

себя статорные части (корпусные детали). При проведении расчётов учитывалось влияние гироскопических моментов, для чего использовалась реализованная в пакете процедура Rotordynamics. Высокая степень дискретизации математической модели позволяет создать полноразмерную трёхмерную модель системы "ротор-статор-подвеска" и избежать её излишней идеализации.

Для сокращения расчётного времени на основе роторной и статорной частей модели с использованием метода статического редуцирования создаются суперэлементы.

Полученные результаты качественно описывают картину динамического поведения системы "ротор-статор-подвеска", согласующуюся с экспериментальными данными.

УДК 621.452

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛАТТЕРА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ СОВРЕМЕННЫХ ГТД

Колотников М.Е.¹, Веденеев В.В.², Макаров П.В.¹

¹ - ФГУП "ММПП "Салют", г. Москва

² - МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

NUMERICAL PREDICTION OF BLADE FLUTTER IN MODERN GAS TURBINE ENGINES

Kolotnikov M.E., Vedeneev V.V., Makarov P.V. In practice of Russian gas turbine engines design, typical method of blade flutter prediction is semi-empirical method based on statistics of previous experimental flutter studies. In this paper, a fully numerical method of flutter prediction based on 3-D aerodynamics is developed. Results of calculation are in excellent agreement with the test results of the engine considered.

В настоящее время в практике российского авиадвигателестроения расчетное прогнозирование флаттера лопаток ГТД базируется преимущественно на вероятностно-статистическом подходе, суть которого заключается в обобщении экспериментальных данных методами математической статистики и построении областей флаттера и устойчивости в многомерном пространстве диагностических факторов [1]. Такой подход достаточно хорошо себя зарекомендовал главным образом для схем компрессоров с рабочими лопатками, имеющими антивибрационные полки, для которых накоплен большой объем экспериментальных данных. Однако, в случае его использования применительно к лопаткам широкохордных высоконапорных вентиляторов без бандажных связей между лопатками, т.е. проведения экстраполяции за пределы области параметров, не охватываемой имеющимися сегодня экспериментальными данными, результат представляется далеко не очевидным.

В работе [2] показано, что с помощью экспериментального стенда для исследования нестационарных явлений в аэродинамических решетках турбомашин, определив для периферийного сечения лопатки коэффициенты нестационарных аэродинамических характеристик, перекрестных аэродинамических характеристик, взаимных аэродинамической связей, возможно осуществить подход к численному прогнозированию решетчатого флаттера лопаток как в условиях их безотрывного, так и срывного обтекания.

В работе [3] предложено выполнять оценку коэффициента аэродинамического демпфирования лопатки путем численного решения уравнений Навье-Стокса для плоского сечения, соответствующего 90% высоты лопатки. Такой подход, хотя существенно упрощает расчетную модель, т.к. используются 2-D расчеты, однако, как нам кажется, не может быть в полной мере применен для лопаток компрессоров.

Также, следует отметить, что это периферийное сечение в работах [2, 3] выбрано

на основе статистических данных для эксплуатируемых компрессоров с рабочими лопатками, имеющими антивибрационные полки.

В настоящей работе для прогнозирования решетчатого флаттера используется метод 3-D расчета нестационарных аэродинамических сил и моментов, действующих на колеблющиеся в потоке лопатки, позволяющий напрямую оценивать количество подводимой энергии к рабочей лопатке компрессора и её знак (т.е. направление подвода — от потока к лопатке или от лопатки к потоку) и прогнозировать области её неустойчивости к флаттеру.

Предлагаемый подход состоит в определении интегральной величины работы, совершаемой нестационарным давлением на заданных перемещениях лопатки за один цикл колебаний:

$$W = \int_{t_0}^{t_0+T} \int_S \vec{p}(x, y, z, t) \cdot \vec{v}(x, y, z, t) ds dt, \quad (1)$$

где $T=1/\omega$ - период колебаний лопатки (ω - частота колебаний), S — поверхность лопатки, p — вектор давления в потоке, v — скорость движения точек лопатки.

Критерием неустойчивости к флаттеру является неравенство

$$W > 0, \quad (2)$$

что соответствует положительной работе, совершаемой силами давления на собственной колебании лопатки.

Решение связанной задачи аэродинамики и упругости базируется на газодинамическом расчете всего компрессора (вентилятора) на этапе аэродинамического проекта. Для оценки устойчивости определенного лопаточного венца к классическому или решетчатому флаттеру по собственной форме колебаний, рассматривается конечно-объемная модель газодинамического тракта трех подряд стоящих профилей лопаток. Для проведения нестационарного расчета обтекания профилей используются граничные условия на входе и выходе в данную ступень из стационарного газодинамического расчета всего компрессора (вентилятора) с осредненными по окружности параметрами для исключения влияния аэродинамических следов направляющих аппаратов (резонансных колебаний). При этом, каждому профилю

задаются перемещения для соответствующей расчетной формы колебаний с определенным значением узловых диаметров:

$$\vec{u}(x, y, z, t) = A \cdot \sin \omega t \cdot (L_n(x, z)), \quad (3)$$

где A и ω - амплитуда и частота колебаний лопатки, $L_n(x, z)$ - интерполяционный многочлен Лагранжа 10-ой степени, построенный для собственной формы колебаний.

Для задания вперед бегущей волны деформаций, присущей решетчатому флаттеру [4], для соседних с центральной лопаткой профилей учитываются соответственно запаздывания $\sin \omega t - \alpha$ и опережения $\sin \omega t + \alpha$ по времени изменения амплитуд колебаний в соответствии с характерным для данного узлового диаметра сдвигом фаз.

Предлагаемый подход к расчетному прогнозированию решетчатого флаттера лопаток компрессоров современных ГТД рассматривается на моделях бандажированных первой и консольной второй ступеней эксплуатируемых вентиляторов, а также на модели широкохордной лопатки перспективного вентилятора. Для данных конструкций имеются экспериментальные подтверждения режимов флаттера лопаток этих ступеней.

Библиографический список

1. Локштанов, Е.А. Статистическое прогнозирование флаттера лопаток турбомашин / Е.А. Локштанов, В.М. Михайлов, А.А. Хориков // Аэроупругость лопаток турбомашин. – Киев: Наукова думка, 1980. - С. 73–81.
2. Стельмах, А.Л. Экспериментально-расчетное исследование динамической устойчивости изгибно-крутильных колебаний компрессорных лопаток при безотрывном и срывном обтекании. Сообщ. 3. Взаимные аэродинамические связи / А.Л. Стельмах, А.П. Зиньковский, Я.А. Стельмах // Пробл. прочности. - 2010. - № 3. - С. 89 - 99.
3. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях: Научное издание / Августинович В.Г., Шмотин Ю.Н. [и др.] - М.: Машиностроение, 2005. - 536 с.
4. Сачин, В.М. Исследование фазовых характеристик связанных колебаний лопаток компрессоров в потоке / В.М. Сачин, А.А. Хориков, А.Г. Шатохин // Тр. ЦИАМ. - № 953. - С. 287 - 296.