

Баранов Константин Денисович, аспирант,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

Горохов Андрей Сергеевич,
Соавтор, инженер-конструктор 2 категории,
Акционерное общество «Невский завод» (АО «НЗЛ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТКИ 1 СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация. Метод выявления частоты собственных колебаний лопаток газотурбинной установки, в частности осевого компрессора газовой турбины актуальна для промышленности и энергетики. Вибродиагностика позволяет выявлять критические дефекты в процессе эксплуатации турбины. Изменение частоты собственных колебаний служит диагностическим признаком наличия таких дефектов.

Ключевые слова: Частота собственных колебаний, вибродиагностика лопаток, газотурбинная установка, осевой компрессор, компрессорные лопатки.

Обеспечение надежности и безопасности работы газотурбинных установок (ГТУ) является одной из ключевых задач современной промышленности и энергетики. Одним из наиболее уязвимых элементов ГТУ являются рабочие лопатки турбины высокого давления (ТВД), а также первые ступени лопаток осевого компрессора, подвергающиеся интенсивным механическим, эрозийным и тепловым нагрузкам. Дефекты этих элементов могут привести к увеличению вибрации ротора газотурбинного двигателя, что приведет к снижению КПД турбины, увеличению расхода топлива и как следствие аварийной остановке агрегата.

В процессе работы турбины лопатки подвержены колебаниям, т.к. испытывают вибрационные нагрузки. Причиной этому может быть, как нормальная выработка, так и механические, термические, газодинамические, корреляционные процессы, которые приводят к различным дефектам лопаток.

Наличие дефектов приводит к изменению вибросостояния лопаток, поэтому параметры вибрации могут служить диагностическим признаком наличия этих дефектов.

В процессе эксплуатации турбин лопатки подвергаются механическим воздействиям, вызываемые центробежными силами, продуктами сгорания и попаданием посторонних предметов, таких как абразивные частицы и водяные капли. Эти факторы приводят к повреждениям нарушающих геометрию и механическую прочность лопаток, таких как эрозия, деформация, обрыв, забой.

Эти повреждения могут привести к снижению эффективности работы турбины и увеличению расхода топлива.

Для выявления дефектов такого рода используется модальный анализ, для определения критических частотных вибраций.

По габаритным характеристикам лопатки строится САД модель, представленная на рисунке 1.



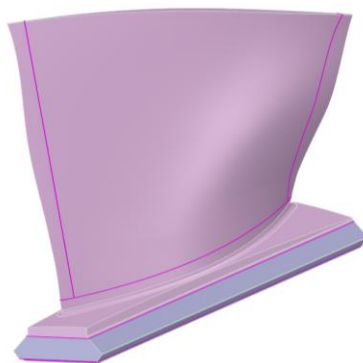


Рисунок 1. CAD модель лопатки для расчета собственных частот лопатки 1 ступни осевого компрессора

Модальный анализ учитывает только один тип воздействия, в данном случае, при моделировании применялась нагрузка в виде центробежной силы – угловой скорости, равной 780,68 рад/с, соответствующая номинальной частоте вращения ротора (вала) 7455 об/мин. Другие типы воздействия не учитывались.

Так как напряженно-деформированное состояние (НДС), является преднапряженным состоянием для модального (статического) анализа, то в расчете лопатки не рассматривался отдельно.

Строится конечно-элементная модель (сетка), которая определяет точность моделирования. Чем меньше узлов в элементе, тем точнее будет анализ.

Для выявления отклонений от нормы необходимо сначала провести анализ лопатки без дефектов. Далее из полученной исходной сеточной модели удаляются элементы, моделируя предполагаемый дефект.

На рисунке 2 представлены первые шесть форм колебаний лопатки, описывающая конкретный способ её вибрации под воздействием номинальной нагрузки - 7455 об/мин.

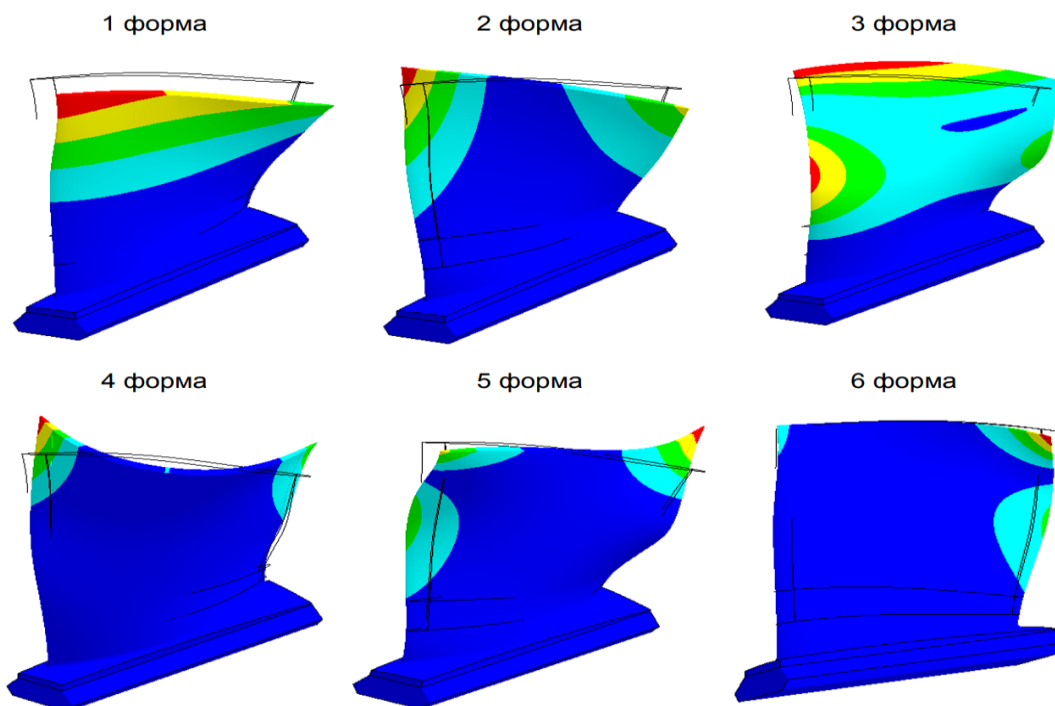


Рисунок 2 – Формы колебаний лопатки

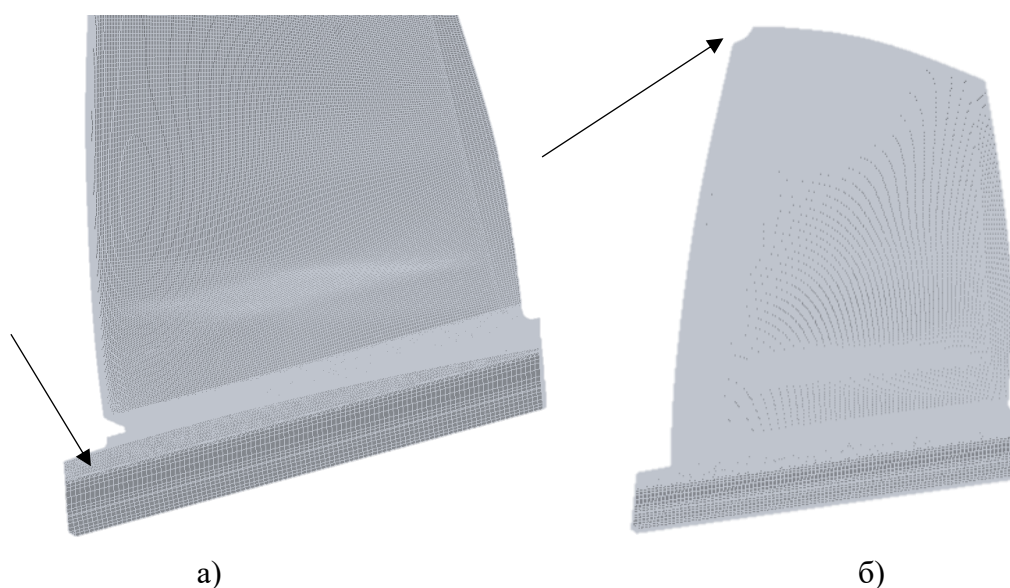


Строится таблица значений частот собственных колебаний для первых 6 форм, при заданной скорости вращения ротора, для исходной геометрии и возникающих гармоник.

Гармонические вибрации возникают в лопатке по мере прохождения вблизи лопаток статора (направляющие лопатки), расположенных неподвижно в корпусе турбины, образуя сужающиеся каналы для ускорения и направления потока. Важно учесть их частоту, т.к. на определенных оборотах вала происходит наложение частоты собственных колебаний с такой гармоникой, возникает резонанс способный повредить лопатку.

Затем строится диаграмма Кэмпбелла которая показывает резонансные процессы, которые происходят на частотах вращения ротора, на разных значениях оборотов вала турбины, выявляются точки пересечения гармоник с частотой собственных вибраций лопатки.

Размеры дефектов устанавливаются на основе типичных значений, встречающихся в практике эксплуатации. Типы дефектов в корневом и периферийном сечениях представлены на рисунках 3 и 4.



а) б)
Рисунок 3 – Скол на входной кромке лопатки:
а) в корневом сечении, б) в периферийном сечении

Локальный дефект в области периферии приводит к небольшому увеличению значения частот, тогда как дефект в зоне корня – к ее уменьшению.

Скол на периферии преимущественно снижает инерционную массу при почти неизменной изгибной жесткости, тогда как повреждение у корня уменьшает эффективную жесткость закрепления. Влияние дефекта соразмерно увеличению объема, при больших повреждениях дефекта сдвиг частоты возрастает.

Частота собственных колебаний лопаток является стабильным и информативным диагностическим параметром, чувствительным к изменению жесткости конструкции (например, при забоях или усталостных повреждениях). Сдвиг резонансной частоты даже на доли герца может служить надёжным индикатором начальных дефектов.

Список литературы:

1. Воробьев Ю.С. Особенности колебаний лопаточного аппарата ГТД с учетом распределения и локализации напряжений / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай, К.Ю. Дьяконенко, В.Н. Романенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 4/5 (40).



2. Гилев К. О. Газоперекачивающий агрегат ГПА-32 «Ладога» / К. О. Гилев, Е.В. Гузаев, Ю.В. Зуева [и др.]; под общ. ред. Ю.К. Петреня. – СПб.: Многопрофильная типография «Быстрый Цвет», 2023. – 196 с. – ISBN 978-5-6047002-1-1.

3. Мирсаитов Ф.Н. Радиолокационный метод функциональной диагностики ротора газотурбинного авиадвигателя: дис. канд. техн. наук / Ф.Н. Мирсаитов; науч. рук. В.В. Болонзнев. – Казань, 2014.

