На рис. 3,б ,в представлены максимальные значения $x$ и $a$ при различных амплитудах вибрационной нагрузки $F_B$ и импульсах силы $J$ при коротком ударе. При длинном ударе (рис. 3,г) максимальные значения $x$ и $a$ уменьшаются с увеличением отношения периодов нагрузок.

Таким образом, определив экспериментально линию первоначального нагружения и петлю гистерезиса с амплитудой $A_m$ исследуемого виброизолятора и воспользовавшись разработанной программой,можно рассчитать динамические характеристики ВС с одной степенью свободы при многофакторном нагружении.

Библиографический список

I. Лазуткин Г.В., Уланов А.М. Математическая модель деформирования виброизоляторов из материала МР //Изв. вузов. Авиационная техника. 1988. - № 3. - С. 30-34.

УДК 621.438-226:533.6.011

В.В.Малыгин, С.В.Поздеев

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВИБРОНАПРЯЖЕННОСТИ РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ. ЧАСТЬ I

Повышенный интерес к вопросам динамики рабочих колес (РК) турбомашин при нестационарном обтекании лопаток турбулентным потоком обусловлен главным образом двумя обстоятельствами - недостаточной изученностью отдельных аспектов проблемы и неизбежностью возникновения реакции РК на нестационарные аэродинамические возмущения, которые характеризуются многообразием и большим числом источников их возникновения в условиях эксплуатации турбомашин. Актуальной также является разработка надежных методов оценки интенсивности стохастических колебаний (СК), возникающих как результат взаимодействия РК с нестационарным потоком, в условиях эксплуатации на стадии стендовой вибропрочностной доводки турбомашин.

Главной причиной колебаний РК служит окружная неоднородность поля вления в проточной части турбомашины, которая может быть двух типов – стационарной и нестационарной /I, 2/. Периодическая нагрузка $F(\omega, t)$, действующая на РК со стороны потока при работе турбомашины, в общем случае может быть представлена в виде дискретно-непрерывного ряда на периоде, равном окружности РК:

$$F(\omega,t)=\frac{1}{2\pi}\left[\sum_{k} F_k^{I}(\omega_k)e^{i(\omega_k t+\varphi_k)}+\int_{G}\sum_{j} F_j^{II}(\omega_j,t)e^{i(\omega_j t+\varphi_j)}d\omega_j\right], \qquad (\mathrm{I})$$

где $F_k^{I}(\omega_k), F_j^{II}(\omega_j,t)$ – нормированные амплитуды гармоник окружной соответственно стационарной и нестационарной неоднородностей полей полного давления перед РК; $\omega, \omega_k$, $\omega_j$ – круговые частоты; $\varphi_k$, $\varphi_j$ – пространственные фазы соответствующих гармоник; $t$ – время; $i$ – мнимая единица; $G$ – область частот флуктуаций полного давления; $k, j$ = I, 2,...,$\infty$.

Первая сумма в (I) описывает гармонические компоненты аэродинамического возбуждения РК (следы от лопаток направляющих, сопловых аппаратов и других неподвижных элементов конструкций проточной части турбомашины, лопастей винтов; гармоники вращающегося срыва и т.д.).

Второй член выражения (I) соответствует аэродинамическому возбуждению РК за счет крупномасштабной турбулентности потока, сопровождающейся широкополосными флюктуациями (пульсациями) полного давления. Это обстоятельство учитывается тем, что амплитуды $F_j^{II}(\omega_j, t)$ заданы как случайные функции времени, а также интегрированием по частоте в области $G$, в которой пульсации давления имеют значительную интенсивность и непрерывный спектр.

Рассматривая РК как линейную конструктивно-поворотную упругую систему с конечным порядком симметрии $S$, представим спектр ее собственных движений $v(\omega)$ согласно /3/:

$$v(\omega)=\sum_{m}\sum_{n} v_{mn}(\omega)e^{im\varphi_m}, \qquad (2)$$

где $v_{mn}(\omega)$ – функции, описывающие дискретно-непрерывный ряд перемещений сходственных точек поверхности РК для каждой его собственной формы колебаний; $\varphi_m=\frac{2\pi m}{S}$; $m$ – число волн перемещений РК в окружном направлении, равное $0, 1, \ldots, \frac{S}{2}$ при четном и $0, 1, \ldots, \frac{S-1}{2}$ при нечетном $S$ ; $n$ – число волн перемещений в радиальном направлении.

Ненулевая реакция РК на аэродинамическое возбуждение (I) в линейной постановке имеет место при соблюдении известных условий:

$$\begin{cases} \omega_K = \omega_{mn} ; \\ \varphi_K = \varphi_m ; \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} \omega_j = \omega_{mn} ; \\ \varphi_j = \varphi_m , \end{cases} \tag{4}$$

где $\omega_{mn}$ – собственные круговые частоты РК.

Тогда

$$F(\omega,t)\,v(\omega) \neq 0. \tag{5}$$

Следуя методу, изложенному в [4], и учитывая выражения (3), (4), а также ортогональность конечных рядов Фурье [5], обобщенную динамическую реакцию РК на возбуждение потоком (I) $Q(t)$ можно представить с точностью до постоянного множителя в следующем виде:

$$Q(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_m \sum_n \left[ Q^{I}_{mn} + Q^{II}_{mn}(t) \right] e^{i(\omega_{mn} t + \gamma_{mn})}, \tag{6}$$

где $Q^{I}_{mn}$, $Q^{II}_{mn}(t)$ – амплитуды гармоник обобщенной реакции РК, возбуждаемой соответственно стационарной и нестационарной компонентами аэродинамического возбуждения; $\gamma_{mn}$ – пространственные фазы соответствующих гармоник.

Под обобщенной динамической реакцией $Q(t)$ следует понимать собственно перемещения, виброскорости, виброускорения, вибронапряжения или деформации.

Описанный механизм взаимодействия РК с реальным потоком и созданная на его основе качественная модель позволяют дать интерпретацию некоторым наблюдаемым экспериментальным данным.

Первый член выражения (6) соответствует вибрационной реакции РК на стационарную компоненту неоднородности потока (первое слагаемое в (I)), поэтому $Q^{I}_{mn} = const(t)$. Второй член в (6) описывает результат взаимодействия РК с нестационарным потоком, гармоники которого являются членами второй суммы (I). В силу этого зависимость функций $Q^{II}_{mn}(t)$ от времени носит случайный характер, а их плотность распределения согласно (5) качественно совпадает с плотностью распределения случайных функций $F_j(\omega_j, t)$.

Если $Q^{I}_{mn} \gg \bar{Q}^{II}_{mn}$ ( $\bar{Q}^{II}_{mn}$ – некоторый стационарный параметр, характеризующий осредненную функцию $Q^{II}_{mn}(t)$ , например матожидание), то превалирующим фактором аэродинамического возбуждения является окружная стационарная неоднородность поля давления, благодаря чему колебания РК имеют резонансный характер. Колебания такого типа в настоящее время наиболее изучены [3, 6, 7] и, как правило, реализуются одновременно по небольшому числу собственных форм колебаний (по I-2 формам) [8]. Полирезонансное состояние РК теоретически исследовано В.П.Ивановым [3], но реальным конструкциям РК оно несвойственно.

Если $Q^{I}_{mn} \ll \bar{Q}^{II}_{mn}$ , то преобладает нестационарное возбуждение и, следовательно, колебания РК являются стохастическими (употребляется также термин "случайные"), с меняющейся в широких пределах случайной амплитудой. Экспериментальным исследованиям СК посвящено много работ, например [9-I2], что объясняется прежде всего тем, что наряду с резонансами и автоколебаниями рассматриваемый тип динамических процессов в настоящее время является основным в условиях эксплуатации современных турбомашин.

Обобщая накопленный опыт экспериментальных исследований СК, следует выделить главные их особенности и дать им толкование на основе изложенной модели (I)-(6).

Первая особенность заключается в том, что СК представляют собой суперпозицию большого числа "элементарных" колебательных процессов с близкими частотами по различным собственным формам колебаний РК [II]. Этот экспериментальный факт является прямым следствием структуры аэродинамического воздействия (I) и реакции на него РК (6). Полагая собственные формы колебаний РК статистически независимыми (вследствие линейности модели), следует ожидать, что из всего многообразия гармоник аэродинамических нагрузок на произвольно выбранной частоте из области $G$ непременно найдется частота, неортогональная к рассматриваемой собственной форме колебаний РК, т.е. удовлетворяющая условию (4). Поскольку спектр пульсаций полного давления в турбулентном потоке, как показывает эксперимент /13/, является в области $\mathcal{G}$ сплошным (наличие в (1) интегрирования по частоте), то условие (3) выполняется автоматически для всех собственных форм колебаний РК, частоты которых также расположены в области $\mathcal{G}$. Интенсивность же отклика РК зависит от уровня входного воздействия, т.е. от значений амплитуд $F_j^{II}(\omega_j, t)$ в фиксированные моменты времени, что соответствует линейной постановке задачи. Имея в виду, что функции $F_j^{II}(\omega_j, t)$ быстро осциллируют /11/, каждая из собственных форм колебаний РК испытает воздействие и отреагирует на него много раз за один оборот ротора турбомашины. Таким образом, реакция РК $Q(\omega, t)$ теоретически представляет суперпозицию колебаний по всем собственным формам $v_{mn}$, поэтому свойство многокомпонентности СК непосредственно вытекает из выражения (6).

Другая особенность СК заключается в том, что они могут возникать в принципе на любом эксплуатационном режиме двигателя в отличие от резонансных колебаний, для которых условия (3), (4) выполняются только на определенных частотах вращения ротора турбомашины. Причиной этого свойства СК является инвариантность структуры нестационарного возбуждения (1) РК в турбулентном потоке относительно режимов эксплуатации турбомашин. Действительно, изложенный механизм возникновения СК основан на самом факте существования вихрей крупномасштабной турбулентности потока перед РК. Поэтому для реализации СК достаточно создать условия возбуждения РК с преобладанием нестационарной компоненты окружной неоднородности поля давления в проточной части турбомашины /4/.

Из представленной модели следует, что турбулентный поток является источником возбуждения всех собственных форм колебаний РК, у которых $m \neq 0, \frac{S}{2}$. Это также соответствует результатам экспериментов /14/. Однако на практике уровень вибрационной реакции различных собственных форм весьма неодинаков. Как показано в /15/, повышенной чувствительностью к нестационарному воздействию обладают собственные формы колебаний РК с относительно большим числом волн перемещений в окружном направлении. Совокупность форм колебаний с относительно большим $m$ составляет зону полного частотного насыщения спектра собственных движений РК /3/. Именно они определяют общую динамическую напряженность элементов конструкции РК /4/ при нестационарном возбуждении. Для исчерпывающего объяснения этого экспериментального результата необходимы, по-видимому, более сложные нелинейные математические модели, учитывающие различия характеристик демпфирования разных форм колебаний РК.

Важной чертой СК, впервые рассмотренной в /16/, является их независимость от источников зарождения крупномасштабной турбулентности в потоке вихреобразований. Для определения реакции РК на турбулентный поток важно, чтобы реализовалось окружное распределение поля давления в виде разложения (1) с быстро осциллирующими амплитудами гармоник $F_j^{II}(\omega_j, t)$. При этом несущественны причины, приводящие к такому распределению и обуславливающие случайное изменение амплитуд $F_j^{II}(\omega_j, t)$ во времени. Следовательно, обобщенная реакция РК (6) на нестационарный поток не может содержать признаков источников, порождающих турбулентные явления в потоке.

С другой стороны, из (5) и (6) очевидно, что амплитуды обобщенных перемещений $Q_{mn}^{II}(t)$ пропорциональны амплитудам гармоник возбуждения $F_j^{II}(\omega_j, t)$. Это обстоятельство имеет экспериментальное подтверждение. Для СК характерна устойчивая тенденция к росту интенсивности при увеличении амплитуды среднеквадратичных пульсаций полного давления $\varepsilon$, которая является осредненной мерой турбулентности аэродинамического потока /11, 14-16/, т.е. практическим аналогом функции $F(\omega, t)$. Рассматриваемое свойство СК имеет важное значение, так как создает основу для разработки методов оценки эксплуатационной вибронагруженности РК по результатам стендовых испытаний турбомашин, что позволяет сопоставить результаты исследований СК РК с неидентичными условиями возбуждения.

Анализ многочисленных экспериментальных данных исследования СК РК турбомашин и предложенная математическая модель (1)-(6) позволили разработать расчетно-экспериментальный метод оценки уровня случайной вибронагруженности рабочих лопаток компрессора турбомашин в эксплуатации по данным их стендовой доводки. Сущность метода будет изложена во второй части данной статьи.

Библиографический список

1. Самойлович Г.С. Возбуждение колебаний лопаток турбомашин.- М.: Машиностроение, 1975. - 288 с.

2. Самойлович Г.С. Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин. – М.: Наука, 1969. – 444 с.

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

4. Малыгин В.В. Возбуждение колебаний рабочих колес вентиляторов авиационных ГТД //Проблемы прочности. – 1984. – № 2. – С. 85–89.

5. Романовский П.И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа. – М.: Наука, 1973.–336с.

6. Динамика авиационных газотурбинных двигателей /Под ред. И.А.Биргера, Б.Ф.Шорра. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.

7. W.A. Stange, J.C. MacBain. An Investigation of Dual Mode Phenomena in a Mistuned Bladed Disk // Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design. – July 1983. – Vol. 105. – P. 402–407.

8. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. // Т. 3. Колебания.– М.: Машиностроение, 1980. – С. 265–281.

9. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.

10. Гершгорин А.Д., Кемпнер М.Л. К исследованию случайных колебаний лопаток двигателей летательных аппаратов //Проблемы прочности.– 1984. – № 1. – С. 65–67.

11. Еленевский Д.С., Малыгин В.В. Исследование колебаний рабочих колес вентиляторов ГТД при изменении условий на входе в двигатель //Проблемы прочности. – 1983. – № 10. – С. 81–85.

12. Матвеев В.В., Зиньковский А.П. Резонансные колебания циклически-симметричной системы с учетом динамической неоднородности, обусловленной различием характеристик демпфирования //Проблемы прочности. – 1980. – № 6. – С. 82–88.

13. Аэродинамика и акустика винтовентиляторов /Свищев Г.П., Мунин А.Г., Бляхман Б.П. и др. – Тр. ЦАГИ. – 1982. – Вып. 2189. – 18с.

14. Вибрационная реакция вентиляторов двухконтурных ГТД в нестационарном потоке /Еленевский Д.С., Корзенков Ю.И., Малыгин В.В., Чижова Н.М. //Аэроупругость турбомашин: Тез. докл. X Всесоюз. конф.– М., 1985. – С. 85. – (Тр. ЦИАМ; № 1166).

15. Малыгин В.В. Особенности динамики вентиляторов ГТД большой мощности в нестационарном потоке //XI Всесоюз. конф. по аэроупругос-

ти турбомашин: Тез.докл. в 2-х ч. – Киев: Ин-т проблем прочности,1987. Ч.2. Стендовые доклады. – С. 22.

16. Еленевский Д.С., Малыгин В.В., Чижова Н.М., Вильнер И.П. О возможности имитации эксплуатационного возбуждения вентиляторов ГТД при стендовых испытаниях //Конструкционная прочность двигателей: Тез. докл. IX Всесоюз.науч.-техн. конф. – Куйбышев, 1983. – С. 60–61.

УДК 621.643

Е.А.Панин

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ТРУБОПРОВОДОВ С КОНСТРУКЦИОННЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ

Объединение большого количества трубопроводов значительной протяженности в пучки связывают с вопросами улучшения компоновки,уменьшения массы и габаритов, упрощения монтажа и обеспечения ремонтопригодности трубопроводных систем.

Конструктивно-функциональный анализ пучков показал целесообразность их использования для повышения вибрационной прочности и надежности трубопроводных систем, работающих в экстремальных условиях вибрационных воздействий.

По сравнению с сосредоточенным демпфированием трубопроводных систем с помощью упругодемпфирующих опор, в пучках реализуется распределенное конструкционное демпфирование, благодаря которому обеспечивается большая способность к поглощению энергии. Это приводит к более эффективному снижению уровня действующих резонансных напряжений в трубопроводах; к уменьшению количества или полному исключению промежуточных опор крепления, через которые обычно передается кинематическое возбуждение; к увеличению длин пролетов, снижению массы и габаритов системы.

Пучок представляет собой сборочную единицу, содержащую, по крайней мере, два трубопровода, которые конструктивно связаны между собой в упругую систему, имеющую соприкасающиеся участки. На поверхностях соприкосновения (в узлах трения) этих участков создана сдавливающая поперечная нагрузка. При циклическом деформировании пучка на соприкасающихся участках возникают касательные напряжения, которые являются