

ДИНАМИКА ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ ТУРБОМАШИН

УДК 629.7.036.3—752

А. Л. Багрянцев

О КИНЕМАТИКЕ КОЛЕБАНИИ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА, БАНДАЖИРОВАННОГО ПОЛКАМИ

В современных осевых турбомашинах часто используются лопаточные венцы рабочих колес с полками, образующими круговой бандаж. Однако, несмотря на широкое применение таких венцов, пока нет единообразного подхода к механизму их колебаний. Основываясь на известных исследованиях закономерностей колебательных процессов обычных лопаточных венцов со связями, а также на имеющемся опыте эксплуатации лопаточных колес осевых компрессоров, попытаемся сформулировать положения, характеризующие кинематику колебаний лопаточных венцов с низшими частотами.

В большинстве случаев колебания даже обычных лопаточных венцов необходимо рассматривать как колебания единой системы. Это отмечается в ряде работ, особенно обращено внимание на такой подход в работах С. И. Богомолова и В. П. Иванова [1], [4]. Лопаточный венец тем более следует рассматривать только с такой точки зрения поскольку, кроме связи через диск, лопатки здесь имеют кольцевую связь и через бандажные полки. Поэтому считаем, что лопаточный венец совместно с диском (рис. 1) представляет собой единую упругую систему.

Главными формами колебаний таких систем являются колебания с узловыми диаметрами [1]. В системе имеется целое число волн перемещений по окружности [3], [4]. Амплитуды колебаний каждой компоненты перемещений лопаток укладываются дискретно на синусоиду [3].

Для возбуждения круговой системы, имеющей формы колебаний с определенным числом узловых диаметров, недос-

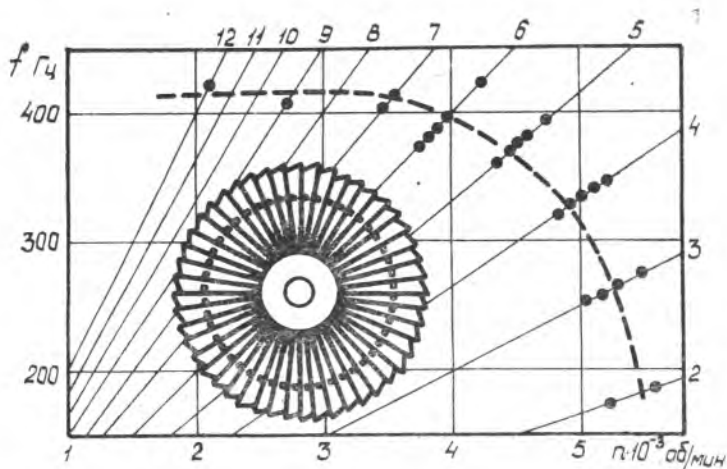


Рис. 1. Экспериментальные величины резонансных частот полочного колеса: ● — замеренные резонансные обороты и частоты

таточно совпадения ее собственной частоты с частотой гармоники возбуждающих сил. Известно, что резонансными режимами в этих случаях будут только такие, при которых число узловых диаметров равно номеру гармоники возбуждения [4]. На резонансной диаграмме (рис. 1) показаны результаты тензометрирования колес с числом лопаток 50. Частоты резонансов различны для разных гармоник. На основании сказанного выше следует полагать, что это не падение частоты одной формы с ростом оборотов, а резонансы различных форм колебаний системы, имеющих разные собственные частоты и соответствующее число узловых диаметров.

Система полочного венца — циклически симметричная система с присущими ей вибрационными свойствами [3], [4]. Спектр частот собственных форм циклически симметричных систем распадается на группы, имеющие общий признак, — одинаковое число узловых диаметров компонент перемещений. Для полочного колеса введем также понятие семейства собственных частот. Семейство складывается из форм, входящих в разные группы, но обладающих общим признаком — близкими по геометрическому граничному условиям формами колебаний лопаток. Каждое семейство простирается от формы без узловых диаметров до формы с максимальным их числом, определяемым через число лопаток в колесе [2], [3]. Сле-

довательно, можно сказать, что резонансы на диаграмме — резонансы форм семейства с низшими частотами, т. к. на более низких частотах с этими гармониками резонансов нет.

В работах [2], [4] показано, что группам форм с разным числом узловых диаметров соответствуют собственные числа с кратностью не менее второй, т. е. каждой из собственных частот указанных групп отвечают две собственные формы с совпадающими частотами. При внесении в систему асимметрии эти частоты расщепляются на две близкие, а положение узловых диаметров при этом становится фиксированным по окружности. На факт появления фиксированных узловых диаметров применительно к осесимметричным телам обращено внимание Рэлея. Для циклически симметричных тел это показано в работах В. П. Иванова [4]. В реальном полочном венце всегда есть асимметрия, т. к. лопатки изготавливаются не идентично, отличаясь в пределах допусков. Из сказанного можно сделать вывод: колебания полочных венцов должны совершаться с фиксированными относительно диска узловыми диаметрами.

Из изложенных положений о колебании полочного венца также следует: при колебаниях системы изгиб и кручение происходит деформация пера лопаток. Форма и амплитуда колебаний конкретной лопатки в общем случае отличны от соседней и зависят от положения лопатки в волне перемещений и от формы колебаний всей системы [1]. Необходимо подчеркнуть, что форма изгибных колебаний лопатки и при самых низших частотах имеет конфигурацию, характеризующуюся перемещением всех сечений пера, а не только его надполочной части.

Наконец, полагаем, что при колебаниях венца по контактными поверхностям полков имеется проскальзывание без нарушения замкнутости системы. Это означает, что бандажные полки налагают лишь определенные кинематические ограничения на перемещения лопаток в системе, т. е. форма деформации изгиба и кручения лопаток в волне перемещений зависит как от опоры на полки, так и от податливости пера при проскальзывании по полкам.

Наличие проскальзывания по полкам подтверждается практически всегда имеющимся износом контактных поверхностей полков у длительно эксплуатирующихся колес. Распределение износов полков по окружности колеса свидетельствует о существовании фиксированных узловых диаметров. Статистика таких износов, приведенная в [5], показывает хо-

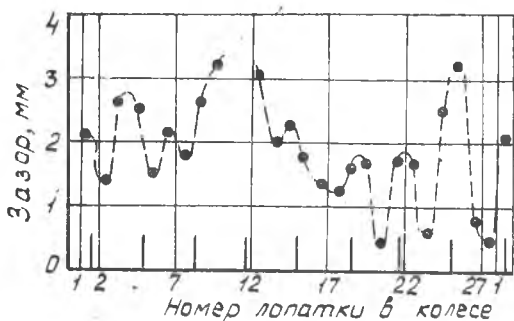


Рис. 2. Распределение зазоров по контактным поверхностям полок в колесе

рошее соответствие числа волн величин износов по окружности колеса числу узловых диаметров наиболее возбуждаемых форм колебаний. На рис. 2 показано изменение величин зазоров по полкам у колеса с одной отсутствующей лопаткой. Ясно отмечается 8 волн их изменения по окружности, что соответствует установленному факту возбуждения этого колеса 4-й гармоникой большой интенсивности.

На рис. 3 приведены результаты тензометрирования половины лопаток одного из полочных колес по датчику над лопаткой при резонансе с 4-й гармоникой. Видимые 4 волны напря-

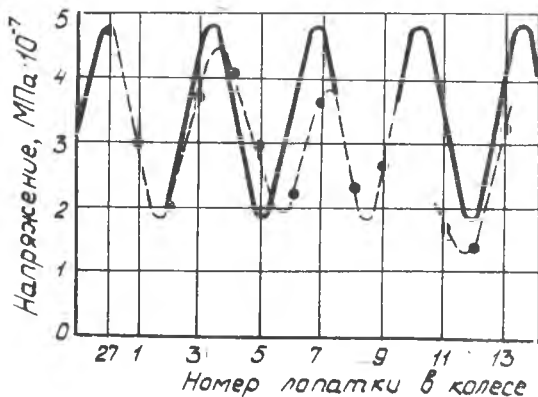


Рис. 3. Переменные напряжения для различных лопаток колеса: — теоретическое синусоидальное распределение напряжений; ● — значение напряжений

жений на положение окружности колеса дают основание отметить следующее. Характер распределения напряжений соответствует возбуждению 4-й гармоникой. Узловые диаметры по окружности фиксированные, т. к. график построен по 32 замерам, а от замера к замеру положение волн не меняется. Разброс напряжений от лопатки к лопатке в полочном венце определяется в основном не разбросом показаний тензодатчиков и не отличиями в жесткости шера, а положением лопатки в волне перемещений, как и предполагалось выше.

Выдвинутые положения о кинематике колебаний полочного венца согласуются с имеющимися в литературе теоретическими взглядами и позволяют дать удовлетворительное объяснение большинству фактов, встречающихся при эксплуатации полочных колес.

Л и т е р а т у р а

1. Богомолов С. И., Журавлева А. М. Взаимосвязанные колебания в турбомашинах и газотурбинных двигателях. Харьков, «Вища школа», 1973, с. 176.
2. Борщанский К. Н. Колебания стержней и лопаток, связанных проволоками. — Энергомашиностроение, 1965, № 1, с. 7—10.
3. Иванов В. П. О некоторых вибрационных свойствах упругих систем, обладающих циклической симметрией. КуАИ, 1967, вып. 29, с. 118—120.
4. Иванов В. П. Некоторые вопросы колебаний лопаточных венцов и других упругих тел, обладающих циклической симметрией. — В сб.: Прочность и динамика авиационных двигателей. «Машиностроение». 1971, вып. 6, с. 113—132.
5. Багрянцев А. Л. К вопросу о колебаниях лопаточных венцов, забалансированных полками. КуАИ, 1970, вып. 45, с. 308—312.

УДК 621.438—253.5.001.57

Е. Л. Михеенков

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОХЛАЖДАЕМОЙ ЛОПАТКИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Проектирование температурного поля — задача, требующая своего разрешения при создании новых или увеличении ресурса и параметров существующих ГТУ, и представляющая комплексное рассмотрение вопросов теплообмена, теплопровод-