УДК 629.7.03.018

Б.Б. КОРОВИН

Федеральное государственное унитарное предприятие РФ «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Россия

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ ЛОПАТОК КНД АВИАЦИОННЫХ ГТД ПРИ ИСПЫТАНИЯХ И В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрены методы прогнозирования и контроля вибронагруженности лопаток КНД авиационных ГТД маневренных самолетов на основе учета параметров неоднородности течения на входе в двигатели, а также с помощью полученных в стендовом и летном эксперименте многопараметрических моделей динамического нагружения лопаток.

лопатки компрессора (вентилятора), вибронагруженность, турбулентные пульсации, пространственная неравномерность, прогноз, модели нагружения

Введение

Повышенная вибронагруженность лопаток КНД (вентиляторов) авиационных ГТД при их совместной работе со сверхзвуковыми входными устройствами сложной конфигурации - серьезная проблема, с которой нередко сталкиваются при создании этих двигателей. Оценка ожидаемого в эксплуатации вибрационного нагружения лопаток на ранних этапах создания двигателя и самолета позволяет сократить сроки и стоимость вибрационной доводки двигателей, а полученные в наземном и летном эксперименте модели нагружения лопаток могут быть использованы для контроля технического состояния этих деталей при испытаниях и в эксплуатации. Решению вышеуказанных задач и посвящена настоящая работа, базирующаяся на анализе материалов стендового и летного тензометрирования лопаток КНД большой номенклатуры авиационных ГТД.

Постановка задачи. Для целей прогнозирования и контроля вибронагруженности лопаток КНД при их вынужденных колебаниях оценивались:

– экспериментальные законы распределения относительных вибрационных напряжений $\bar{\sigma}_{v\max}$, полученных по выборкам лопаток, обследованных на стенде и старте, на старте и в полете;

– модели вибронагруженности лопаток в функции экспериментально определяемых параметров нестационарного воздействия на них неоднородности потока на входе в двигатель;

– модели динамического нагружения лопаток в функции параметров полета, работы двигателя и воздухозаборника.

Решение проблемы

Прогнозирование по обобщенным статистическим характеристикам относительного вибрационного нагружения лопаток. Экспериментальное распределение относительных («старт-стенд» и «полет-старт») максимальных переменных напряжений в лопатках КНД при их вынужденных колебаниях на одинаковых частотах вращения ротора дает общее представление о влиянии самолетной компоновки и условий полета на вибрационное нагружение лопаток КНД авиадвигателей маневренных самолетов (рис. 1 и 2).

Из рассмотрения рис. 1 следует, что при установке двигателя на самолет происходит увеличение уровня вибрационного нагружения лопаток в стартовых условиях в среднем в 2,5 раза по сравнению со стендовыми, а в некоторых достаточно редких

© Б.Б. Коровин

случаях и в 5 – 6 раз. Эксплуатация же двигателей в высотно-скоростных условиях полета приводит к дополнительному увеличению вибрационного нагружения лопаток по сравнению с их нагружением на старте в среднем в 1,4 раза (в 2 раза в наиболее неблагоприятных случаях).

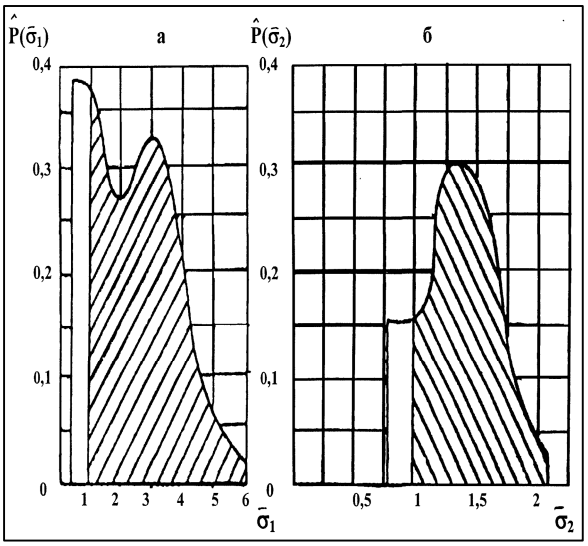

Рис. 1. Экспериментальное распределение относительных вибрационных напряжений в лопатках при работе двигателей в компоновке силовых установок сверхзвуковых самолетов в стартовых условиях и с леминискатным входом на стенде (а), в полете и на старте (б) (по результатам тензометрирования ~200 лопаток КНД на 11-ти экземплярах двигателей 6-ти типов)

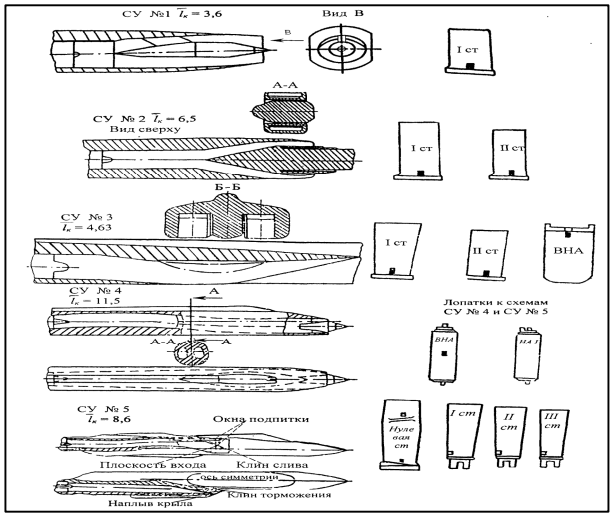

Рис. 2. Схемы обследованных входных устройств сверхзвуковых самолетов 2-го и 3-го поколений и места наклейки тензодатчиков на лопатках компрессора ТРДФ

Такой прогноз, основанный на статистике относительного нагружения лопаток КНД ранее обследованных двигателей и самолетов, достаточно условен. Однако, он объективно настраивает разработчика двигателя на ожидающие его проблемы по динамике лопаток уже на этапе проектирования.

Более конкретные результаты дает применение указанного подхода, если используются статистические характеристики близкого прототипа рабочего колеса для сравнительной оценки решения одной и той же задачи динамики (например, о приемлемости вибронагруженности лопаток на максимальных режимах работы двигателя при их резонансе, вызываемом гармониками общей неравномерности потока).

Опыт показывает, что в качестве критериев такой близости разрабатываемого колеса и его прототипа, наряду с подобием конструктивного выполнения, следует рассматривать частоты собственных колебаний, а также экспериментально определенные коэффициенты взаимосвязи переменных напряжений в различных сечениях лопатки и на поверхности диска при возбуждении обследуемой формы (группы форм) колебаний.

Прогнозирование вибронагруженности лопаток по параметрам неоднородности потока на входе в двигатель. При возбуждении резонансных колебаний лопаток по первым изгибным формам с частотой целочисленной кратности k к частоте вращения ротора, в качестве меры нестационарного силового воздействия на них пространственной неравномерности потока на входе в двигатель может служить величина относительной амплитуды k-ой гармоники окружной неравномерности полного давления воздуха на входе P_1^*, определяемая в соответствии с [1], как $\bar{a}_k = a_k / P_1^*$. Величину a_k получают в результате гармонического анализа кривых окружной неравномерности полного давления на относительном радиусе $\bar{r} = 0,9$ входного сечения

двигателя при обеспечении не менее 5*k* числа замеров этого давления на указанном радиусе.

В качестве меры нестационарного силового воздействия на лопатки турбулентности потока на входе в двигатель согласно [1 – 4] можно использовать величину среднеквадратического отклонения ε или полуразмаха *A* широкополосных пульсаций полного давления в безразмерном виде $\bar{\varepsilon} = \varepsilon / P_1^*$ ($\bar{A} = A / P_1^*$), полученных по замерам пульсации ΔP_1^* на периферии ($\bar{r} = 0{,}9$) входного сечения.

Высокая степень линейной корреляции между параметрами $\bar{\varepsilon}$, $\bar{A}$, $\bar{a}_k$ и переменными напряжениями в лопатках (рис. 3, 4) позволяет ввести понятие коэффициентов виброчувствительности лопаток отдельно к турбулентности и пространственной неравномерности.

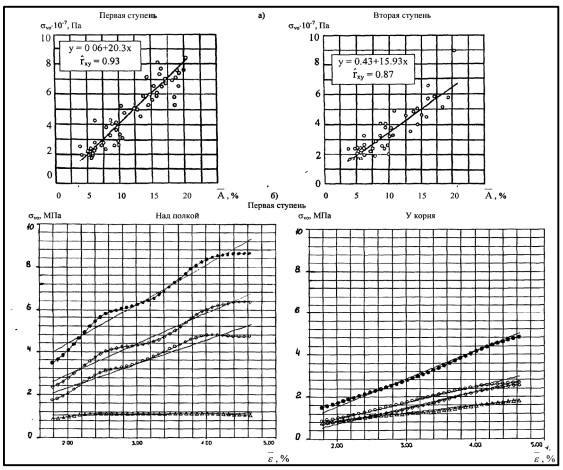

Рис. 3. Взаимосвязь вибрационного нагружения лопаток КНД и интенсивности широкополосных пульсаций полного давления на входе в двигатели при работе на максимакльных (форсированных) режимах в компоновке СУ № 3 (а) и в компоновке СУ № 6 (б)

Из рассмотрения рис. 3 следует, что коэффициент виброчувствительности лопаток к турбулентности может быть определен как

$$K_T = \sigma_{\nu o} / \bar{A}_{cp}, \qquad (1)$$

где $\bar{A}_{cp}$ – среднее (по числу замеров в мерном сечении значение полуразмаха относительных пульсаций полного давления перед ступенью в %);

$\sigma_{\nu o}$ – максимальные вибрационные напряжения в лопатках (вибрационный фон) в Па для фиксированного временного интервала.

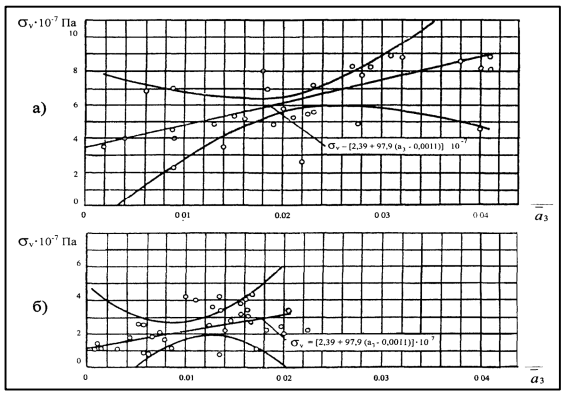

Рис. 4. Линии регрессии σ_ν на $\bar{a}_з$, полученные в условиях работы двигателя одного и того же типа на режиме резонанса рабочих лопаток нулевой ступени его КНД (*К* = 3) в компоновках СУ № 5 (а) и СУ № 4 (б)

Параллельность линий регрессии $\sigma_{\nu\,рез}$ на $\bar{a}_з$, полученных для рабочих лопаток первой ступени КНД одного и того же типа двигателя при его работе в аналогичных высотно-скоростных условиях в составе силовых установок маневренных самолетов различного типа и совпадение необъясняемых однофакторной линейной моделью уровней переменных напряжений (для $\bar{a}_k = 0$) с уровнями вибрационного фона в лопатках в окрестности резонанса (рис. 4 и 5) позволяют определить коэффициент виброчувствительности лопаток к пространственной неравномерности $K_{рез}$ из соотношений:

$$K_{рез} = \sigma_{\nu к} / \bar{a}_k; \qquad (2)$$

$$\sigma_{\nu к} = \sigma_{\nu\,рез} - \sigma_{\nu o}, \qquad (3)$$

где $\sigma_{\nu\,рез}$ – максимальные замеренные вибрационные напряжения в лопатках при их резонансе;

$\sigma_{\nu o}$ – вибрационный фон в лопатках при их расстройке от резонанса в окрестности режима работы двигателя, соответствующего указанному резонансу.

Практическое применение методов прогнозирования вибронагруженности лопаток с использовани-

ем коэффициентов их виброчувствительности актуально для режимов работы двигателя, близких к $N_{\phi\max}$ как при резонансе лопаток, вызываемом 2-ой, 3-ей и 4-ой гармониками, так и без резонанса, ввиду существенного увеличения для указанных режимов работы двигателя в полете параметров неоднородности $\bar{\varepsilon}$, $\bar{A}$, $\bar{a}_k$ [1]. При этом процедура прогнозирования осуществляется по формулам, полученным из (1) – (3) и переписанным в виде

$$\tilde{}\,\sigma_{\nu o} = \tilde{}\,K_T^* \cdot \tilde{}\,\bar{\varepsilon}_{cp}^{\,c}; \qquad (4)$$

$$\sigma_{\nu\, рез} = K_{рез} \cdot \bar{a}_k^{\,c} + \sigma_{\nu o}^{c} = K_{рез} \cdot \bar{a}_k^{\,c} + K_T^* \cdot \bar{\varepsilon}_{cp}^{\,c}. \qquad (5)$$

Здесь $\tilde{}\,\bar{\varepsilon}_{cp}^{\,c}$, $\bar{\varepsilon}_{cp}^{\,c}$ и $\bar{a}_k^{\,c}$ – оценки соответствующих параметров неоднородности потока перед КНД (вентилятором), предварительно определенные в ожидаемых условиях работы двигателя на самолете, а величина $K_T^* = 3 \cdot K_T$ (т.к. $\bar{A}_{cp} = 3 \cdot \bar{\varepsilon}_{cp}$ при допущении нормального закона распределения мгновенных значений турбулентных пульсаций полного давления).

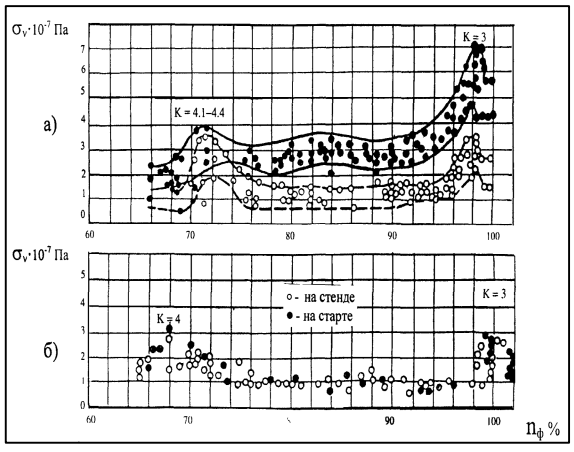

Рис. 5. Изменение по частоте вращения ротора вибрационных напряжений в рабочих лопатках нулевой ступени компрессора при работе двигателя одного и того же типа на стенде и в стартовых условиях на самолете в компоновках СУ № 5 (а) и СУ № 4 (б)

Индекс « ˜ » соответствует режиму с максимальной физической частотой вращения ротора $N_{\phi\,\max}$.

При прогнозировании вибрационного нагружения с помощью соотношений (4) и (5) предполагается, что коэффициенты $\tilde{}\,K_T^*, K_T^*$ и $K_{рез}$ получены по формулам (1) и (2) при тензометрировании лопаток КНД (вентилятора) на наземном или высотном стенде и не меняются существенно в условиях работы двигателя на самолете, а величины $\tilde{}\,\bar{\varepsilon}_{cp}^{\,c}, \bar{\varepsilon}_{cp}^{\,c}$ и $\bar{a}_k^{\,c}$ заранее определены при одном из перечисленных ниже видов испытаний:

– при продувках самолетных каналов или их моделей в аэродинамических трубах;

– при испытаниях натурных воздухозаборников на основном самолете или летающей лаборатории.

Приемлемость нагрузок в лопатках II, III и IV ступеней вентилятора при их случайных колебаниях в эксплуатационных условиях согласно прогноза, выполненного с помощью соотношения (4) по ожидаемому в полете параметру $\bar{\varepsilon}^{\,c}$ и полученным при стендовом тензометрировании двигателя с интерцептором на входе (см. рис.1 в [4]) коэффициентам виброчувствительности лопаток к турбулентности K_T^*, позволила отказаться от тензометрирования лопаток указанных ступеней на самолете.

Успешное практическое применение коэффициента виброчувствительности лопаток к турбулентности было продемонстрировано для этого же двигателя при проведении летных испытаний по оценке его газодинамической устойчивости. Величина $\tilde{}\,K_T^*$, определенная по экспериментальным зависимостям на рис. 3, б, полученным для рабочих лопаток I ступени вентилятора при тензометрировании двигателя в полете с одновременной оценкой турбулентности на входе по параметру $\tilde{}\,\bar{\varepsilon}^{\,c}$, использовалась затем для контроля нагружения лопаток по этому параметру в полетах без тензометрирования.

Эффективность предлагаемых методов прогнозирования была продемонстрирована и при точечной оценке ожидаемой в стартовых условиях работы двигателя на самолете вибронагруженности рабочих

лопаток I ступени модифицированного КНД по результатам тензометрирования на высотном стенде.

Так как в рассматриваемом случае речь шла о резонансных колебаниях лопаток с частотой 3-ей кратности к частоте вращения ротора вблизи режимов с $N_{\phi\max}$, прогноз осуществлялся с помощью соотношения (5).

В процессе тензометрирования, сопровождавшегося измерением полей неравномерности полного давления и пульсаций этого давления перед двигателем, для режима работы двигателя в окрестности резонанса ($N_\phi < N_{рез} = 95\%$) по формуле (1) был определен коэффициент виброчувствительности лопаток к турбулентности потока в категориях $\bar{\varepsilon}_{ср}$, составивший значение 10 МПа/%, а для режимов с $N_\phi = N_{рез} = 95\%$ по формулам (2) и (3) оценено значение коэффициента виброчувствительности лопаток к пространственной неравномерности $K_{рез}$, составившее для $K = 3$ значение 180 МПа/%.

По известному значению $\varepsilon^c_{ср}$ на режиме работы двигателя в окрестности обследуемого резонанса (N_ϕ = 92%) в стартовых условиях на самолете и значению $\bar{a}^c_з$, полученному для самолета-аналога с воздухозаборником такой же конфигурации по формулам (4) и (5) были вычислены значения вибрационного фона в окрестности резонанса и величины переменных напряжений в лопатках при их резонансе, которые практически совпали с напряжениями, полученными впоследствии при тензометрировании указанного двигателя на самолете.

Прогнозирование и контроль вибронагруженности лопаток по моделям, полученным в летном эксперименте. Вибрационное нагружение компрессорных лопаток при их колебаниях по первым группам форм может быть описано с помощью регрессионных моделей [1, 6], входными параметрами которых являются приведенная частота вращения ротора, относительная амплитуда возбуждающей резонанс гармоники окружной неравномерности полного давления и относительный уровень пульсаций этого давления, определенные на периферии входного сечения двигателя (модели I типа), а также с помощью моделей, имеющих в качестве входных параметров высоту, скорость полета, углы атаки и скольжения самолета (модели II типа согласно [1]).

Модели I типа достаточно универсальны. В случае получения на ранних этапах создания двигателя и самолета, они пригодны для прогнозирования нагружения лопаток в ожидаемых условиях эксплуатации без проведения тензометрирования двигателя в компоновках силовых установок летательных аппаратов, для которых он предназначен.

Модели II типа ограничены в применении силовой установкой, в эксперименте с которой они получены, зато при необходимости такие модели могут быть задействованы в современных системах контроля состояния двигателя по полетной информации, регистрируемой штатными бортовыми накопителями.

В целом же необходимость контроля динамического нагружения лопаток в эксплуатации, а также выбор оптимальной модели и алгоритма такого контроля определяется по результатам летного эксперимента.

Так, линейное уравнение регрессии вибронагруженности лопаток КНД в функции положения регулируемой панели воздухозаборника с 95%-ным (по параметру R^2 согласно [6]) объяснением общего разброса переменных напряжений при их случайных колебаниях, полученное для одного из двигателей 4-го поколения на режимах с $N_{\phi\max}$ при ограниченном объеме тензометрирования в полете, позволило предсказать приемлемость вибрационной надежности лопаток, продтвержденную в массовой эксплуатации.

Возможны ситуации, когда для целей контроля нагружения лопаток может оказаться достаточным оценивать временную наработку двигателя в заданных достаточно узких диапазонах частот вра-

щения ротора, реализуемых в установленных в летном эксперименте диапазонах высот и скоростей полета с максимальной вибронагруженностью лопаток.

Процедура контроля в этом случае сводится к пересчету полученной наработки на контролируемых $N_ф$ в циклическую наработку лопаток (по известной собственной частоте) и сравнением ее с допустимой из условий прочности.

Заключение

Для обеспечения возможности прогноза вибронагруженности лопаток КНД ТРДФ (ТРДДФ), в том числе на ранних этапах создания двигателя и самолета, целесообразно совмещать динамическое тензометрирование лопаток КНД в стендовых и летных условиях с одновременной оценкой параметров неоднородности потока в категориях $\bar{a}_k$ и $\bar{\varepsilon}$, предусмотрев получение указанных параметров входной неоднородности авиационных силовых установок на этапе продувок воздухоподводящих каналов (их моделей) в аэродинамических трубах и (или) при летных испытаниях воздухозаборника.

Представление результатов тензометрирования лопаток КНД в полетных условиях в виде моделей их динамического нагружения – одна из приоритетных задач летных испытаний авиадвигателей нового поколения.

Литература

1. Коровин Б.Б. К совершенствованию методологии вибрационной доводки лопаток компрессоров авиационных ГТД // ЛИИ. – Труды № 409. – 1981. – 56 с.

2. Коровин Б.Б. Идентификация аэроупругих явлений в лопатках турбомашин методами спектрального анализа // Аэроупругость турбомашин. – К.: Наук. думка. – 1980. – С. 159-168.

3. Исследование колебаний лопаток компрессора, возбуждаемых случайными пульсациями поттока / В.А. Кулагина, Б.Б. Коровин, В.П. Максимов, Н.А. Набатова, А.Я. Родов // Аэроупругость лопаток турбомашин. Труды ЦИАМ. – 1981. – № 953. – С. 166-181.

4. Коровин Б.Б., Колотников М.Е., Кудашин В.С. К выбору представительного эксплуатационного параметра для прогнозирования вибронагруженности лопаток вентилятора, вызываемой турбулентностью потока на входе в ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – №. 9/25. – С. 173-180.

5. Кулагина В.А., Локштанов Е.А., Ольштейн Л.Е. Влияние характеристик рабочего колеса осевого компрессора и граничных условий за ним на колебания рабочих лопаток // Лопаточные машины и струйные аппараты. – М.: Машиностроение, 1969. – Вып. 4. – С. 57-60.

6. Дрейпер И., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 368 с.

Поступила в редакцию 7.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Ф. Шорр, Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва.