходе величина угла разворота. Для построения регрессионной зависимости использовались методы машинного обучения: метод опорных векторов (SVM), гребневая регрессия (KR) и случайный лес (RF). Из трех методов выбирался лучший с точки зрения получаемой в прогнозе ошибки.

#### Д. Оценка качества регрессионной модели

Оценка ошибок прогнозирования угла производится по трем критериям: доля спрогнозированных величин в пределах допустимой погрешности  $\delta$  (количество случаев, не превышающих определенный порог), среднеквадратичная ошибка  $MSE$  и коэффициент детерминированности  $R^2$ . Допустимая величина ошибки была выбрана 10 угловых минут, или 0,167 градуса.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего было проведено моделирование 147 комплектов по 84 лопатки с различными сочетаниями геометрических отклонений лопаток, для того чтобы

максимально охватить возможные случаи сборки. Обучающая выборка составила 9946 случаев, тестовая 2486 случаев. Математическое ожидание обучающей выборки  $\mu$  составило  $1,139^\circ$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  составило  $0,239^\circ$ . В таблице 1 приведены рассчитанные параметры точности прогнозирования с использованием рассмотренных методов машинного обучения для тестовой и обучающей выборки.

Таблица 1. ПАРАМЕТРЫ ТОЧНОСТИ ОБУЧЕНИЯ И ТЕСТА ДЛЯ РАЗНЫХ МОДЕЛЕЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ПРОГНОЗА

Метод	$d, \%$		$MSE$		$R^2$	
	Обучение	Текст	Обучение	Текст	Обучение	Текст
SVM	66,94	68,03	0,04	0,04	0,65	0,65
KR	64,89	65,56	0,04	0,04	0,65	0,66
RF	100	100	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$999 \times 10^{-4}$	$996 \times 10^{-4}$

Согласно полученным результатам была выбрана модель регрессии с использованием метода случайного леса, имеющего наибольший коэффициент  $R^2$ , наименьшую величину  $MSE$  и в котором ни один случай не выходит за допустимый предел погрешности.

### 4. ВЫВОДЫ

В результате исследований разработана модель, позволяющая прогнозировать натяги, возникающие из-за контакта antivибрационных полок рабочих лопаток в сборке колеса компрессора. Модель по сути является двухэтапной, сначала рассчитываются геометрические площади натягов, затем по модели регрессии, основанной на использовании метода случайного леса, с достаточной степенью точности рассчитываются изменения углов установки профилей, характеризующих натяги. Регрессионная модель позволяет заменить конечно-элементную модель, работающую долго и сложно применимую в практике. Прогнозирование ключевого сборочного натяга после контрольных операций позволяет использовать модель для проведения виртуальных расчетов сборочных состояний и подбора лучшего сочетания лопаток до фактического проведения сборок комплектов рабочих колес.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации (номер МК-2156.2022.1.6).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Samper S. Modeling of 2D and 3D assemblies taking into account form errors of plane surfaces / S. Samper, P-A. Adragna, H. Favreliere and M. Pillet // J Comput Inf Sci Eng. – 2009. – Vol. 9(2). – P. 1–12.
- [2] Zhang Z. A novel modelling method of geometric errors for precision assembly / Z. Zhang, X. Jin & Q. Zhang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 94. – P. 1139–1160.
- [3] Breiman L. Random Forests / L. Breiman // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45(1). – P. 5–32.