

УДК 629.7.036:539.4

О. Н. Бабенко, Т. И. Прибора

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

Рассмотрены особенности новых технических решений повышения надежности наиболее нагруженных деталей — рабочих лопаток компрессора. Наиболее уязвимой является входная кромка на лопатках I-й ступени компрессора АД. Причиной зарождения трещин усталости на лопатках компрессора являются повышенные вибрационные напряжения. Рассмотрены варианты формообразования пера в пределах допустимых отклонений основных размеров

Ключевые слова: *вибросоставные характеристики, демпфирующие свойства лопаток, частоты собственных колебаний, модальный анализ, численный метод.*

Введение

Повышение эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей: энерговооруженности, ресурса, надежности, снижение стоимости их серийного производства и ремонта, является одной из важнейших задач авиадвигателестроения.

Развитие авиационных двигателей связано с усложнением конструкции изделий, оптимизацией запасов прочности. Это в свою очередь требует изыскания новых технических решений повышения надежности наиболее нагруженных деталей — рабочих лопаток компрессора, определяющих ресурс авиационных двигателей.

Формулирование проблемы

С ростом наработки двигателей при различных условиях эксплуатации, влияющих на состояние воздушного потока, происходит изменение геометрических параметров и качества поверхности пера рабочих лопаток компрессора, что существенно влияет на их вибросоставные характеристики, выносливость и демпфирующие свойства, а соответственно и на запас прочности.

При этом, главной причиной разрушения по-прежнему остается наличие резонансных явлений в диапазоне частот собственных колебаний лопаток. Это приводит к необходимости смещения частот в безопасную область, путем ручной доработки пера лопаток на завершающем этапе технологического процесса с повторным частотным контролем по всем «опасным» формам колебаний.

В итоге, значительно повышается трудоемкость обработки, искажается геометрия профиля пера и снижается качество поверхности после финишных операций; появляется большое количество (до 30...40 %) неисправимого несоответствия по

частотам (если регулируемые размеры пера лопатки приближаются к минимальным предельным, т. е. отсутствует припуск на доработку). Решение задачи осложняется при отстройке лопаток по нескольким формам колебаний, что в значительной мере повышает актуальность исследований.

Решение проблемы

Анализ отказов ГТД в процессе эксплуатации показывает, что большинство разрушений лопаток компрессоров имеет усталостный характер, поэтому проблема обеспечения их несущей способности имеет важное значение в связи с ужесточающимися условиями работы и режимами эксплуатационной нагруженности.

Лопатки осевого компрессора являются первыми движущимися деталями, которые встречаются с посторонним телом, попавшим во входное устройство двигателя. Так как каждый следующий за рабочим колесом ряд направляющих лопаток неподвижен и препятствует движению посторонних частиц, которое сообщается им потоком воздуха и рабочими лопатками, то в многоступенчатом компрессоре повреждения наносятся многим лопаткам. Большая чувствительность осевого компрессора к повреждениям от попадания посторонних тел определяется в основном наличием у лопаток тонких входных и выходных кромок. Лопатки изготовлены из титановых сплавов, поэтому появление поврежденной поверхности пера или кромок лопатки в виде забоин, рисок, увеличивающих уровень локальных вибронпряжений (за счет появления резкого концентратора напряжений) повышает вероятность их разрушения от усталости (рис. 1).

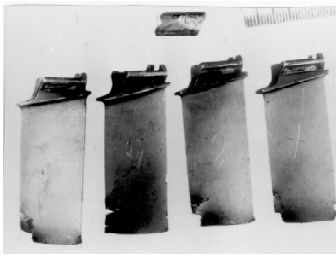


Рис. 1. Лопатки I-й ступени КВД двигателя Д-36 с повреждениями пера

Результаты исследования и анализ материалов по поломкам лопаток на разных типах двигателей свидетельствуют о том, что причиной зарождения и развития трещин усталости на лопатках компрессора являются повышенные вибрационные напряжения от высокочастотных форм колебаний на рабочих режимах двигателя.

Эрозионное повреждение на поверхности пера лопаток может быть вызвано песком, пылью, частицами воды и т. п. Можно утверждать, что наиболее уязвимой является входная кромка на лопатках I-й ступени компрессора АД.

Проведенный анализ показал, что в эксплуатации разрушения лопаток от усталости происходят из-за повреждений при соударении с посторонними предметами, а также вызванных эро-

зионными процессами. При этом имеют место случаи разрушений от усталости из-за наличия технологических дефектов. Следует отметить, что наиболее слабым местом на лопатках двигателей Д-36 является входная кромка.

С целью повышения ресурса рабочих лопаток компрессора проведено изменение частотных характеристик лопаток. Для определения диапазона возможного регулирования частоты собственных колебаний технологическими методами, были рассмотрены варианты формообразования пера (рис. 2) в пределах допустимых отклонений основных размеров $C_{вх}$, $C_{вых}$, $C_{мах}$, B .

Числовые значения частот собственных колебаний, рассчитанных для выше перечисленных форм пера лопатки представлены в табл. 1 [1].

Известно, что частоты собственных колебаний лопаток с увеличением наработкой смещаются в правую резонансно опасную область, так как у периферии лопатка становится тоньше, чем в прикомлевой зоне. Этот факт является основой выбора геометрии пера.

Средние арифметические значения частот комплекта новых лопаток были взяты из протоколов измерений рабочих лопаток I-й ступени КВД

$f_1 = 335,69$ Гц – частота 1 изгибной формы собственных колебаний лопатки;

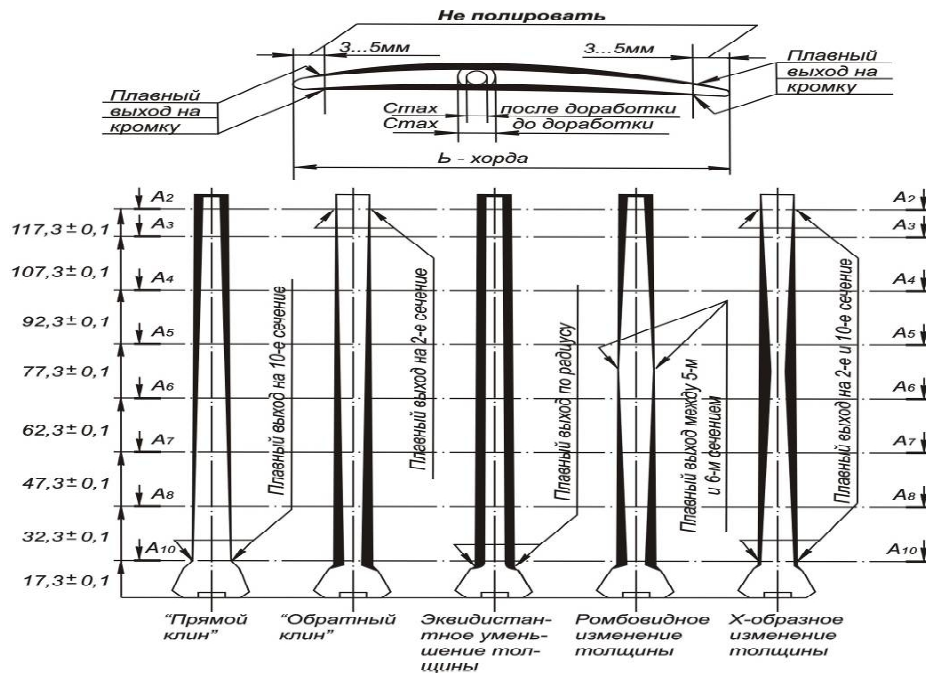


Рис. 2. Варианты формообразования пера в пределах допустимых отклонений основных размеров:

- «Прямой клин» – уменьшение параметров геометрии к периферии пера;
- «Обратный клин» – уменьшение параметров геометрии к прикомлевой части пера;
- «Эквидистантная форма» – постоянная величина параметров геометрии по всей длине пера по среднему значению допуска;
- «X-образная форма» – при этой форме максимальные параметры геометрии пера у прикомлевой и периферийной части, а минимальные в средних сечениях;
- «Ромбовидная форма» – при этой форме минимальные параметры геометрии пера у прикомлевой и периферийной части, а в средних сечениях максимальные

f_2 – 1113,35 Гц – частота 1 крутильной формы собственных колебаний лопатки;

f_3 – 1502,69 Гц – частота 2 изгибной формы собственных колебаний лопатки.

Таблица 1 – Рассчитанные значения частот лопаток с целенаправленно измененной геометрией

Форма пера	Частоты собственных колебаний		
	f_1	f_2	f_3
Прямой клин	366,40	1129,74	1590,47
Обратный клин	338,69	1112,11	1515,98
Эквидистантная форма	352,30	1122,13	1554,83
X-образная форма	339,47	1088,69	1506,22
Ромбовидная	361,88	1153,05	1598,82

Кроме расчетного метода определения частот собственных колебаний, для комплекта рабочих лопаток 1 ступени КНД проведены виброчастотные исследования. Лопатки проверялись на три частоты собственных колебаний: первую изгибную, вторую изгибную, первую крутильную (рис. 3) [1].

Процесс измерения частот собственных колебаний происходил следующим образом.

Для данной лопатки подбирается «гнездо» для закрепления первой хвостовиком в установке. Стабильность силы зажима проверяется установкой по рассеянию резонансных частот эталонных лопаток и определяется поправочный коэффициент. Для измерения первой изгибной, второй изгибной и первой крутильной частот устанавливаются границы, в которых они должны быть. Соответственно 330...350 Гц – первой изгибной, 1000...1200 Гц – второй изгибной и 1400...1500 Гц – первой крутильной. После закрепления лопатки на панели установки нажимается кнопка обнуления показаний.

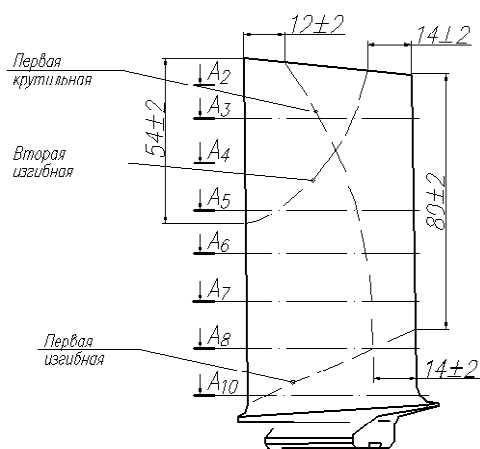


Рис. 3. Схема расположения узлов колебаний лопаток определяющих частоты собственных колебаний

Колебания лопатке придают медиатором вручную. И чем выше частота, тем большее усилие необходимо приложить медиатором на перо. Через микрофон, установленный вблизи лопатки, фиксируется частота собственных колебаний, которой соответствует резонансная (с наибольшей амплитудой) колебания. Допускается поправка до 1 Гц, которая проверяется на трех контрольных лопатках с наименьшей, наибольшей и средней частотами собственных колебаний.

Для подтверждения полученных расчетных и измеренных экспериментально величин частот собственных колебаний рабочей лопатки 1 ступени КНД двигателя Д-36, проведен модальный анализ численным методом с использованием программного комплекса ANSYS [2, 3].

Для выполнения расчетов, были построены твердотельные модели исследуемой рабочей лопатки (рис. 4) с профилями пера: исходный, «прямой клин», «обратный клин», «эквидистантная форма», «ромбовидная форма», «X-образная форма».

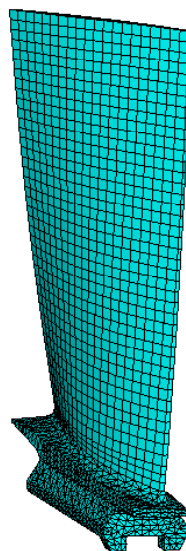


Рис. 4. Конечно-элементная модель рабочей лопатки 1 ступени КНД

Для всех вариантов профиля пера лопатки созданы конечно-элементные модели рабочих лопаток в 3Д-исполнении. На площадках смятия хвостовика моделей лопаток приложены граничные условия, имитирующие закрепление лопатки в ободной части диска. Конечно-элементная модель рабочей лопатки представлена на рис. 4.

Выполнены модальные расчеты по определению первых трех форм колебаний для всех вариантов изменения профиля пера лопаток.

Результаты расчета МКЭ частот собственных колебаний после доработки пера лопаток представлены на рис. 5...10.

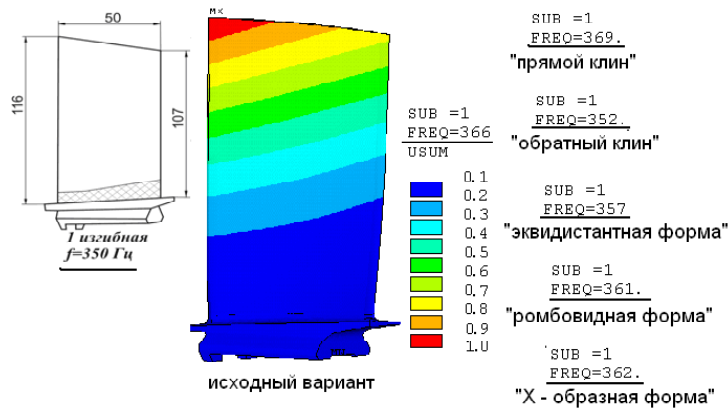


Рис. 5. Величины частот 1 изгибной формы собственных колебаний лопаток для шести вариантов профиля пера



Рис. 6. Графическое отображение расхождения (в %) величин частот 1 изгибной формы собственных колебаний, полученных в результате модального анализа МКЭ, относительно средней, полученной экспериментально

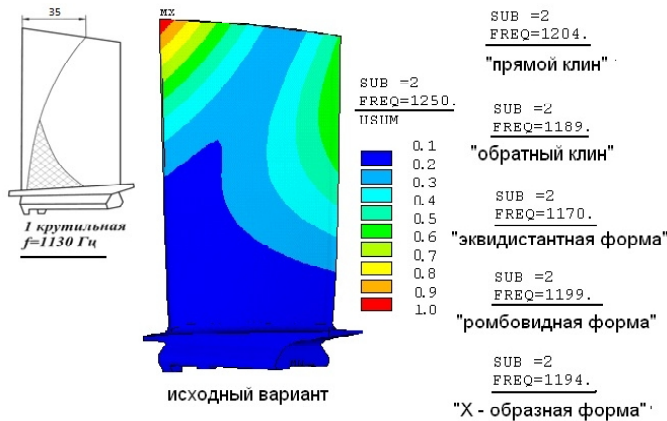


Рис. 7. Величины частот 1 крутильной формы собственных колебаний лопаток для шести вариантов профиля пера



Рис. 8. Графическое отображение расхождения (в %) величин частот 1 крутильной формы собственных колебаний, полученных в результате модального анализа МКЭ, относительно средней, полученной экспериментально

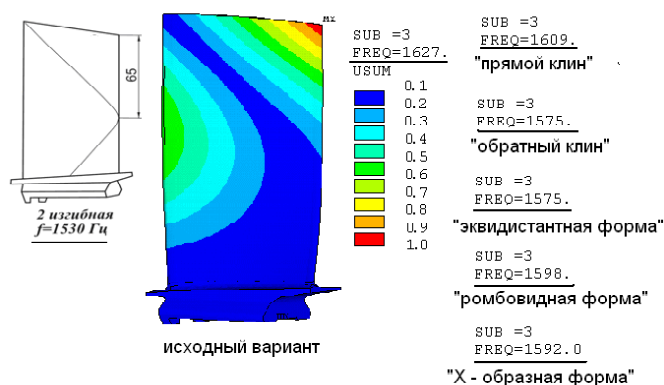


Рис. 9. Величины частот 2 изгибной формы собственных колебаний лопаток для шести вариантов профиля пера

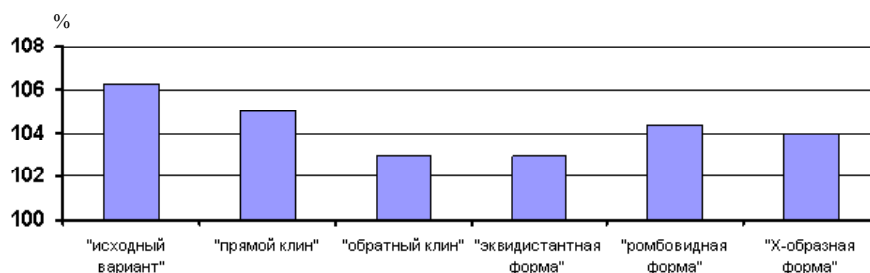


Рис. 10. Графическое отображение расхождения (в %) величин частот 1 крутильной формы собственных колебаний, полученных в результате модального анализа МКЭ, относительно средней, полученной экспериментально

Проведенное исследование влияния формообразования пера рабочей лопатки на изменение величин частот собственных колебаний рабочей лопатки показало, что методы определения собственных частот колебаний (экспериментальный, аналитический и метод математического моделирования на основе метода конечных элементов) дают результаты с допустимым расхождением. Различия в величинах определенных частот собственных колебаний можно объяснить техническими особенностями аппаратуры при экспериментальном методе, аккуратностью расчетов в случае аналитического метода и качеством созданной конечно-элементной сетки в случае численного математического моделирования. Преимущества на стороне метода математического моделирования с использованием расчетного комплекса ANSYS. Данные преимущества обусловлены быстротой определения, достаточной точностью и минимальной затратностью.

Выводы

Для определения диапазона возможного регулирования частоты собственных колебаний технологическими методами, рассмотрены возможные варианты формообразования геометрии пера в пределах допустимых отклонений основных размеров. Установлен характер изменения частот по 1-й и 2-й изгибной и по 1-й крутильной формам колебаний для различных вариантов формообразования пера в пределах допускаемых отклонений основных размеров.

Установлено оптимальное формообразование – максимальная толщина пера у периферии с утонением по направлению к хвостовику, что, при наличии интенсивного абразивного износа, доминирующего у периферии, уменьшает вероятность попадания частоты собственных колебаний лопаток в близлежащую резонансную область.

Показаны преимущества модального анализа средствами ANSYS, для определения форм и частот собственных колебаний рабочей лопатки.

Список литературы

1. Прогнозирование частот собственных колебаний лопаток компрессора высоких форм при регулировании частоты основного тона / [Богуслаев В. А., Бабенко О. Н., Олейник А. А. и др.] // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 1. – С. 10–14.
2. Шереметьев А. В. Использование компьютерного моделирования для учета технологической наследственности при установлении ресурсов деталей авиационных ГТД / А. В. Шереметьев, А. В. Петров // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 4 (20). – С. 50–53.
3. Виртуальная разработка изделий – технологии XXI века. – М.: The MSC Software Corporation, 2004. – 84 с.

Поступила в редакцию 16.05.2016

Бабенко О.М., Прибора Т.І. Методи регулювання частот власних коливань робочих лопаток компресора ГТД

Розглянуто особливості нових технічних рішень підвищення надійності найбільш навантажених деталей — робочих лопаток компресора. Найбільш вразливою є вхідна кромка на лопатках І-го ступеня компресора АД. Причиною зародження тріщин втоми на лопатках компресора є підвищені вібраційні напруження. Розглянуто варіанти формоутворення пера у межах допустимих відхилень основних розмірів.

Ключові слова: *віброчастотні характеристики, демпфуючі властивості лопаток, частоти власних коливань, модальний аналіз, численний метод.*

Babenco O., Pribora T. The adjustment ways of natural vibration frequencies of aircraft engine compressor blades

Studied peculiarities of new technical solutions to increase reliability of the most loaded parts — compressor blades. The most vulnerable part is outlet edge of the 1st stage compressor blade. The reason of fatigue crack is increased vibration loadings/stresses. Studied different options to create the shape of blade in the allowable field of basic dimensions.

Key words: *vibration characteristics, damping properties of the blades, the natural frequencies, modal analysis, numerical method.*