

$$\times \left\{ \frac{d^2 w}{dt^2} [B_{30}^{(0)} + (k_1 + k_2) B_{30}^{(1)} + k_1 k_2 B_{30}^{(2)}] + \frac{d^2 w'}{dt^2} \times \right. \\ \left. \times [B_{33}^{(0)} + (k_1 + k_2) B_{33}^{(1)} + k_1 k_2 B_{33}^{(2)}] \right\}, \quad (13)$$

$$\text{где } B_{ij}^{(k)}(a_1, a_2) = \sum_{m=0}^{m+z_s+1} \int_{m-z_s}^m \rho_s f_i f_j z^k dz;$$

$ij = 0, 1, 2, 3, 4; K = 0, 1, 2; f_c = 1;$

ρ_s — плотность материала s -го слоя.

Уравнения (5), (6), (7), (10), (13) учитывают специфику строения и свойства композиционных материалов. Их можно рассматривать как исходные при изучении прочности и колебаний оболочек, удовлетворяя граничным и начальным условиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорюк Э. П., Коган Ф. А. Современное состояние теории многослойных оболочек, т. 8, вып. 6. «Прикладная механика», 1972, № 3.
2. Амбарцумян С. А. Общая теория анизотропных оболочек. М., «Наука», 1974.
3. Либреску Л. К уточненной линейной теории упругих анизотропных многослойных оболочек, ч. 1. «Механика полимеров», 1975, № 6.
4. Пикуль В. В. К теории тонких неоднородных пластин и оболочек. «Проблемы прочности», 1977, № 5.
5. Карташов Г. Г., Степаненко Н. Д. Основные уравнения напряженно-деформированного состояния оболочек, изготавливаемых из композиционных материалов. В сб.: «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов», вып. 3. КуАИ, 1976.
6. Новожилов В. В. Основы нелинейной теории уругости. М.-Л., Гостехиздат, 1948.
7. Рассказов А. О. К теории многослойных ортотропных пологих оболочек. «Прикладная механика», 1976, № 11.

УДК 621.438:620.17

В. И. Костин, В. А. Письменов, Т. Л. Семиврагови

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИИ ЛОПАТОК

В настоящее время основным критерием надежности при оценке вибропрочности лопаток является коэффициент запаса прочности, представляющий отношение предела усталости σ_{-1} к максимальному значению действующих переменных напряжений σ_v .

В связи с этим исключительно важным является вопрос получения максимальных значений напряжений на лопатках.

Изучение нагруженности лопаток путем тензометрирования происходит выборочно (в большинстве случаев на 4—10 лопатках колеса, 1—2 изделиях).

В данной работе на базе обобщения экспериментального материала сделана попытка оценить надежность определения максимальных значений напряжений в лопатках при их ограниченном числе. Для получения такой оценки необходимо решить ряд задач:

1) оценить закон распределения напряжений по лопаткам в колесе и возможность прогнозирования наибольшего уровня напряжений на базе известного теоретического закона распределения по его числовым характеристикам, полученным из выборки ограниченного объема;

2) установить зависимость параметров распределения напряжений от изменения силы возбуждения;

3) определить порядок разброса величин напряжений, связанных с однократностью замера, погрешностями измерений и обработки их результатов;

4) вычислить с наперед заданной надежностью количество лопаток в колесе, подлежащих тензометрированию, для получения величины напряжения с наиболее нагруженной лопатки или одной из нескольких наиболее нагруженных лопаток, в зависимости от общего числа лопаток.

Результаты, полученные при проведении четырех экспериментов по тензометрированию лопаток компрессора и турбины ТВД, были обработаны с применением вероятностно-статистических методов. Это позволило установить закон распределения напряжений по лопаткам колеса.

Для оценки влияния уровня возбуждения на максимальные значения напряжений и различий в уровнях напряжений в разных двигателях при одной и той же возбуждающей силе были использованы результаты экспериментов по тензометрированию лопаток одной из ступеней компрессора на 2 роторах при высокочастотных колебаниях по пятой форме от резонанса с 19 гармоникой ротора.

Установлено, что интенсивные колебания с этой формой возбуждаются одной из шестерен редуктора за счет нарушения геометрии зуба. Повышенные отклонения вызывают рост напряжений. Шестерни, не имеющие отклонений, как правило, вообще не возбуждают колебаний с частотой 19 гармони-

ки, или уровень их незначителен. Это позволило использовать указанную шестерню как постоянный по уровню возбудитель.

При проведении первого и второго экспериментов лопатки роторов 1 и 2 были тензOMETрированы поочередно с одним возбудителем (шестерня 1). На роторе 1 было тензOMETрировано 74,5% лопаток колеса, а на роторе 2—82% (рис. 1). Из графиков следует, что один и тот же возбудитель вызывает разные напряжения на различных колесах.

В третьем эксперименте на роторе 1 было произведено тензOMETрирование тех же лопаток без переприваривания с другим возбудителем (шестерня 2, также имеющая отклонение по геометрии зуба). Полученные данные (рис. 1) показали, что с ростом силы возбуждения пропорционально увеличиваются средние и максимальные значения напряжений, а следовательно и дисперсия.

В процессе четвертого эксперимента были замерены напряжения на лопатках одной из ступеней компрессора ротора 3 при резонансе с 3 гармоникой ротора. Колебания возбуждались на проходных оборотах запуска, при этом имели место связанные колебания системы диск-лопатка с 3 волнами. Было исследовано 82% общего числа лопаток ступени. Большинство лопаток тензOMETрировалось при нескольких проходах через резонанс. Резонансные колебания возникали на всех лопатках одновременно независимо от разницы в значениях частот собственных колебаний отдельных лопаток по основному тону (рис. 1). Для оценки влияния однократности измерений на получение максимальных значений напряжений четыре лопатки из этого колеса были многократно тензOMETрированы при различных запусках. Показания со всех 4 лопаток снимались одновременно, при этом отмечено значительное изменение уровня напряжений (рис. 2). За единицу для каждой лопатки был принят запуск, на котором она показала наибольшие значения напряжений. Проведенная средняя линия показывает изменение условий возбуждения и демпфирования от запуска к запуску. Разброс относительных величин напряжений различных лопаток при одном и том же запуске характеризует точность замера и обработки. Анализ графика показывает, что различие в уровнях напряжений, замеренных при различных запусках двигателя, могут достигать 30%, погрешности измерения и обработки результатов в этих экспериментах практически не превышали $\pm 7-8\%$.

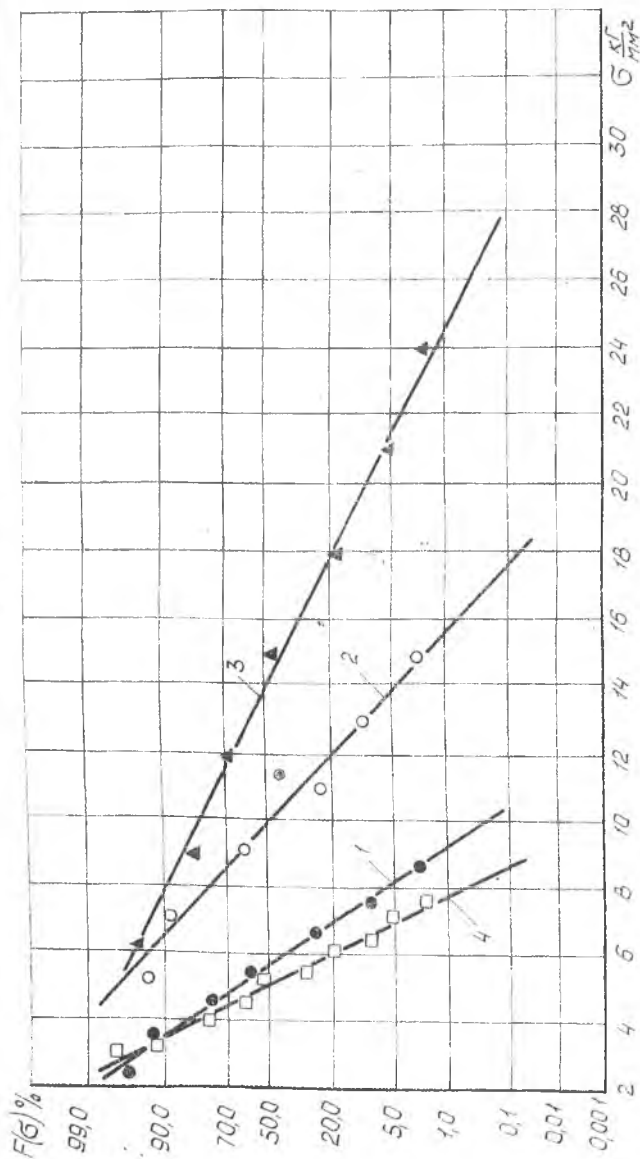


Рис. 1. Интегральные функции распределения напряжений при следующих параметрах распределения: 1 — ротор $1 \sigma = 5,64$ кг/мм², $S = 1,55$ кг/мм², шестерня 2; 2 — ротор $1 \sigma = 9,69$ кг/мм², $S = 2,1$ кг/мм², шестерня 1; 3 — ротор $2 \sigma = 13,8$ кг/мм², $S = 4,83$ кг/мм², шестерня 1; 4 — эксперимент $4 \sigma = 5,15$ кг/мм², $S = 1,19$ кг/мм² — экспериментальные результаты, сгруппированные по интервалам

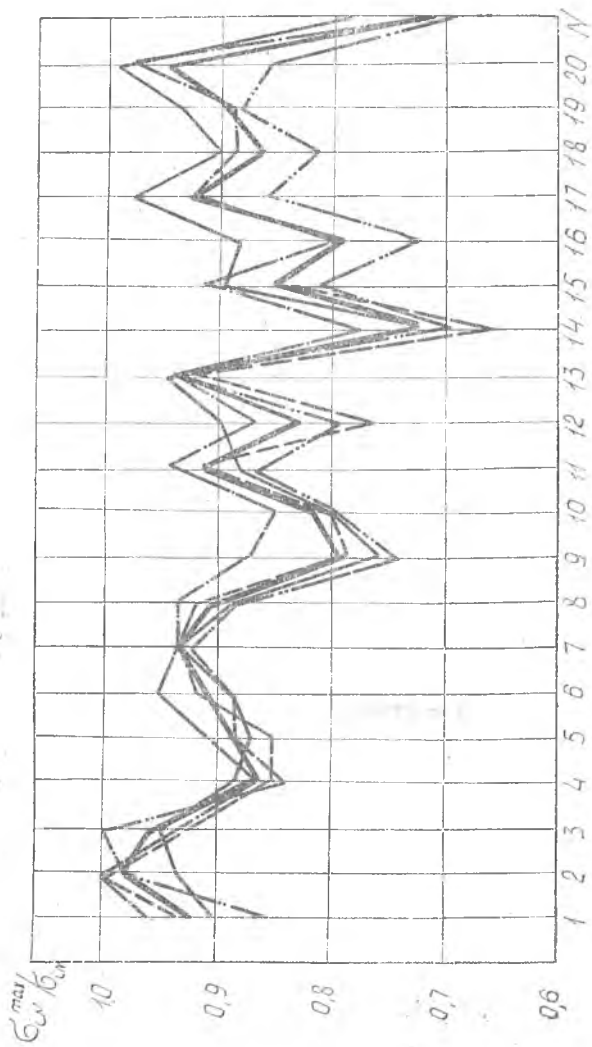


Рис. 2. Изменение относительных уровней напряжений в лопатках при различных запусках: — лопатка 1; - - - лопатка 2; - · - лопатка 3; — лопатка 4; ———— средние значения

Получение величин напряжений на большинстве лопаток колеса позволило провести статистический эксперимент для решения задачи 4. Было произведено по 10 случайных выборок с возвратом по 10 и 5 лопаток из 32, имитирующих тензометрирование на ограниченном количестве лопаток. Поскольку в реальных условиях могли быть получены данные только одной из этих 10 реализаций, то появление каждой из них равновероятно.

По каждой из этих выборок были рассчитаны средние значения и среднеквадратичные отклонения. Построенные по ним функции распределения для 10 лопаток приведены на рис. 3. Там же жирной линией показана функция распределения, вычисленная по данным замеров 32 лопаток. На оси абсцисс точками отмечены максимальные значения напряжений, полученные в каждой выборке.

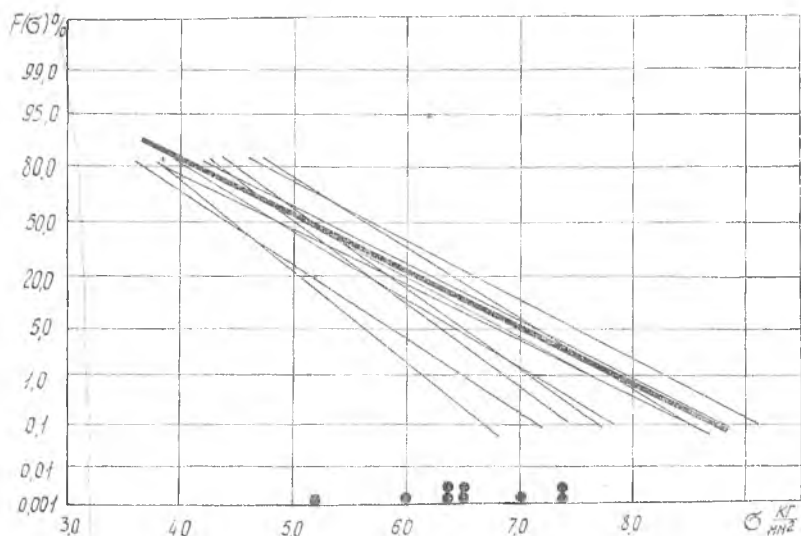


Рис. 3. Функции распределения напряжений по результатам статистического эксперимента при 10 выборках по десять лопаток

При 10 случайных выборках по 5 лопаток наибольшее значение напряжений было получено только 1 раз, а при выборках по 10 лопаток — 2 раза. Максимальные значения напряжений, определенные по интегральным функциям с равной вероятностью, могут быть получены с уровнем $\sigma = 5,95 \text{ кг/мм}^2$

и 7,92 кг/мм², что в первом случае на 20% ниже, а во втором на 7% выше фактически зарегистрированных. Итак, даже при известном законе распределения при такой маленькой выборке точность определения максимальных значений напряжений низкая.

В связи с тем, что полученные результаты с достаточной степенью приближения описываются законом нормального распределения, целесообразно определить минимально необходимое количество лопаток при тензометрировании, которое позволило бы получить с определенной надежностью результат по самой напряженной или одной из наиболее напряженных лопаток.

Поскольку количество лопаток представляет собой дискретную величину, то задача состоит в том, чтобы получить при заданной надежности зависимость между количеством лопаток в колесе, объемом выборки для измерения и границей интервала в среднеквадратических отклонениях, в котором должны лежать полученные при тензометрировании максимальные значения. Другими словами, мы ставим задачу с наперед заданной надежностью получить хотя бы на одной из исследуемых лопаток величину значения напряжений на меньшую, чем $\bar{\sigma} + 1S$, т. е.

$$\sigma_{\max} \geq \bar{\sigma} + 1S,$$

где $\bar{\sigma}$ — средняя величина напряжений, кг/мм²; S — среднеквадратическое отклонение; 1 — левая граница на правой ветви функции плотности распределения, выраженная в долях среднеквадратического отклонения.

Назначая для тензометрирования определенные лопатки, мы не можем отдать предпочтение какой-либо из них. Поэтому вероятность получения результата хотя бы по одной из m наиболее нагруженных лопаток при выборке в n лопаток может быть рассчитана по закону умножения вероятностей.

Левая граница интервала l правой ветви функции распределения, выраженная в среднеквадратических отклонениях, может определиться по функции Лапласа и будет зависеть от количества лопаток в колесе и заданной величины m . На рис. 4 показана номограмма, построенная для определения n и l при заданной надежности $\alpha = 90\%$, в зависимости от количества лопаток N в колесе. Здесь значение l будет оценивать точность определения наибольших значений напряжений в колесе при ограниченной выборке. Повышение требуемой надежности повлечет за собой либо увеличение n , либо

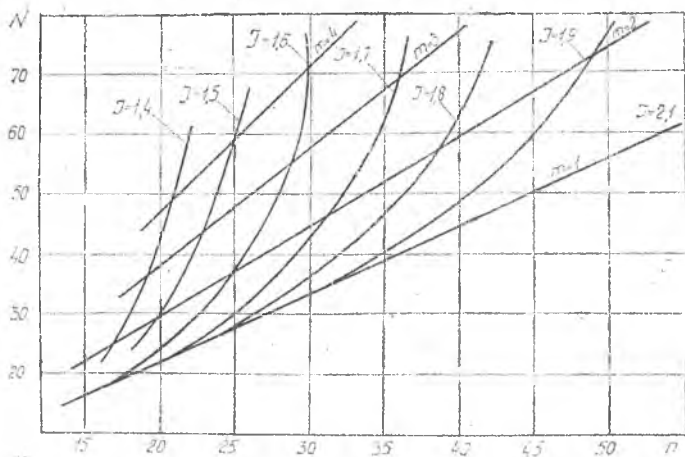


Рис. 4. Номограмма для выбора числа лопаток, подлежащих тензометрированию, с надежностью получения максимального уровня напряжений 0,9

уменьшение значения I , что приведет к снижению точности. График показывает, что для получения надежных данных о величинах максимальных напряжений объемы выборок должны быть значительно увеличены по сравнению с принятыми в настоящее время.

УДК 621.454:531.78:518.12

Ф. И. Ризанский, Ю. А. Пыхтин, Ю. И. Плотников
СЛУЧАЙ МИМИКРИИ ЧАСТОТ ПРИ АНАЛИЗЕ

Численные методы гармонического анализа часто применяются при исследованиях динамических процессов в турбомашинах, в том числе в тензометрии и виброметрии. Особенности этих методов требуют известной осторожности при интерпретации полученных результатов, по крайней мере в случаях, когда высшие гармоники предварительно не удалены фильтрацией. Примером является наблюдавшийся в практике предприятия случай.