

УДК 629.7.03.018

Б.Б. КОРОВИН¹, П.В. ВОЛКОВ², А.А. СТАСЕВИЧ¹¹*ФГУП РФ «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Россия*²*ФГУП РФ «ММПП «Салют»», Россия*

К КОНТРОЛЮ ВИБРОНАРАБОТКИ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ТРДДФ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ И В ЭКСПЛУАТАЦИИ

На основе анализа материалов динамического тензометрирования лопаток вентилятора современного ТРДДФ в наземных и летных условиях выявлены области режимов полета и работы двигателя с повышенной виброн нагруженностью лопаток. Разработана технология автоматизированной оценки их вибронработки на указанных режимах при испытаниях, предложен алгоритм контроля этой наработки в эксплуатации.

лопатки вентилятора, виброн нагруженность, вибронработка, контроль, резонанс, гармоника возбуждения, турбулентность потока, пространственная неравномерность потока

Введение

Практика вибрационной доводки современных ТРДДФ свидетельствует о высокой виброн нагруженности рабочих лопаток их вентиляторов, что требует контроля этой нагруженности на всех этапах жизненного цикла двигателя.

Как указывалось в [1], наряду с использованием методов прогнозирования и контроля динамического нагружения лопаток при их вынужденных колебаниях с помощью различных экспериментальных моделей, полученных по материалам тензометрирования двигателя на стенде и основном самолете, возможны ситуации, когда контроль повышенной виброн нагруженности лопаток в эксплуатации может быть сведен к оценке их вибронработки. Подробному рассмотрению такой ситуации и посвящена настоящая работа.

1. Формулирование проблемы

Высокая виброн нагруженность лопаток вентиляторов современных ТРДДФ и необходимость контроля этой нагруженности определяется рядом объективных факторов, связанных с существующей технологией проектирования и условиями эксплуатации двигателя в компоновке силовой установки

сверхзвукового маневренного самолета. К указанным факторам относятся:

- трудности надежной отстройки лопаток от резонанса, вызываемого окружной неравномерностью потока перед двигателем на максимальных режимах его работы;
- повышенная виброчувствительность лопаток к неоднородности потока на входе, как следствие освоения высоких удельных параметров в ступени вентилятора (реализация большой напорности при малом весе);
- высокий уровень неоднородности потока перед двигателем в связи с тенденцией использования в сверхзвуковых входных устройствах силовых установок с ГТД воздухоподводящих каналов сложной конфигурации.

В полной мере проявление указанных факторов повышенной виброн нагруженности лопаток было отмечено при летно-прочностных исследованиях вентилятора модифицированного ТРДДФ, материалы которых использованы при подготовке настоящего сообщения, посвященного обоснованию актуальности и разработке алгоритмов контроля вибронработки лопаток вентилятора при испытаниях и в эксплуатации.

2. Решение проблемы

2.1. Условия проявления максимальной вибронагруженности лопаток при работе ТРДДФ в составе силовой установки самолета. Максимальная вибронагруженность лопаток вентилятора обследуемого ТРДДФ наблюдалась на режиме повышенной тяги (РПТ) двигателя при реализации в программе его автоматического регулирования закона ограничения физической частоты вращения ротора вентилятора (N_1) типа «домик». Закон предусматривал поддержание заданного значения приведенной частоты вращения $N_{1пр}$ до достижения величины $N_1=100\%$, которая оставалась постоянной, пока не наступало ограничение по температуре T_4^* , приводившее к снижению N_1 .

Работа двигателя на режиме РПТ сопровождалась многократным проходом через резонанс рабочих лопаток первой ступени вентилятора, вызываемый 3-й гармоникой возбуждения и проявлявшийся в диапазоне физических частот вращения $N_{1рез} = 97,5 - 99\%$. Темп и направление (по знаку производной изменения величины N_1) проходов через указанный резонанс, а также конкретное значение $N_{1рез}$, соответствовавшее максимуму переменных напряжений в лопатках для каждого из проходов, зависели от температуры наружного воздуха и высотно-скоростных условий полета.

В процессе проведения летного эксперимента с тензометрированием вентилятора двигателя в полном соответствии с результатами ранее проведенных исследований, изложенных в [2] и [3], выявлено два доминирующих и практически равнозначных влияющих фактора динамического нагружения лопаток, определяемых условиями совместной работы двигателя и воздухозаборника.

Первый из этих факторов - пространственная неравномерность течения в окружном направлении, обусловившая более интенсивные, нежели при стендовых испытаниях, резонансные колебания лопаток с частотой третьей кратности ($K=3$) к частоте

вращения ротора. Второй существенно влиявший на вибрационное нагружение лопаток фактор - крупномасштабная турбулентность потока на входе в двигатель.

В зависимости от условий полета и режима работы двигателя, определявших степень расстройки лопаток от резонанса и согласование расхода воздуха через двигатель и сверхзвуковое входное устройство, указанные факторы проявлялись в вибрационном отклике лопаток по-разному.

Остановимся подробнее на тех случаях проявления рассматриваемых факторов, когда уровень переменных напряжений в корневом сечении лопаток достигал значений, близких к допускаемым из условий вибрационной прочности. Для удобства последующего учета этих случаев при контроле динамического нагружения лопаток условимся называть их расчетными.

Первый расчетный случай соответствовал умеренной турбулентности течения на входе в двигатель на режимах с $N_1 = N_{1рез}$. Сочетание таких условий наблюдалось при наземных опробованиях двигателя на стоянке с защитной сеткой воздухозаборника, а также в начальной фазе разгона самолета (числа М полета 0,4-0,6) на малых (до 3 км) высотах (рис. 1).

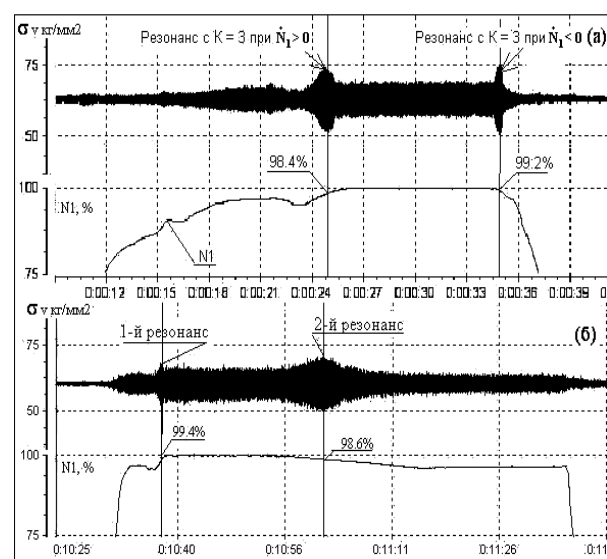


Рис. 1. Осциллограммы вибропроцессов, соответствующих 1-му расчетному случаю при наземном опробовании двигателя (а) и в полете (б)

Отличительная особенность вибрационного отклика лопаток для 1-го расчетного случая их динамического нагружения – превалирование в спектре вибропроцессов гармонической составляющей с частотой 3-й кратности к частоте вращения ротора N_1 (рис. 2, а).

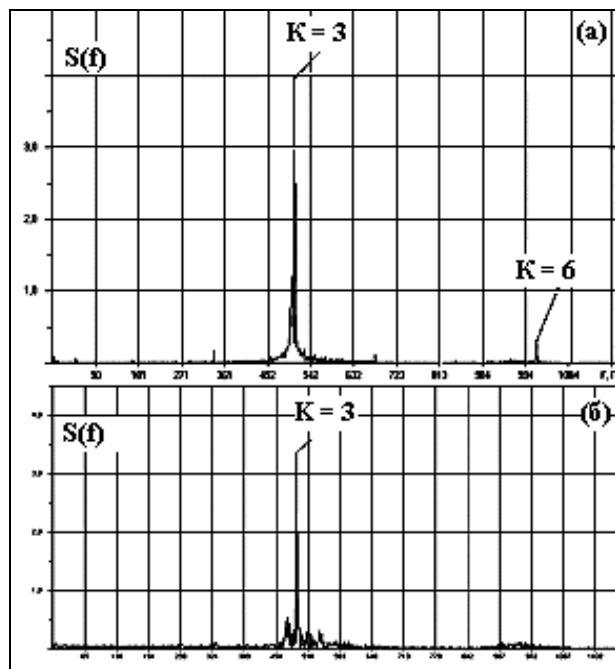


Рис. 2. Характерные спектры переменных напряжений в лопатке для 1-го (а) и 2-го (б) расчетного случаев.

Второй расчетный случай повышенной вибронагруженности лопаток, отмеченный на режимах РПТ в том числе и при существенной ($N_1 = 92-94\%$) расстройке лопаток от их резонанса с $K=3$, соответствовал повышенной турбулентности течения на входе в двигатель при больших числах M полета. Колебания лопаток в этих условиях имеют неустановившийся, случайный характер с концентрацией энергии в полосе частот, соответствующих первым группам форм колебаний рабочего колеса [3 – 5] (рис. 2, б).

Третий расчетный случай для учета наработки рабочих лопаток вентилятора с их повышенной вибронгруженностью соответствовал нестационарному режиму работы силовой установки с кратковременным забросом частоты вращения ротора N_1 до величины, близкой к $N_{1рез}$, вследствие взаимодей-

ствия регуляторов (ограничителей) частоты вращения роторов двигателя с системами управления положением створок реактивного сопла и панелью сверхзвукового воздухозаборника при выключении режима РПТ двигателя в конце разгона самолета до максимальных чисел M полета.

Характерные особенности и условия вибрационного нагружения лопаток для 2-го и 3-го расчетных случаев иллюстрируются рис. 3.

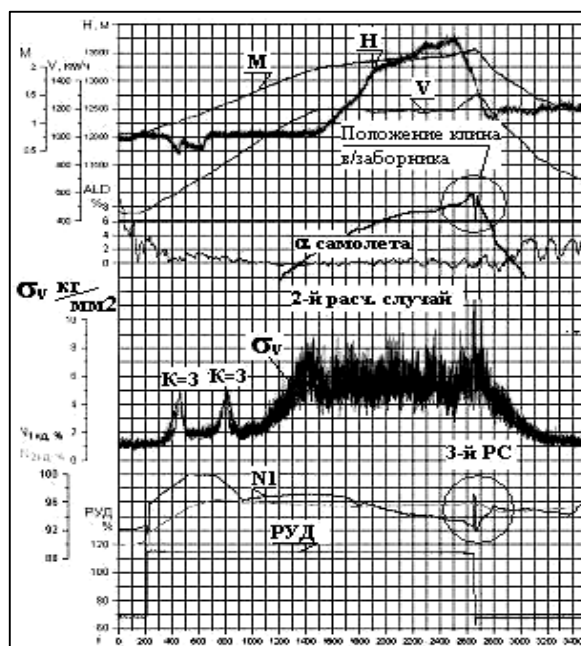


Рис. 3. Условия вибрационного нагружения лопаток для 2-го и 3-го расчетного случаев

Из рассмотрения рисунка, в частности, видно, что возбуждающая колебания лопаток неоднородность потока на входе в двигатель для 3-го расчетного случая имеет импульсный характер вследствие резкого колебательного изменения расхода воздуха через двигатель при одновременном резком изменении геометрии воздухоподводящего канала, вызванных кратковременным (в течении 1 секунды) забросом N_1 с 92 до 97 %.

При этом вибрационный отклик лопаток характеризуется двумя интенсивными всплесками колебаний на частотах вращения вентилятора 95% (при увеличении N_1) и 96,9% (при уменьшении N_1), происходящих с частотой, соответствующей первой группе форм лопаточного венца (рис. 4).

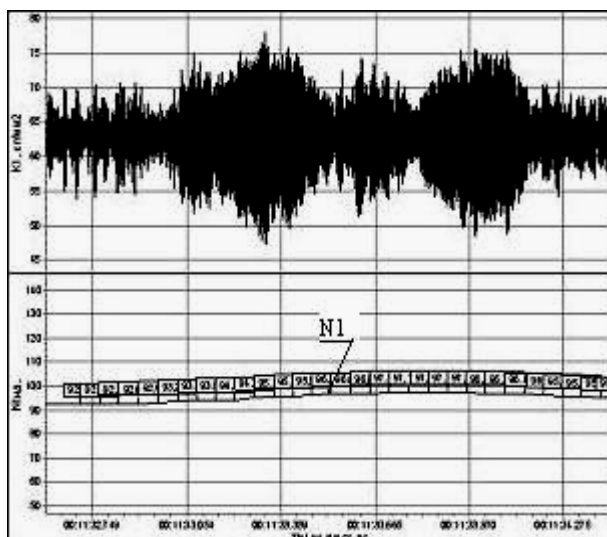


Рис. 4. Особенность вибрационного отклика лопаток для 3-го расчетного случая

Покажем, что вышеуказанную группу расчетных случаев необходимо дополнить еще одним, соответствующим комплексу условий повышенного динамического нагружения лопаток, который не удалось реализовать в летном эксперименте ввиду индивидуальных особенностей обследуемого двигателя и ограниченного числа полетов.

В результате расчета изменения частоты вращения ротора вентилятора N_1 в координатах высота (H) – число M полета при работе двигателя на РПТ в эксплуатационных условиях применения на самолете было установлено, что в разгоне самолета на высотах выше 10 км при числе M полета 1,9-2,1 должен реализовываться резонанс лопаток с $K=3$. Однако в проведенном эксперименте при вышеуказанных числах M полета величина N_1 не превышала значений $92-94\% < N_{1pez}$ (2-й расчетный случай), что можно отнести за счет раннего (при числе $M=1,3$) вступления ограничения по T_4 из-за более низких (по сравнению с расчетным) коэффициентов полезного действия (к.п.д.) узлов для испытываемого двигателя, который был укомплектован газогенератором с повышенной эксплуатационной наработкой.

Но максимальные переменные напряжения в лопатках, зафиксированные при их случайных колебаниях, вызванных повышенной турбулентностью

течения на входе в двигатель для второго расчетного случая, даже в условиях значительной расстройки лопаток от резонанса имели значения, близкие к резонансным напряжениям, отнесенных к первому расчетному случаю. При этом в спектрах вибрационного отклика лопаток для 2-го расчетного случая превалирует составляющая, вызываемая 3-й гармоникой возбуждения (см. рис.2б).

Таким образом, при реализации резонанса с $K=3$ на режимах полета, соответствующих 2 расчетному случаю можно ожидать дополнительного увеличения переменных напряжений из-за суммарного воздействия повышенной турбулентности и значимой 3-й гармоники возбуждения в условиях полета с большими числами M , а рассмотренный выше комплекс условий следует принять в качестве четвертого расчетного случая повышенной виброн нагруженности лопаток, который необходимо учитывать при разработке технологии контроля этой нагруженности в эксплуатации.

В заключение анализа условий динамического нагружения лопаток вентилятора обследуемого ТРДДФ отметим, что виброн нагруженность лопаток при резонансе с $K=3$, регулярно наблюдавшаяся в наборах высоты и в процессе разгонов самолета, а также их нагруженность, вызываемая турбулентностью на входе в двигатель вне условий, отнесенных к расчетным случаям, имела умеренный уровень и поэтому при разработке технологии контроля вибронработки не учитывалась.

2.2. Разработка и частичная апробация алгоритмов контроля вибронработки лопаток. Максимальные замеренные в летном эксперименте динамические нагрузки в лопатках вентилятора обследованного двигателя, полученные при использовании режима РПТ, имеют малую длительность. Это связано с тем, что системой автоматического регулирования практически исключена работа на установившемся режиме при резонансе лопаток с $K=3$, а интенсивные случайные колебания лопаток, вызы-

ваемые турбулентностью, также характеризуются относительно малым временем наработки при максимальном уровне напряжений. Минимизации наработки лопаток при их максимальной вибронагруженности способствует и то обстоятельство, что время использования режима РПТ в эксплуатации жестко ограничено.

Несмотря на вышеуказанные условия, способствующие обеспечению вибрационной надежности лопаток, нормативные ограничения их циклической наработки при колебаниях с максимальными переменными напряжениями, выявленными в летном эксперименте, делают актуальным организацию контроля вибронаработки лопаток в эксплуатации.

Наиболее просто такой контроль может быть организован на основе машинной обработки переменного тензосигнала с лопаток. Его несложно выполнить, как в реальном времени на борту, так и при послеполетной обработке вибропроцессов при условии их записи в течение всего полета.

Именно такой вариант автоматизированного контроля вибронаработки был реализован при тензометрировании лопаток вентилятора обследованного ТРДДФ в летных условиях.

Алгоритм контроля предусматривал подсчет времени превышения заданных достаточно высоких (9, 10 и 11 кгс/мм²) уровней переменных напряжений по тензосигналам, поступающим с наиболее представительных по нагружению лопаток. При этом использовалась огибающая вибропроцесса и максимальная разрешающая способность вычислений.

Входными данными для расчета вибронаработки лопаток служат текущие уровни переменных напряжений и частота вращения ротора низкого давления N_1 . Разрешающая способность расчета определяется: частотой дискретизации, точностью определения мгновенной частоты вращения, размером поддиапазона частоты вращения РНД, а также размером реализации (шагом расчета).

Частота дискретизации при наземных опробованиях и летном эксперименте составляла 16,384 кГц для тензочаналов и 4,096 кГц для каналов записи частоты вращения роторов при ширине поддиапазона частоты вращения N_1 , равном 1% в диапазоне 0-90% и 0,5% в диапазоне 91-105%.

Точность определения времени наработки увеличивается с уменьшением размера реализации. В рассматриваемом эксперименте размер реализации составлял 4096 отсчетов, что соответствовало шагу по времени $\Delta t = 0,25$ сек.

Этапы расчета:

1. Выделение режима в базе данных, содержащего вариант искомого случая нагружения лопаток двигателя.
2. Накопление реализации длительностью 0,25 сек (4096 отсчетов).
3. Расчет уровней переменных напряжений для текущего временного сечения (огибающая Гильберта или пиковое значение).
4. Расчет мгновенной частоты вращения N_1 по сигналу с датчика частоты вращения ротора для текущего временного сечения (реализации).
5. В случае превышения величины рассчитанных по пункту 3 вибрационных напряжений одного из заданных порогов (9, 10, 11 кгс/мм²) производится увеличение времени наработки в данном поддиапазоне частоты вращения РНД для заданных порогов на длительность текущей реализации (0,25 сек).
6. Построение гистограммы распределения величин напряжений.

Результаты автоматизированного подсчета временной и циклической наработки лопаток для всех трех расчетных случаев (временное представление и гистограммы распределения по уровням напряжений) представлены на рис. 5.

Рисунок иллюстрирует эффективность алгоритмов контроля и резкое уменьшение наработки по мере увеличения контролируемого уровня вибронгруженности.

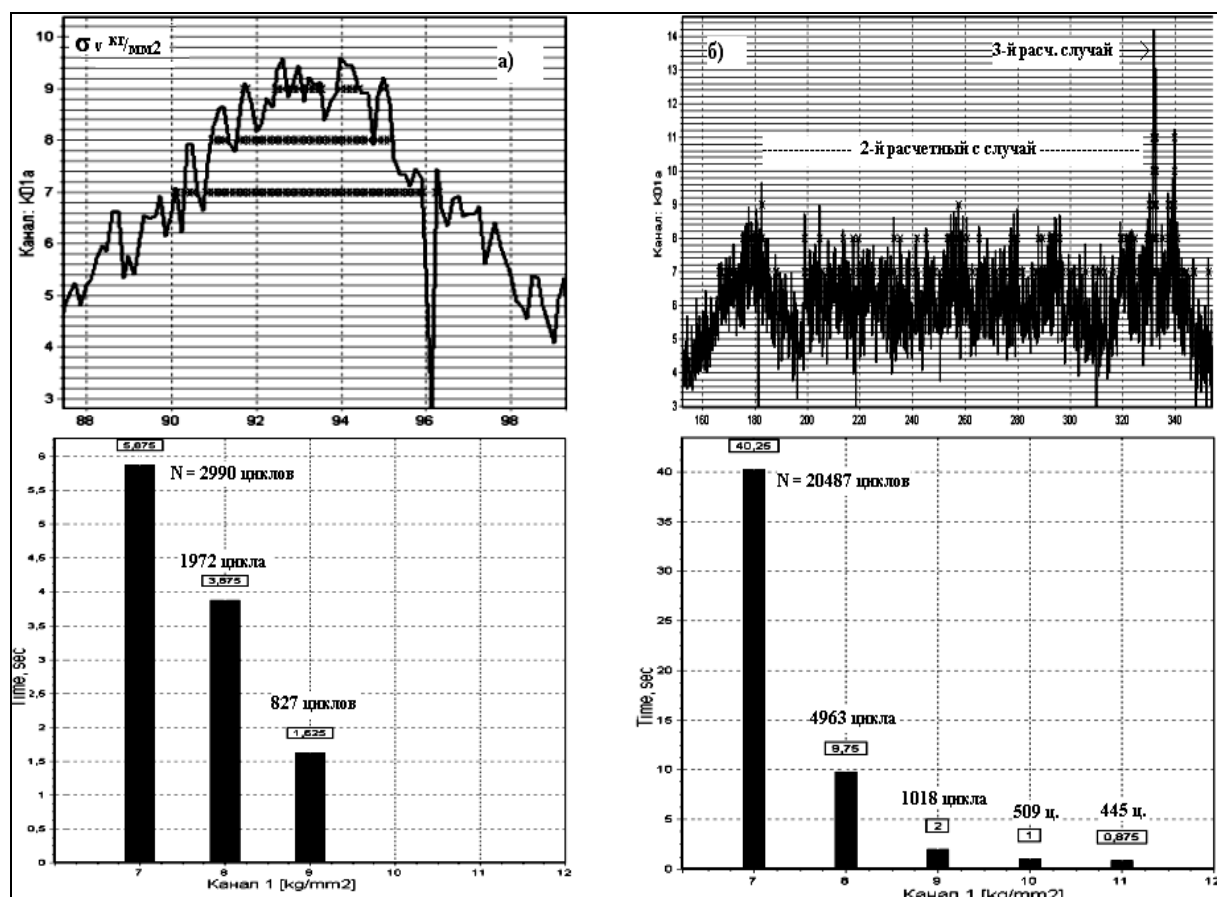


Рис. 5. Результаты расчета вибронаработки для 1-го расчетного случая а), для 2 и 3 расчетных случаев б).

Ввиду отсутствия надежных способов измерения переменных напряжений на элементах ротора ГТД в эксплуатации контроль вибронаработки лопаток по тензосигналу применим пока только при испытаниях, но хорошо поставленный летный эксперимент с тензометрированием лопаток позволяет организовать и эксплуатационный контроль вибронаработки этих высоконагруженных деталей, используя косвенные параметры. Предпосылкой разработки соответствующей технологии служит наличие рассмотренных выше расчетных случаев реализации повышенной вибронагруженности лопаток и представительная номенклатура параметров полета и работы двигателя, регистрируемая на штатный бортовой накопитель полетной информации самолета.

Сформулируем алгоритм контроля вибронаработки лопаток вентилятора в эксплуатации на основе результатов анализа их вибронагруженности для обследованного ТРДДФ.

Контроль предлагается осуществлять в реальном времени на борту и (или) в процессе наземной обработки полетной информации в диагностических центрах. На первом (предварительном) этапе в соответствии с изложенными в разделе 2.1. условиями реализации максимальной вибронагруженности лопаток для каждого из четырех расчетных случаев определяется режимная наработка двигателя.

Для первого расчетного случая указанная наработка подсчитывается на режимах с $N_{1\text{физ}} = N_{1\text{рез}} = 98-99\%$ в стояночных условиях с защитной сеткой ($H=0$; $M=0$) и в полете с числами $M = 0,4-0,7$ в диапазоне высот $H = 0,5-3$ км.

Для второго расчетного случая оцениваемая режимная наработка - суть время работы двигателя на режиме РПТ при числах M полета $1,9-M_{\text{макс}}$ и значениях $N_1 = 92-96\%$, для третьего расчетного случая это время восстановления исходного значения $N_{1\text{физ}}$ после ухода с режима РПТ в конце разгонов до чи-

сел $M = 1,9-M_{\max}$, а для четвертого расчетного случая – время работы двигателя на РПТ при числах $M = 1,9-2,1$ на режимах работы двигателя с $N_{1\text{физ}} = N_{1\text{рез}}$.

Указанная режимная наработка может быть принята в качестве подконтрольной вибронаработки лопаток с большим запасом прочности, так как включает в себя и наработку лопаток при их вибронагруженности ниже подконтрольной.

Учитывая нерегулярность огибающей вибропроцесса переменных напряжений в лопатках для всех расчетных случаев, кроме первого, из-за значимой случайной составляющей в процессе и нестационарный характер огибающей вибропроцесса для первого расчетного случая, ввиду нереализуемости установившегося резонанса лопаток с $K = 3$ в оцениваемом диапазоне частот вращения ротора, временная наработка, рассчитанная согласно вышеуказанным алгоритмам должна быть скорректирована в сторону уменьшения.

Коэффициенты коррекции для каждого из расчетных случаев могут быть получены делением времени реальной вибронаработки лопаток для подконтрольного уровня нагружения, зафиксированной при их тензометрировании в представительном летном эксперименте, на режимную наработку двигателя, полученную в этом же эксперименте.

В частности, принимая в расчет лишь подконтрольный уровень 9 кгс/мм^2 , для первого, второго и третьего расчетных случаев по результатам вычислений, представленных на рис. 5 и 6 коэффициенты занижения наработки лопаток, полученной по алгоритмам их предварительной оценки составили соответственно величины 0,4, 0,005 и 0,5 соответственно.

Искомая подконтрольная вибронаработка лопаток получается умножением режимной наработки на корректирующие коэффициенты.

Переход от временной вибронаработки к циклической осуществляется умножением первой на час-

тоту колебаний лопаток по первой группе форм, которая в нашем случае в среднем составляет 509 Гц.

Эксплуатация контролируемого комплекта лопаток вентилятора прекращается при достижении величины суммарной циклической наработки для лопаток ее нормативных значений.

Известно, что концепция контроля технического состояния элементов машин предусматривает стадию обучения с соотносением результатов контроля по принятому алгоритму с реальным состоянием контролируемого элемента для последующей коррекции самого алгоритма [6].

Поэтому при внедрении предлагаемой технологии контроля вибронгруженности лопаток на стадии обучения в эксплуатации и (или) в процессе опережающих имитационных испытаний реальной вибронгруженности рабочих колес вентилятора на стенде представляется целесообразным осуществлять одновременный подсчет временных наработок по предварительному алгоритму и алгоритму с коррекцией, дополнив их алгоритмом подсчета общей наработки двигателя на режимах с различными $N_{1\text{физ}}$, включая условия проявления резонанса лопаток с $K = 3$ в диапазоне $N_{1\text{физ}} = N_{1\text{рез}} = 96-99\%$.

Результаты расчета наработок двигателя при различных $N_{1\text{физ}}$ с шагом 1% для двух экспериментальных полетов представлены на рис.6.

Из рассмотрения рис. 6, в частности, следует сравнительно малое относительное время наработки обследуемого двигателя на режимах резонанса лопаток с $K = 3$ даже в летном эксперименте, планирование которого предусматривало повышенную наработку на этих режимах. Указанный результат, свидетельствует о резерве безопасного использования режима РПТ, так как рассматриваемая наработка по реализуемости резонанса с $K = 3$ включает в себя и режимы с умеренной вибронгруженностью, не отнесенной к расчетным случаям в эксплуатации.

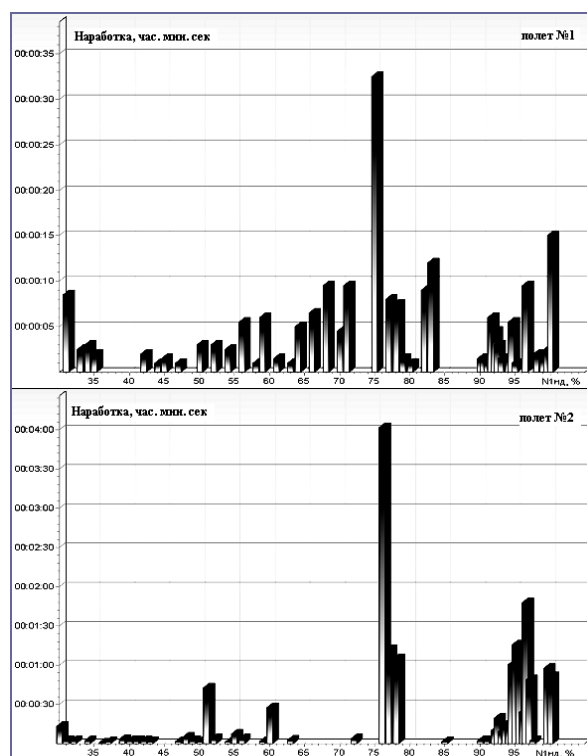


Рис. 6. Результаты расчета режимной наработки двигателя по $N_{1\text{физ}}$ с шагом 1% для двух экспериментальных полетов

Окончательное заключение об эффективности и взаимозаменяемости всех трех предложенных алгоритмов в соответствии с [6] можно будет сделать на основе сопоставления результатов выполненного с их помощью контроля состояния лопаток на стадии обучения и в процессе массовой эксплуатации двигателя.

Заключение

Внедрение предложенных подходов по обеспечению контроля повышенной виброн нагруженности лопаток на основе использования выявленных в летном эксперименте расчетных случаев их динамического нагружения и полученных корректирую-

щих коэффициентов, учитывающих реализуемость вибрационных нагрузок подконтрольного уровня для расчетных случаев, открывает возможности оптимального использования режима повышенной тяги для обследованного ТРДДФ при сохранении безопасности полетов.

Литература

1. Коровин Б.Б. Методы прогнозирования и контроля виброн нагруженности лопаток КНД авиационных ГТД при испытаниях и в эксплуатации // Авиационно-космическая техника и технология: Научн.-техн. журн. – 2006. – № 9/25. – С. 166-181.
2. Коровин Б.Б. Оценка нагружения элементов конструкции ГТД в условия полета // Летные испытания газотурбинных двигателей / Под ред. Г.П. Долголенко. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 83-91.
3. Коровин Б.Б. Идентификация аэроупругих явлений в лопатках турбомашин методами спектрального анализа // Аэроупругость турбомашин. – К.: Наук. думка, 1980. – С. 159-168.
4. Иванов В.П. Колебания рабочих колес турбомашин. – М.: Машиностроение, 1983. – 190 с.
5. Динамика авиационных двигателей / Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1981. – 380 с.
6. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

Поступила в редакцию 1.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук М.Е. Колотников, ФГУП «ММПП «Салют», Москва.