DOI: 10.15593/2224-9982/2017.50.01
УДК 629.735.33-629.7.018.4

М.В. Пивоварова[1, 2], В.А. Бессчетнов[2]

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
[2] АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ

При тензометрировании количество каналов для измерения вибронапряжений элементов газотурбинного двигателя всегда ограничено. На начальном этапе экспериментальных исследований, когда еще не определено динамическое поведение детали, какие из резонансных режимов опасны, а какие нет, желательно с помощью небольшого количества тензорезисторов «перекрыть» все расчетные собственные формы колебаний. В данной работе представлен расчетный метод определения оптимального размещения тензорезисторов и определения коэффициентов чувствительности форм колебаний тензорезисторов. Расчетный метод разработки схемы препарирования основан на расчете собственных форм колебаний детали. Для оценки качества размещения тензорезистора введено понятие коэффициента чувствительности тензорезистора к форме колебаний и выделено три диапазона значений чувствительности по его применимости. Введено понятие «покрытия» формы колебаний, показывающее, что такая схема препарирования позволяет достоверно измерить динамические напряжения по данной форме. Для количественной оценки качества схемы препарирования определяется количество покрываемых данной схемой форм. Проведена отработка метода определения оптимального положения тензорезисторов на рабочих лопатках компрессора высокого давления. Было рассмотрено три варианта схем препарирования и для каждого определены коэффициенты чувствительности форм колебаний. Два варианта схем препарирования разработаны на базе опыта экспериментальных исследований лопаток и предварительного анализа результатов расчета вибрационных характеристик лопаток. Третий вариант схемы препарирования разработан с применением метода определения оптимального размещения тензорезисторов. Третья схема разработана для лопатки, концентраторы напряжений по формам колебаний которой расположены в труднодоступных для размещения тензорезисторов местах. Для нее же определены коэффициенты чувствительности форм колебаний по отношению к максимальному значению интенсивности напряжений в профиле лопатки. Для всех схем препарирования определено среднее значение «покрытия» форм.

Ключевые слова: схема препарирования, коэффициент чувствительности тензорезистора к форме колебаний, «покрытие» формы колебаний, вибронапряжения, оптимальное положение тензорезистора.

M.V. Pivovarova[1, 2], V.A. Besschetnov[2]

[1] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
[2] UEC-Aviadvigatel JSC, Perm, Russian Federation

DEVELOPMENT OF EVALUATION METHOD FOR DETERMINING THE STRAIN GAUGES OPTIMAL PLACEMENT AND DETERMINING THE STRAIN GAUGES MODE SHAPE SENSITIVITY FACTOR

The number of measurement channels of dynamic stresses is always limited. At the initial stage of the study when it is not determined which of the resonant modes are dangerous and which are not, it is desirable to cover the greatest possible number of natural forms with a small amount of strain gauges. The estimated method of determining the optimal position of the strain gauge and determining the strain gauge mode shape sensitivity factor is persecuted in the study. This method is based on estimated the free modes. To analyze the quality of the preparation designs, the concept of the strain gauge mode shape sensitivity factor is introduced. To determine the optimal placement of the strain gauges three ranges of sensitivity are allocated. The concept of modes “covering” is introduced to quantify the output. The testing of the method determining the optimal position of the strain gauges is conducted on the example of the high-pressure compressor blades. Three variants of preparation designs were considered. For each of them the strain gauge mode shape sensitivity factor of is determined corresponded. The two versions of preparation designs was developed on the basis of experimental studies of blades and a preliminary analysis of the blades vibration characteristics evaluation results. The two versions of preparation designs was developed on the basis of

experimental studies of blades and a preliminary analysis of the evaluation results of vibration characteristics of blades. The third variant of the preparation design was developed using the method of determining the optimal placement of the strain gauge. The third scheme is developed for the blades in which the stress concentrators are located in areas inaccessible for strain gauge placement. For these blades the free modes sensitivity is estimated relative to the maximum stress intensity in the blade profile. The average value of free mode “coverage” is determined for all of the preparation designs.

Keywords: tpreparation design, strain gauge mode shape sensitivity factor, free mode shape “coverage”, dynamic stresses, strain gauge optimal position.

Введение

По мере усложнения и повышения требований, предъявляемых к характеристикам летательных аппаратов, возрастает роль математического моделирования при планировании испытаний. Для создания конкурентоспособного двигателя необходимо повышать КПД и снижать массу двигателя, что требует повышения газодинамических параметров компрессора и сокращения числа ступеней. Это приводит к появлению более сложного профиля лопаток. Усложнение профиля лопаток влечет за собой усложнение форм колебаний, которые, в свою очередь, трудно зафиксировать на испытаниях.

Исходя из вышесказанного важно провести качественную подготовку к испытаниям.

Основным методом экспериментального контроля и оценки динамических напряжений в деталях газотурбинного двигателя (ГТД) является тензометрирование. Важной задачей при планировании тензометрирования является разработка схем препарирования деталей [1, 2]. Зачастую создание схемы препарирования тензорезисторами строится на основе многолетнего опыта экспериментальных исследований деталей подобной конструкции [3]. Во время работы лопаток со сложной кривизной профиля велика вероятность возникновения резонансов по высокочастотным формам колебаний, зарегистрировать которые стандартными средствами не представляется возможным. Также с увеличением количества форм колебаний местá концентрации напряжений стали значительно меньше, что вызывает потребность размещать тензорезисторы непосредственно в места концентрации [4–7].

Схемы препарирования деталей могут быть разработаны на основе предварительных экспериментальных исследований в лабораторных условиях [8–10] или на основе результатов расчета вибрационных характеристик и распределения динамических напряжений в лопатке. Для разработки схем препарирования деталей ГТД разработан метод определения оптимального размещения тензорезисторов, включающий в себя расчетную оценку коэффициента чувствительности тензорезистора к формам колебаний. Коэффициент чувствительности тензорезистора к формам колебаний – это отношение величины измеренного вибронапряжения по тензорезистору к максимальному значению вибронапряжения в детали.

Работа тензорезисторов основана на их чувствительности к деформациям [11, 12]. Тензорезистор измеряет деформации в одном направлении, а именно вдоль оси тензорезистора. Ориентация приклейки тензорезистора при препарировании лопатки, как правило, выбирается в радиальном или хордовом направлении, в направлении вдоль кромки или периферии лопатки. Такое расположение достаточно легко исполнить. Тензорезистор также может быть размещен под некоторым заданным углом к выбранному направлению. Тензометрирование под углом – более трудоемкий процесс, и погрешность размещения может доходить до 30 % в зависимости от размеров объекта. Тензорезистор может быть расположен в любом месте на гладкой поверхности с учетом подложки тензорезистора. Подложка выступает связующей частью детали и тензорезистора. На расположение тензорезистора наложены некоторые ограничения: нельзя располагать тензорезистор в места скругления, в места, где нельзя полностью или частично расположить подложку. Расположение тензорезистора может не совпадать с местом максимального напряжения в лопатке, а его размеры могут быть больше зоны локальной концентрации напряжения.

Деформация определяется в зоне, ограниченной размерами тензорезистора, в ней же проходит осреднение деформации.

Расчет вибрационных характеристик и распределения напряжений

Анализ и разработка схем препарирования лопаток проведены с использованием методов и подходов, основанных на анализе результатов конечно-элементных расчетов вибрационных характеристик лопаток.

Расчет собственных форм проводится с использованием пакета конечно-элементного анализа конструкций ANSYS. При построении конечно-элементной модели можно использовать любой тип элемента: 4-, 8- или 20-узловые элементы, например тип SOLID186 [13].

По результатам расчета рассматриваются распределения динамических напряжений в зонах возможного размещения тензорезисторов. Для лопаток такими областями являются поверхности пера, для диска – полотно, для зубчатых колес – полотно колеса. Но зоны максимальных напряжений могут находиться в местах, не пригодных для расположения тензорезисторов. Такими местами являются грани контакта, грани, не смежные с гранями размещения тензорезисторов, и грани с резким изменением геометрии (радиуса перехода и скругления).

Расчет собственных форм проводится на рабочем режиме, с соответствующим тепловым состоянием и центробежными нагрузками. Весомую роль в определении собственных частот и форм колебаний играет правильность задания совместных перемещений. Выбор расчетной схемы определяется с учетом реальных условий работы объекта (условий проводимого испытания).

Отметим еще один важный аспект в определении максимальных эквивалентных напряжений – качество разбиения конечно-элементной сетки. Величина динамических напряжений будет отличаться для элементов различных типов, а также зависеть от размеров этих элементов. Вдобавок размер конечного элемента должен быть в несколько раз меньше размера тензорезистора.

Для определения коэффициента чувствительности форм колебаний необходимо создать файлы с данными, полученными по расчету. Например, для лопаток такие файлы будут включать:

1) координаты главных узлов (узлы на поверхности лопатки без промежуточных узлов) с поверхности корыта;

2) координаты главных узлов с поверхностей корыта и спинки;

3) список из элементов и принадлежащих им узлов с поверхностей корыта и спинки;

4) деформации главных узлов с поверхностей корыта и спинки.

Для удобства можно создать компоненты с узлами этих поверхностей без промежуточных узлов.

Метод расчета коэффициентов чувствительности форм колебаний

Отношение величины измеренного напряжения по тензорезистору к максимальному уровню динамических напряжений в детали назовем коэффициентом чувствительности форм колебаний тензорезистора.

Исходными данными для определения коэффициентов чувствительностей форм тензорезистора по результатам расчетов являются положение и вектор ориентации тензорезистора на объекте.

Расчет коэффициентов чувствительности форм тензорезисторов на базе расчета собственных частот и форм колебаний проводится в следующей последовательности:

1. Проводится расчет собственных частот и форм колебаний, определяются области возможного расположения тензорезисторов (спинка и корыто профиля лопатки). Для каждой формы колебаний определяется значение максимальных эквивалентных напряжений σ_{max}.

2. Во всех точках (узлах) рассматриваемой области определяются система координат $(\vec{n}, \vec{s}_1, \vec{s}_2)$, в которой вектор $\vec{n}$ является нормалью к поверхности детали, вектор $\vec{s}_1$ лежит

в плоскости нормальной к вектору $\vec{n}$ и касательной к поверхности детали и совпадает с направлением ориентации тензорезистора, вектор $\vec{s}_2$ нормален к вектору $\vec{s}_1$ и $\vec{n}$.

3. Во всех точках (узлах) рассматриваемой области и по всем формам колебаний определяется тензор деформации в новой системе координат $(\vec{n},\vec{s}_1,\vec{s}_2)$. Компонента тензора деформации ε_{s_1} (в направлении $\vec{s}_1$), является деформацией вдоль тензорезистора. Произведение модуля упругости E на компоненту тензора деформации ε_{s_1} является напряжением в направлении ориентации тензорезистора. При анализе напряжений принято допущение, что действует только одноосное растяжение, т.е. не учитываются поперечные деформации [14]. Считаем, что

$$\sigma_x = E\varepsilon, \quad \sigma_y = \sigma_z = 0.$$

4. Определяем чувствительность форм в каждом узле по всей области тензорезистора. Чувствительность формы колебаний определяются сразу во всей области возможного расположения тензорезисторов для заданной ориентации. Для последующего анализа или выбора положения тензорезистора реализована возможность графического представления результата.

5. Для всех рассматриваемых тензорезисторов по базе тензорезистора (ширина, длина) проводится осреднение чувствительности форм, определяются погрешности измерения при неточности расположения тензорезистора или при некотором смещении тензорезистора.

На первом шаге для каждой точки (узла) в рассматриваемой области возможного расположения тензорезистора определяется вектор $\vec{n}$, который является нормалью к поверхности детали.

Поверхность рабочей грани разбита на конечные элементы. На грани элемента, лежащей на поверхности детали, выбираем три узла и строим через них плоскость.

Уравнение плоскости, проходящей через три узла с координатами (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), записывается так:

$$Ax + By + Cz + D = 0,$$

где

$$\begin{aligned} A &= y_1z_2 + y_2z_3 + y_3z_1 - y_1z_3 - y_2z_1 - y_3z_2, \\ B &= x_1z_3 - x_1z_2 + x_2z_1 - x_2z_3 - x_3z_1 + x_3z_2, \\ C &= x_1y_2 - x_1y_3 - x_2y_1 + x_2y_3 + x_3y_1 - x_3y_2 \\ D &= x_3y_2z_1 - x_3y_1z_2 - x_2y_3z_1 + x_2y_1z_3 + x_1y_3z_2 - x_1y_2z_3. \end{aligned} \tag{1}$$

Вектор единичной внешней нормали в каждом из трех узлов $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$ определяется так:

$$n_1 = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}},$$
$$n_2 = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}},$$
$$n_3 = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}.$$

Узел может принадлежать нескольким конечным элементам. В этом случае нормаль определяется в каждом из этих элементов. Результирующее направление нормали в данном узле будет определяться через сумму единичных векторов нормалей в каждом элементе.

Далее определяется вектор $\vec{s}_1$, который лежит в плоскости нормальной к вектору $\vec{n}$ и совпадает с направлением ориентации тензорезистора t_n. Для этого проецируем вектор $\vec{t}_n$

на плоскость нормальную к вектору $\vec{n}$. Вектор $\vec{s}_2$ определяется из условия нормальности векторам $\vec{n}$ и $\vec{s}_1$. Полученная тройка векторов определяет новую систему координат $(\vec{n},\vec{s}_1,\vec{s}_2)$ в узле. В каждом узле на поверхности будет своя система координат.

Во всех точках (узлах) рассматриваемой области и по всем формам колебаний определяется тензор деформации в новой системе координат $(\vec{n},\vec{s}_1,\vec{s}_2)$:

$$\varepsilon'_{ij} = \alpha_{ik}\,\alpha_{jm}\,\varepsilon_{km}, \qquad i,j,k,m = 1...3,$$

$\varepsilon_{km} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$ – тензор деформаций в исходной системе координат;

$\alpha_{ij} = \begin{pmatrix} n_1 & s_{11} & s_{21} \\ n_2 & s_{12} & s_{22} \\ n_3 & s_{13} & s_{23} \end{pmatrix}$ – матрицы поворота. Компонентами матрицы поворота являются координаты направляющих векторов системы $(\vec{n},\vec{s}_1,\vec{s}_2)$;

ε'_{ij} – тензор деформаций в новой системе координат $(\vec{n},\vec{s}_1,\vec{s}_2)$.

В новой системе координат компонента тензора деформации $\varepsilon_{s_1 s_1}$ является деформацией в направлении ориентации тензорезистора.

Далее проводится вычисление чувствительности форм колебаний во всех узлах рассматриваемой области:

$$K = \frac{E\varepsilon_{s_1 s_1}}{\sigma_{\max}},$$

где E – модуль упругости; $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение в объекте без учета зоны закрепления (например, на пере лопатки).

В итоге проводится осреднение коэффициентов чувствительности форм колебаний по базе тензорезистора и вычисляются погрешности измерения напряжений при смещении положения тензорезистора.

Выбор оптимального размещения тензорезисторов

Выбор оптимального размещения тензорезисторов или разработка схемы препарирования выполняются исходя из целей последующего экспериментального исследования.

Выделим следующие типы экспериментального исследования с учетом тензометрирования объекта:

1) исследование напряжений с приемлемой чувствительностью форм по всем формам колебаний, по которым возможны резонансы;

2) исследование напряжений с максимально возможной чувствительностью форм и точностью измерений по конкретной группе (одна или несколько) собственных форм колебаний лопатки, по которым существуют резонансы в рабочем диапазоне двигателя и ожидаются высокие напряжения.

Первый тип экспериментального исследования чаще всего применяется, когда мало информации по объекту испытания. Строгих ограничений по количеству, размеру и типу тензорезисторов не накладывается. Второй тип, наоборот, оптимально использовать в случае уточнения уже существующих обширных экспериментальных данных по исследуемому объекту [15].

Для качественной оценки коэффициента чувствительности были выделены три диапазона значений чувствительности форм:

1) первый диапазон от 0,500 и выше – приемлемые по величине значения с точки зрения точности измерения напряжений;

2) второй диапазон от 0,300 до 0,499 – нежелательно приемлемый (использовать только при отсутствии приемлемых значений);

3) третий диапазон ниже 0,299 – неприемлемый (указывает на область с маленькими деформациями).

Желательно размещать тензорезистор так, чтобы значения чувствительности форм колебаний соответствовали первому диапазону. Маленький размер тензорезистора позволит получить более точное значение коэффициента и увеличит вероятность принадлежности значения коэффициента первому диапазону. Такой подход больше всего подходит для второго типа экспериментального исследования.

В случае первого типа экспериментального исследования значимость размера тензорезисторов не столь велика. Наоборот, большие тензорезисторы позволяют затронуть одновременно несколько зон максимальных деформаций по различным формам, но при этом значение коэффициента может и не принадлежать первому диапазону. В таком случае критерием оценки значения коэффициента чувствительности станет «покрытие» формы тензорезисторами.

Форма колебаний считается «покрытой», если по ней:

– один и более тензорезисторов показывают приемлемые значения чувствительности форм;

– два или более тензорезисторов показывают нежелательно приемлемые значения чувствительности форм.

Ограничениями при разработке схемы препарирования являются ограниченное количество тензорезисторов на объекте и ограничения по размещению тензорезисторов на объекте.

Анализируя несколько схем препарирования, можно оценить их «покрытие» и выявить наиболее значимую схему, новые схемы препарирования разрабатывать уже с целью «покрытия» опасных форм колебаний, проявившихся на всех проведенных испытаниях.

Отработка метода определения оптимального положения тензорезисторов

Отработка метода определения оптимального положения тензорезисторов выполнена на лопатках компрессора высокого давления. К ним были применены три варианта схем препарирования. Два варианта схем разработаны на базе опыта экспериментальных исследований лопаток и предварительного анализа результатов расчета вибрационных характеристик лопаток. Третий вариант схем разработан с использованием метода определения оптимального размещения тензорезисторов на базе результатов расчета собственных частот и форм колебаний изолированных лопаток. Расчет собственных форм проведен с использованием пакета конечно-элементного анализа конструкций ANSYS. При построении конечно-элементной модели использованы 20-узловые элементы.

При анализе схем препарирования оценивалось количество «покрытых» тензорезисторами собственных форм колебаний.

Для каждой схемы препарирования были взяты пять рабочих лопаток с замком по типу ласточкин хвост. Схемы препарирования для каждого варианта приведены на рисунке.

В варианте 1 для всех лопаток использовалась одинаковая схема препарирования. Тензорезистор Т1 расположен в корневом сечении на корыте лопатки вдоль входной кромки, тензорезистор Т2 расположен на спинке вдоль торца лопатки. При первом варианте препарирования лопаток общее количество тензорезисторов, без учета дублирования, равно 10. Во втором варианте препарирования лопаток общее количество тензорезисторов, без учета дублирования, равно 14.

Лопатка 1 – все тензорезисторы расположены на спинке, Т1 и Т2 – в радиальном положении, а Т3 расположен под углом.

Лопатки 2–5 все тензорезисторы расположены на спинке, под разными углами.

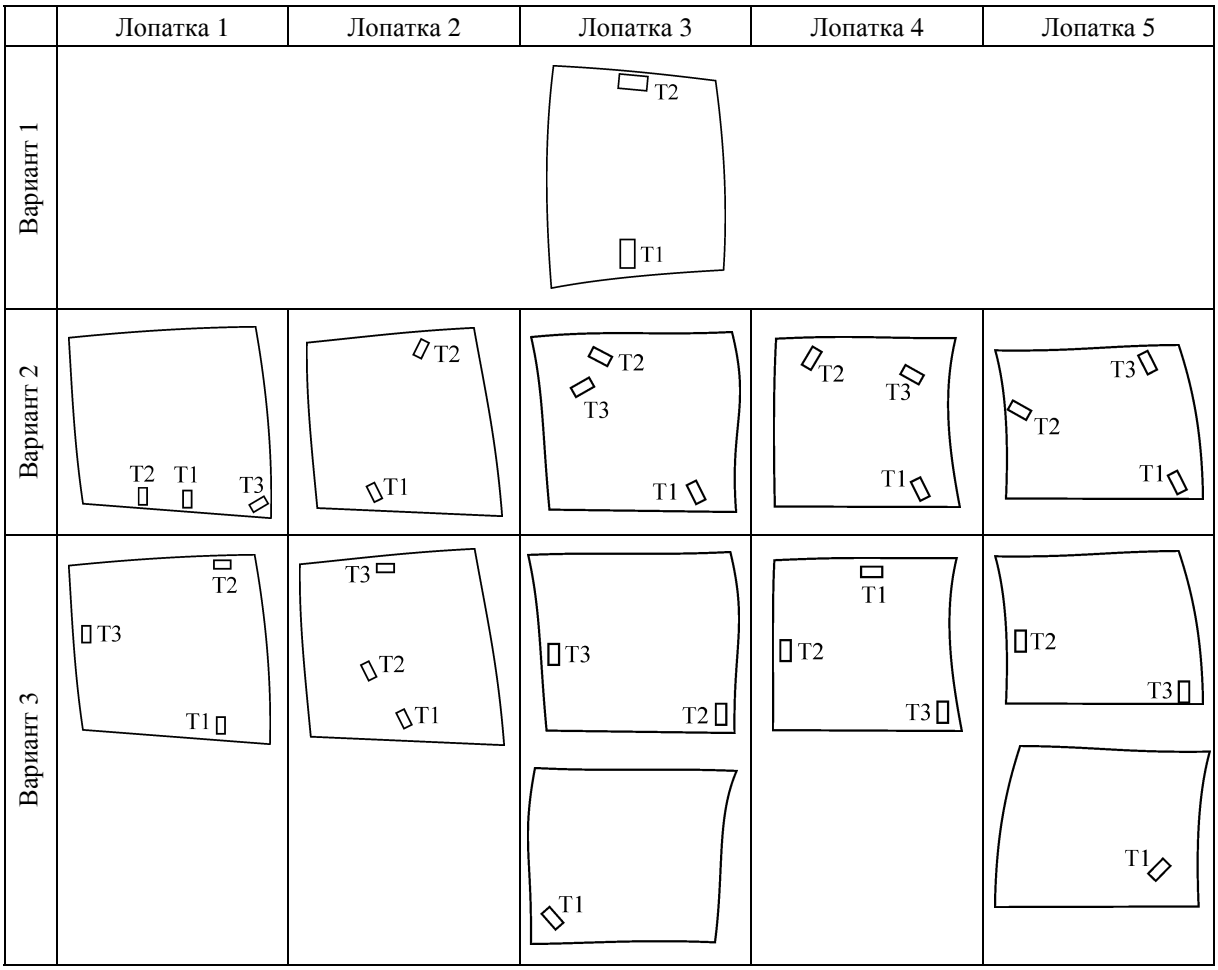


Рис. Схемы препарирования рабочих лопаток КВД (перо лопаток)

Третий вариант препарирования лопаток имеет общее количество тензорезисторов, без учета дублирования, равное 15. При разработке нового варианта схем препарирования преимущественно выбиралась ориентация тензорезисторов в горизонтальном или радиальном направлениях или под углом 45° к горизонтальному направлению. Тензорезисторы расположены следующим образом:

Лопатка 1 – Т1, Т2 расположены на спинке, Т3 – на корыте. Т1 и Т3 – в радиальном положении, а Т2 расположен в горизонтальном направлении.

Лопатка 2 – Т1, Т2 расположены на спинке, Т3 – на корыте. Т1 и Т2 – под углом, а Т3 расположен в горизонтальном направлении.

Лопатка 3 – Т1 расположены на спинке, Т2 и Т3 – на корыте. Т2 и Т3 – в радиальном положении, а Т1 расположен под углом.

Лопатка 4 – все тензорезисторы расположены на корыте, Т2 и Т3 – в радиальном положении, а Т1 расположен в горизонтальном направлении.

Лопатка 5 – Т1 расположены на спинке, Т2 и Т3 – на корыте. Т2 и Т3 – в радиальном положении, а Т1 расположен под углом.

По результатам анализа схемы препарирования первого варианта видно, что данного количества тензорезисторов недостаточно для «покрытия» всех расчетных форм. Многие резонансные формы на рабочих лопатках не «покрыты». Результаты анализа «покрытия» форм тензорезисторами в процентном соотношении приведены в таблице. Для данной схемы препарирования «покрытие» форм колебаний в среднем по всем лопаткам составляет 46,0 %. В такой схеме препарирования технологических трудностей с препарированием не возникло.

Уровень «покрытия» тензорезисторами форм колебаний
при препарировании рабочих лопаток КВД

Показатели	Лопатка 1	Лопатка 2	Лопатка 3	Лопатка 4	Лопатка 5	Среднее значение
Вариант 1						
Кол-во «покрытых» форм	3	7	6	4	6	–
Общее кол-во форм	13	11	11	10	15	–
«Покрытие» форм, %	23,1	63,6	54,5	40,0	40,0	46,0
Вариант 2						
Кол-во «покрытых» форм	5	7	7	7	3	–
Общее кол-во форм	10	10	10	10	10	–
«Покрытие» форм, %	50	70	70	70	30	66,7
Вариант 3						
Кол-во «покрытых» форм	11	9	10	9	7	–
Кол-во «покрытых» форм (относ.)*	13	10	10	9	7	–
Общее кол-во форм	13	11	11	10	8	–
«Покрытие» форм, %	84,6	81,8	90,9	90,0	87,5	87,7
«Покрытие» форм (относ.), %	100,0	90,9	90,9	90,0	87,5	90,7

* – количество покрытых форм, вычисленных по отношению к максимальным напряжениям в первой перемычке, полке или галтели.

По результатам анализа схем препарирования второго варианта видно, что не все анализируемые формы колебаний «покрыты». Результаты анализа «покрытия» форм тензорезисторами в процентном соотношении приведены в таблице. Для данной схемы препарирования «покрытие» форм колебаний в среднем по всем лопаткам составляет 66,7 %. При препарировании лопаток возникли технологические трудности с размещением тензорезисторов. На первой и четвертой лопатках вывод проводов тензорезисторов осложняется близким размещением к галтели.

По всем лопаткам, кроме второй, для третьего варианта имеется полное «покрытие» собственных форм колебаний, по которым возможны резонансы в рабочем диапазоне. Результаты анализа «покрытия» форм тензорезисторами в процентном соотношении приведены в таблице. Для данной схемы препарирования «покрытие» форм колебаний составляет 87,7 %. Особых технологических трудностей при препарировании лопаток не было.

Для третьей схемы по формам колебаний, по которым на лопатках концентраторы напряжений расположены в труднодоступных для размещения тензорезисторов местах, определены чувствительности форм колебаний по отношению к максимальному значению интенсивности напряжений в профиле лопатки. Таким образом, если взять максимальные напряжения на профиле лопатки и по отношению к ним определить чувствительности форм, то доля «покрытия» форм колебаний незначительно увеличится до 90,7 %.

Заключение

Для автоматизированной обработки результатов расчетов вибрационных характеристик разработана программа, которая позволяет вычислять коэффициенты чувствительности форм колебаний при любом расположении и ориентации тензорезисторов на элементе ГТД. С использованием данной программы анализируется количество «покрытых» рассматриваемой

схемой препарирования форм, что позволяет выбирать оптимальное расположение тензорезисторов.

Наилучшие показания по «покрытию» собственных форм продемонстрировал вариант схемы препарирования, разработанный с использованием расчетного метода определения оптимального размещения тензорезисторов. Остались без «покрытия» собственные формы, по которым на лопатках концентраторы напряжений расположены не на профиле, а в труднодоступных для размещения тензорезисторов местах (таких как галтель, перемычка, ножка и т.п.).

Библиографический список

1. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.

2. Герасименко В.П. Математические методы планирования испытаний воздушно-реактивных двигателей: учеб. пособие. – Харьков: Изд-во Харьков. авиац. ин-та, 1982. – 104 с.

3. Основы технологии создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов / А.Г. Братухин, Ю.Е. Решетников, А.А. Иноземцев [и др.]. – М.: Авиатехинформ, 1999. – 553 с.

4. Горбунов Г.М., Солохин Э.Л. Испытания авиационных воздушно-ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1967. – 257 с.

5. Испытания авиационных двигателей: учебник для вузов / В.А. Григорьев, С.П. Кузнецов, А.С. Гишваров [и др.]. – М.: Машиностроение, 2009. – 504 с.

6. Леонтьев В.Н., Сиротин С.А., Теверовский А.М. Испытания авиационных двигателей и их агрегатов. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.

7. Солохин Э.Л. Испытания воздушно-ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1975. – 356 с.

8. Методика экспериментального модального анализа лопаток и рабочих колес газотурбинных двигателей / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, А.Б. Сенкевич, А.Ю. Головкин, Б.П. Болотов // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 11. – С. 2–6.

9. Григорьев В.А., Морозов И.И., Анискин В.Т. Стенды, стендовое оборудование, датчики и средства измерений при испытаниях ВРД. – Самара: Изд-во Самар. гос. авиац. ун-та, 2006. – 64 с.

10. Иванов В.П. Колебания рабочих колес турбомашин. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.

11. Датчики измерительных систем / Ж. Аш [и др.]. – М.: Мир, 1992. – 424 с.

12. Ножницкий Ю.А., Куевда В.К., Мокроус М.Ф. Сертификация авиационных двигателей // ЦИАМ, 1980–2000. Научный вклад в создание авиационных двигателей. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 2000. – С. 669–674.

13. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 256 с.

14. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.

15. Собственные частоты и формы колебаний полой лопатки вентилятора ГТД / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, Б.П. Болотов, И.Л. Гладкий, А.Ю. Головкин // Авиационная промышленность. – 2010. – № 3. – С. 8–11.

References

1. Asaturyan V.I. Teoriya planirovaniya eksperimenta: ucheb. posobie dlya vuzov [The theory of planning of experiment: the textbook for high schools]. Moscow, *Radio i svyaz*, 1983. 248 p.

2. Gerasimenko V.P. Matematicheskie metody planirovaniya ispytaniy vozdushno-reaktivnykh dvigateley [Mathematic methods of jet engines testing planning]. Kharkov: Khar'kovskiy aviatsionnyy institut, 1982. 104 p.

3. Bratukhin A.G., Reshetnikov Yu.E., Inozemtsev A.A. Osnovy tekhnologii sozdaniya gazoturbinnykh dvigateley dlya magistralnykh samoletov [Bases of technology of creation of gas-turbine engines for the main planes]. Moscow, Aviatekhinform, 1999. 553 p.

4. Gorbunov G.M., Solohin E.L. Ispytaniya aviatsionnykh vozdushno-raketnykh dvigateley [The air-rocket engines testing]. Moscow, Mashinostroenie, 1967. 257 p.

5. Grigoriev V.A., Kuznetsov S.P., Gishvarov A.S., etc. Ispytaniya aviatsionnykh dvigateley: uchebnik dlya vuzov [Testing of aviation engines: the textbook for higher education institutions]. Moscow, Mashinostroenie, 2009. 504 p.

6. Leontev V.N., Sirotin S.A, Teverovskiy A.M. Ispytaniya aviatsionnykh dvigateley i ikh agregatov [Testing of aircraft engines and their components]. Moscow, *Mashinostroenie*, 1976. 216 p.

7. Solohin E.L. Ispytaniya vozdushno-raketnykh dvigateley [Testing of the air-rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 356 p.

8. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Senkevich A.B., Golovkin A.Yu., Bolotov B.P. Metodika eksperimentalnogo modalnogo analiza lopatok i rabochikh koles gazoturbinnykh dvigateley [Methods of experimental modal analysis of turbine engine blades and disks]. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2010, no. 11, pp. 2-6.

9. Grigoriev V.A., Morozov I.I., Aniskin V.T. Stendy, stendovoe oborudovanie, datchiki i sredstva izmereniy pri ispytaniyakh VRD [Stands, stand equipment, sensors and measuring instruments for testing the GTE]. Samara, Izdatelstvo SGAU, 2006. 64 p.

10. Ivanov V.P. Kolebaniya rabochikh koles turbomashin [Oscillations of turbomachines impellers]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 224 p.

11. Ash Zh. and others. Datchiki izmeritelnykh sistem [Sensors and measuring systems]. Moscow, Mir, 1992. 424 p.

12. Nozhnitskiy Yu.A., Kuevda V.K., Mokrous M.F. Sertifikatsiya aviatsionnykh dvigateley [Certification of aircraft engines]. *TsIAM, 1980-2000. Nauchnyy vklad v sozdanie aviatsionnykh dvigateley: kn. 1.* Moscow, Mashinostroenie, 2000. pp. 669-674.

13. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [A method of final elements in the equipment]. Moscow, World, 1975. 256 p.

14. Timoshenko S.P., Guder Dzh. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka, 1975. 576 p.

15. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Bolotov B.P., Gladkiy I.L., Golovkin A.Yu. Sobstvennye chastoty I formy kolebaniy poloy lopatki ventilyatora GTD [Natural frequencies and mode shapes of the hollow fan blades of GTE]. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2010, no. 3, pp. 8-11.

Об авторах

Пивоварова Мария Владимировна (Пермь, Россия) – аспирантка кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО ПНИПУ; инженер-конструктор-расчетчик 3-й категории АО «ОДК-Авиадвигатель» (6149900, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: pivovarova-mv@avid.ru).

Бессчетнов Вадим Андреевич (Пермь, Россия) – начальник бригады перспективных методов анализа динамики и прочности АО «ОДК-Авиадвигатель» (6149900, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: besschetnov-va@avid.ru).

About the authors

Maria V. Pivovarova (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Aircraft Engines Department, Perm National Research Polytechnic University; Engineer-Designer-Estimator, UEC-Aviadvigatel JSC (93, Komsomolsky av., Perm, 6149900, Russian Federation, e-mail: pivovarova-mv@avid.ru).

Vadim A. Besschetnov (Perm, Russian Federation) – Head of the Team of Promising Methods for the Analysis of the Dynamics and Strength, UEC-Aviadvigatel JSC (93, Komsomolsky av., Perm, 6149900, Russian Federation, e-mail: besschetnov-va@avid.ru).

Получено 28.02.2017