

Исследование вибрационной напряженности лопаток 15-ступенчатого осевого компрессора

М. Е. Колотников, С. А. Иванов – АО «РЭПХ»
 С. Ю. Данилкин, Д. А. Редькин,
 В. А. Телешев – ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»
 П. В. Макаров – ПК «Салют» АО «ОДК»

Для вновь проектируемого в АО «РЭПХ» компрессора требовался анализ динамической напряженности лопаточного аппарата во всем рабочем диапазоне. Уровень действующих вибрационных напряжений и спектра собственных частот колебаний компрессорных лопаток в рабочих условиях определялся методом тензометрирования.

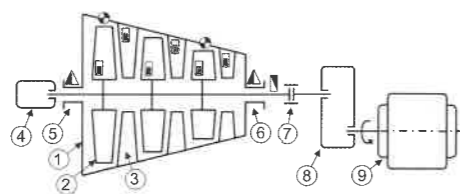
Осевой компрессор предназначен для подачи атмосферного воздуха в наземные стационарные установки различного назначения. Вибронапряжения в лопатках реальных турбомашин зависят от ряда конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, и в уровне напряжений даже для лопаток одной ступени могут быть заметные различия, что вызвано разбросом (в пределах принятых допусков) геометрических размеров лопаток, различным уровнем конструкционного демпфирования колебаний лопаток в ступени и рядом других причин.

Расчетный анализ

Исследование собственных частот и форм колебаний, а также распределения относительных напряжений при колебаниях по этим

формам рабочих и направляющих лопаток компрессора (рис. 1) выполнялись с помощью вычислительного комплекса ANSYS 19.1. Выборочные результаты модального анализа лопаток 1–3 ступеней показаны на рис. 2. Формы колебаний названы условно, исходя из положения узловых линий на поверхности профильной части лопатки.

Собственные частоты рабочих лопаток, полученные расчетным (F_p) и экспериментальным путем (F_s), представлены в табл. 1. Экспериментальные значения собственных частот при колебаниях по первой изгибной форме были получены замером после сборки лопаток в роторе компрессора с окружающим натягом и окончательной обработки по формулярной высоте. Расчетные значения собственных частот имели удовлетворительную корреляцию с замеренными частотами изготовленных лопаток.



- ▲ – датчик частоты вращения вала компрессора;
- – тензорезистор;
- – датчик пульсаций статического давления;
- ▲ – датчики абсолютной вибрации, установленные в вертикальном и горизонтальном направлении.

Рис. 1. Структурная схема объекта испытаний. 1 – осевой 15-ступенчатый компрессор; 2 – рабочие лопатки; 3 – статорные лопатки; 4 – токозъемник «Агат-Л48»; 5 – опорно-упорный подшипник; 6 – опорный подшипник; 7 – муфта; 8 – мультипликатор; 9 – электродвигатель

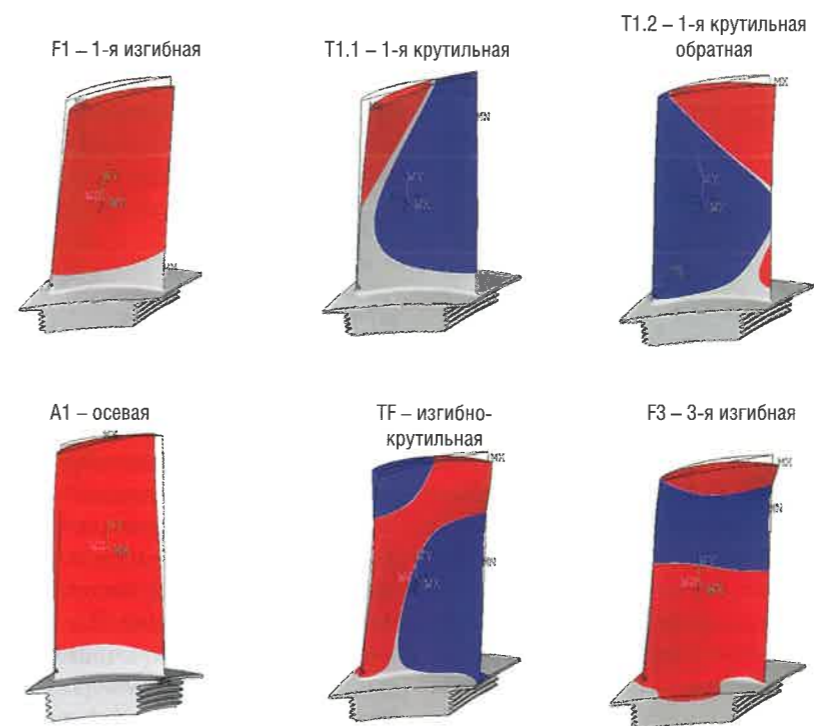


Рис. 2. Формы колебаний рабочих лопаток 1–3 ступеней

Номер ступени	1	2	3	4	5	6	7	8
F_p , Гц	305–318	343–355	396–402	312–320	350–366	400–411	461–475	512–527
F_s , Гц	313	351	399	316	357	408	470	520
Номер ступени	9	10	11	12	13	14	15	
F_p , Гц	563–585	535–547	588–608	647–664	718–745	818–833	902–933	
F_s , Гц	576	537	600	654	727	813	925	

* рабочие лопатки всех ступеней выполнены из стали 20X13

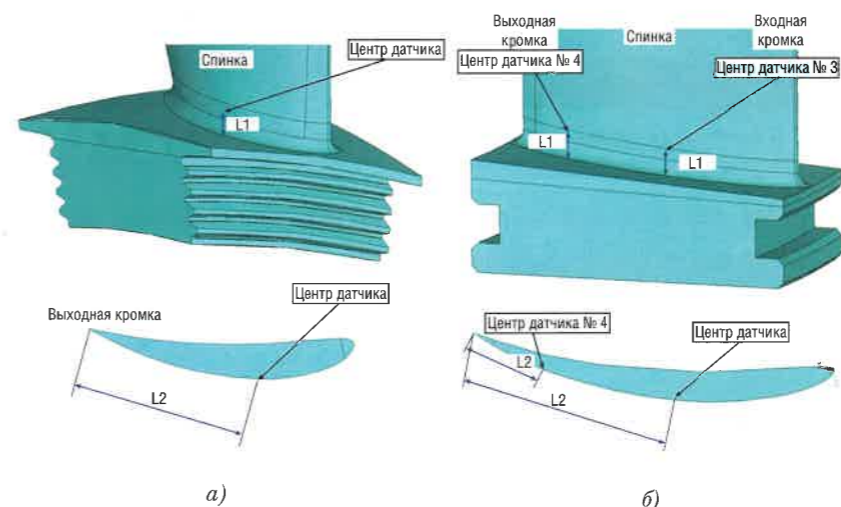


Рис. 3. Схема установки тензорезисторов: а) лопатки ротора; б) лопатки статора

Препарирование объекта испытаний

Места наклейки тензорезисторов были определены с учетом результатов расчетных исследований. При проведении препарирования положение датчика выбиралось в том месте, где можно наклеить датчик в зоне максимальной чувствительности. Для регистрации каждой формы колебаний лопатки в ступени предусматривался отдельный тензорезистор.

Пример полученной на основании расчетов схемы установки тензорезисторов на рабочих и направляющих лопатках показан на рис. 3.

Ротор исследуемого компрессора представляет собой сплошной цельнокованный вал, что обуславливало сложность его подготовки для препарирования. Трассировка измерительных каналов от каждого тензорезистора выполнялась по поверхности ротора. Перед первой ступенью компрессора собранные жгуты проводов через наклонные радиальные отверстия проводились в центральное отверстие, просверленное по оси ротора (рис. 4, 5).

Препарирование ротора было выполнено силами специалистов ПК «Салют» АО «ОДК». Следует отметить высокое качество работ по подготовке ротора, о чем свидетельствует тот факт, что в процессе испытаний из строя вышло менее 1 % всех установленных на лопатках тензорезисторов.

Для исследования вибронпряженного состояния лопаток компрессора на испытательном стенде была смонтирована информационно-измерительная система (ИИС) для измерения и анализа в темпе эксперимента динамических напряжений в лопатках и система регистрации и анализа динамических сигналов с высокочастотных датчиков пульсаций давления (рис. 1). Для передачи сигналов динамических напряжений рабочих лопаток применялась бесконтактная контрольно-измерительная система СКИ «Агат-Л48», изготовленная компанией COMELPRO SRL. Для регистрации возможных



Рис. 4. Схема трассировки измерительных каналов по ротору компрессора



Рис. 5. Подготовка ротора компрессора к тензометрированию

нерезонансных колебаний (вращающегося срыва потока или автоколебаний) на статор компрессора была установлена ИИС пульсаций давления, которая включала в себя регистратор-анализатор МС-355, согласующие усилители-преобразователи для пьезорезистивных датчиков, специальные соединительные кабели и высокочастотные датчики пульсаций давления фирмы Kulite.

Экспериментальные исследования

Тензометрирование лопаток ротора и статора осевого компрессора проводилось во всем диапазоне частот вращения ротора от запуска агрегата до достижения максимальной разгонной частоты вращения. Напорные характеристики регулировались при помощи заслонок, установленных на нагнетании компрессора, и исследовались практически до границы помпажа.

При проведении испытаний осуществлялась синхронная регистрация всех сигналов с тензорезисторов (рис. 6), установленных на рабочих и направляющих лопатках, а также сигналы с датчиков пульсаций стати-



Данный массив размножен в окружном направлении до 7 групп (т. е. 28 отверстий в сумме)

ческого давления и датчика частоты вращения.

Анализ результатов тензометрирования рабочих лопаток на режимах исследования газодинамических параметров компрессора позволял выявить сильное влияние регулирования задвижек (на входе и выходе из компрессора) на уровень вибрационных напряжений в лопатках направляющих аппаратов. На рис. 7 показаны осциллограммы сигналов с тензодатчика в моменты времени до и после регулирования задвижек. На этом режиме в спектре пульсаций давления преобладают спектральные составляющие с частотами следования рабочих лопаток, при этом составляющих с частотами, не кратными частоте вращения ротора, не обнаружено.



Рис. 6. Мониторы системы регистрации сигналов динамических процессов

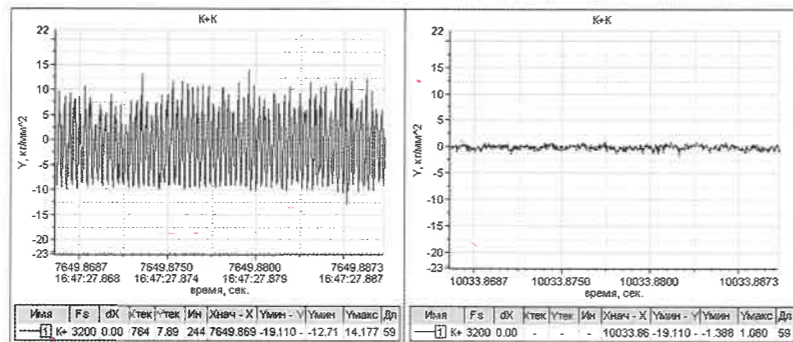


Рис. 7. Изменение вибрационных напряжений в лопатке направляющего аппарата при регулировании перепадом давления (до и после регулирования задвижек)

При оценке вибронапряженного состояния лопаток были определены значения вибронапряжений σ_v с помощью коэффициента пересчета измеренных вибронапряжений (K_F), учитывающего температуру исследуемой ступени, и коэффициента пересчета вибронапряжений (K_I) от места расположения тензорезистора к месту максимальных вибронапряжений в лопатке. По результатам подробного исследования вибронапряженного состояния лопаток компрессора на различных режимах были построены резонансные диаграммы с результатами тензометрирования лопаток ротора и статора для различных пороговых значений σ_v и выделены диапазоны режимов с учетом разброса частотных характеристик (рис. 8, 9).

С учетом полученных результатов были определены частоты вращения ротора для использования на основном рабочем режиме компрессора, а также на проходных режимах работы, на которых не допускается длительная наработка.

Выводы

Исследование лопаточного аппарата осевого компрессора с применением тензометрирования и бесконтактной диагностики опасных динамических процессов по датчикам пульсаций статического давления позволило получить объективную и достоверную картину динамической напряженности лопаток на всех возможных режимах эксплуатации агрегата.

На всех исследованных режимах испытаний компрессора, включая предпомпажные, признаков вращающегося срыва потока и автоколебаний лопаток не обнаружено. Все зафиксированные колебания рабочих и направляющих лопаток носили резонансный характер.

В результате проведенных исследований определены наиболее критические частоты вращения ротора компрессора, которые рекомендуется использовать как проходные (не допускать на этих режимах длительную наработку), а также определены частоты вращения, рекомендуемые для использования на основном рабочем режиме компрессора.

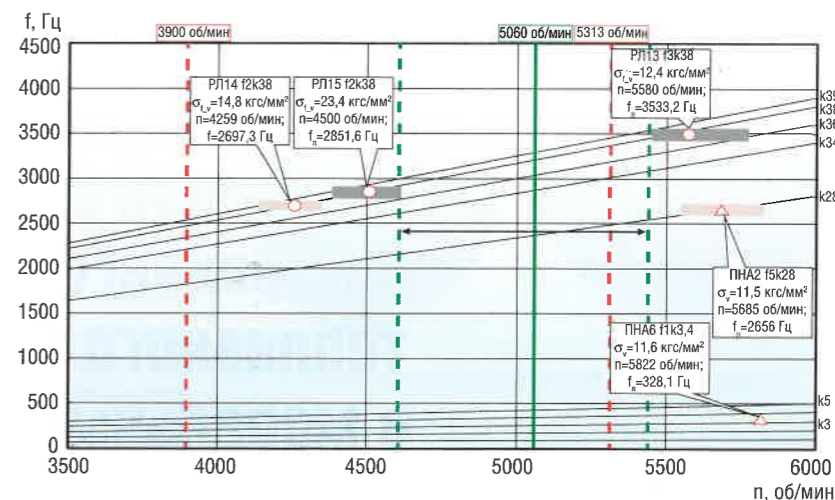


Рис. 8. Диаграмма Кэмпбелла ($\sigma_v > 10 \text{ кгс/мм}^2$)

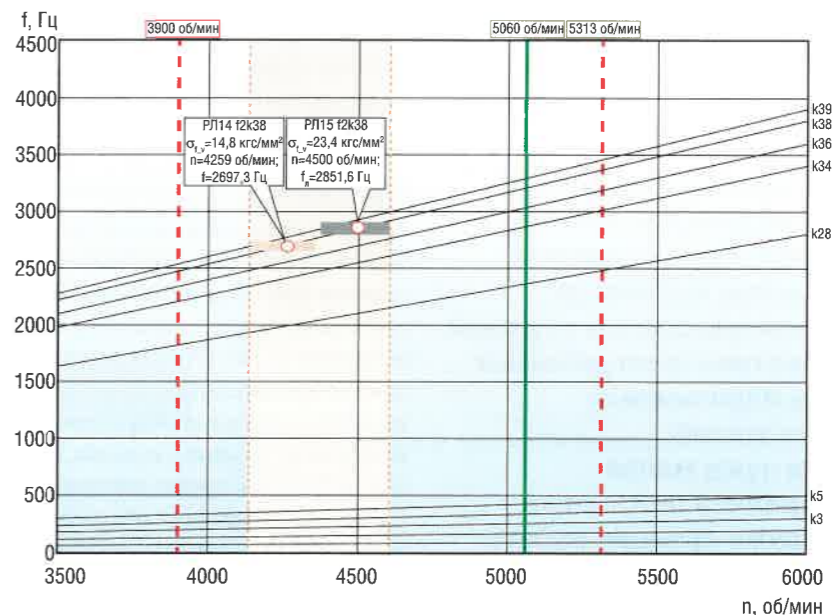


Рис. 9. Диаграмма Кэмпбелла ($\sigma_v > 12,5 \text{ кгс/мм}^2$)



«Дизельспервис» проведет обслуживание ГТЭС-2,5 на Ковыктинском месторождении

Специалисты ООО «Дизельспервис» прибыли на Ковыктинское газоконденсатное месторождение для проведения технического обслуживания газотурбинных электростанций ГТЭС-2,5 блочно-модульной газотурбинной теплоэлектростанции электрической мощностью 2,5 МВт на основе газовой турбины ДО49Р разработки ОАО «НПО «Сатурн».

Договор с заказчиком – «Газпром добыча Иркутск» предусматривает регулярное техническое обслуживание газотурбинных электростанций на Ковыктинском ГКМ на протяжении ближайших двух лет.

По словам руководителя проекта Евгения Белоедова, заключенный договор свидетельствует о возросшей компетенции специалистов компании в сфере ремонта и технического обслуживания газотурбинных электростанций украинского и отечественного производства. Ремонтно-производственная база предприятия позволяет одновременно обслуживать ГТД различных производителей.