

Модель прогнозирования натягов в рабочем колесе компрессора

Р. Р. Гинятулин, Е. Ю. Печенина, В. А. Печенин



Рис. 1. Не прошедшее испытания рабочее колесо

Аннотация

Заданная степень повышения давления, устойчивость и надёжность работы компрессора зависит от обеспечения равномерности сборочных параметров между лопатками. В рабочем колесе компрессора 8 ступени ключевым сборочным параметром является величина натягов между антивибрационными полками лопаток. Из-за недостаточного или излишнего напряжения между лопатками, а также его неравномерности лопатка становится излишне вибронегруженной, начинает колебаться и разрушается, обломки лопаток в процессе работы двигателя разрушают остальные лопатки диска, а кроме того и лопатки нескольких дисков за ним.

Разработана модель, позволяющая прогнозировать угловые развороты лопаток в рабочем колесе, возникающие при сборке.

Таблица 1. Статистические характеристики углов $\delta\beta$

Параметр	Первый комплект			Второй комплект		
	Эксперимент	Модель	Отклонение	Эксперимент	Модель	Отклонение
Δ_{min}, \circ	1.47	1.50	0.03	1.50	1.53	0.03
Δ_{max}, \circ	0.27	0.26	0.05	0.23	0.22	0.05
μ, \circ	0.77	0.89	-0.08	1.03	1.09	-0.10
σ, \circ	2.23	2.22	0.16	2.03	2.05	0.16

1 Разработанная модель расчёта углов

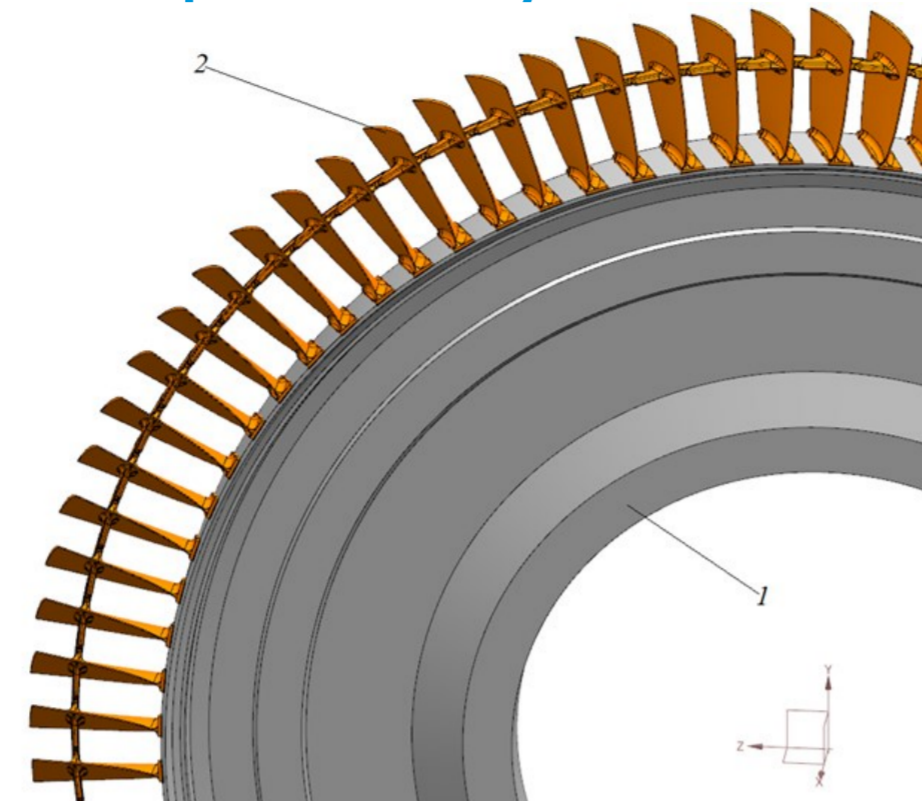


Рис. 2. Конструкторская модель рабочего колеса 8 ступени, 1 – диск; 2 – рабочая лопатка

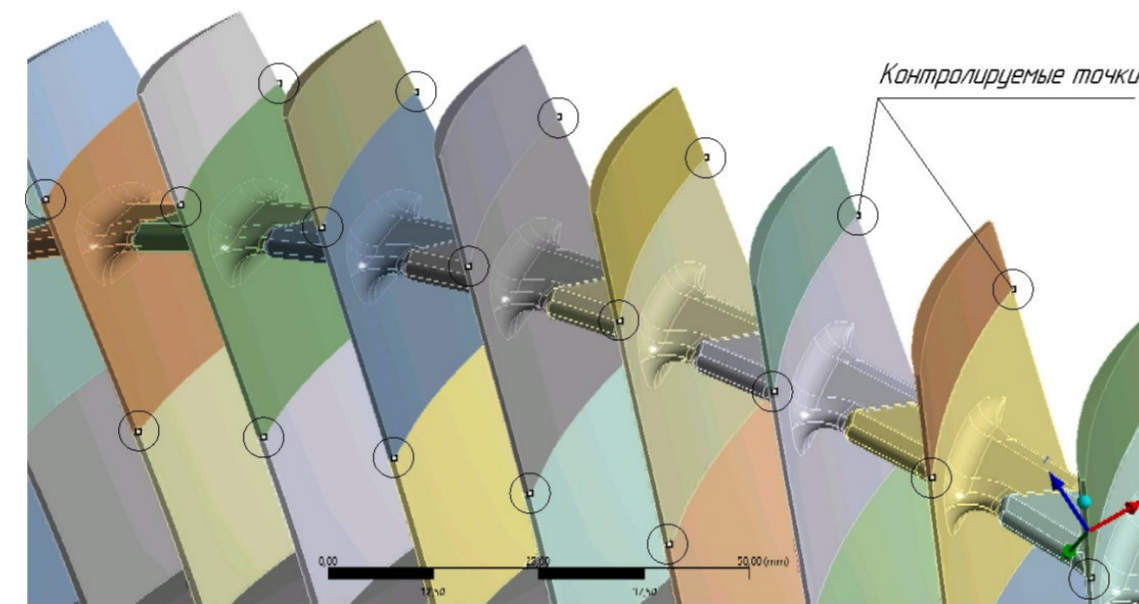


Рис. 3. Расположение контролируемых точек на пере лопаток

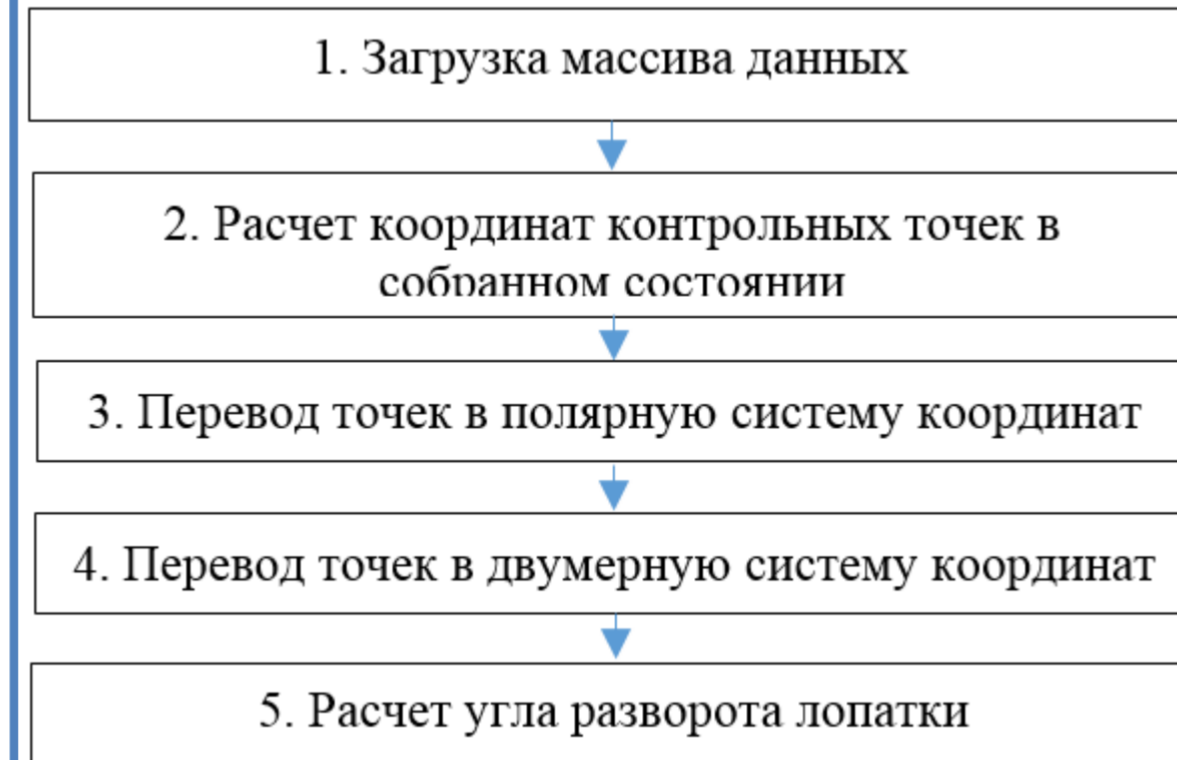


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчёта угла установки лопатки после расчёта КЭМ

Натяги определяются сочетанием геометрических отклонений соседних лопаток, а также геометрическими отклонениями пазов диска, в которые они вставляются. Натяги контролируются в двух сечениях (рисунок 2) специальными приборами – угломерами: измеряется угол установки лопаток β в свободном и собранном состояниях; разница этих углов $\delta\beta$ характеризует величину натяга в соединении.

Разработанная модель состоит из двух подмоделей: модель оценки натягов в виде площадей; регрессионная модель расчёта изменения углов установки лопаток, в которой входными параметрами являются рассчитанные площади первой подмодели. Для построения регрессионной модели требуется, кроме того, создание достаточной обучающей выборки, основанной на применении метода конечных элементов для расчёта углов.

Оценка натягов в виде площадей. Натяг G между двумя лопатками (со стороны корыта пера первой лопатки S_{p1} и спинки второй S_{s2}) вычисляется по формуле: $G = S_{p1} + S_{s2}$. Для расчёта площадей натяга рассчитываются координаты точек четырёхугольника, образованного пересечением линий плоского сечения антивибрационной полки с прямыми линиями со стороны корыта и спинки, ограничивающими площадь нулевого натяга.

Конечно-элементная модель в ANSYS. Расчёт деформаций точек контрольных сечений был выполнен с использованием конечно-элементной модели (КЭМ) в среде ANSYS Workbench с использованием модуля Static Structural.

Расчёт углов установки лопаток. Для расчёта углов $\delta\beta$ из величин координат контрольных точек был разработан алгоритм, реализованный в среде MATLAB (рис. 4). 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.

Регрессионная модель. Расчёт в КЭМ длится долго (для комплекта из 84 лопаток около двух часов на персональном компьютере с вычислительными мощностями выше среднего), требует долгой настройки и поэтому данный расчёт проблематично использовать в производстве. Для построения регрессионной зависимости, прогнозирующей углы разворота, использовались методы машинного обучения: метод опорных векторов (SVM), гребневая регрессия (KR) и случайный лес (RF).

Углы были проанализированы и проведено их статистическое обобщение, а именно вычислено минимальное Δ_{min} , максимальное Δ_{max} значение, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение. Рабочие колеса были собраны, с использованием цифрового угломера были измерены углы β до и после сборки, и соответственно их разность $\delta\beta$. В таблице 1 приведены статистические характеристики углов $\delta\beta$, полученных в эксперименте и рассчитанные с использованием модели

Выбор метода построения регрессии. Всего в ANSYS было проведено моделирование 147 комплектов по 84 лопатки в каждом с различными сочетаниями геометрических отклонений лопаток, для того чтобы максимально охватить возможные случаи сборки. Обучающая выборка для прогноза углов каждой лопатки составила 9946 случаев, тестовая 2486 случаев.

Математическое ожидание обучающей выборки μ составило $1,139^\circ$, среднеквадратическое отклонение σ составило $0,239^\circ$. В таблице 2 приведены рассчитанные параметры точности прогнозирования с использованием рассмотренных методов машинного обучения для тестовой и обучающей выборки.

Табл. 2. Параметры точности обучения и теста для разных моделей регрессии для прогноза

Метод	d, %		MSE		R ²	
	Обуч	Тест	Обуч	Тест	Обуч	Тест
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	1×10^{-4}	5×10^{-4}	999×10^{-4}	996×10^{-4}

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

2 Эксперименты и результаты

Экспериментальные исследования можно разделить на две части: апробация разработанной конечно-элементной модели, используемой для создания обучающей выборки регрессионных моделей; проведение обучения моделей регрессии и выбор лучшей.

Апробация разработанной модели в ANSYS. Используя результаты измерений лопаток для двух комплектов рабочих колёс, было выполнено моделирование их сборки с использованием разработанной конечно-элементной модели.